

10. Impactes, vulnerabilitat i retroalimentacions climàtiques als ecosistemes terrestres catalans

Josep Peñuelas, Iolanda Filella, Marc Estiarte, Romà Ogaya, Joan Llusà, Jordi Sardans, Alistair Jump, Jorge Curiel, Jofre Carnicer, This Rutishauser, Laura Rico, Trevor Keenan, Martín Garbulsky, Marta Coll, Maria Diaz de Quijano, Roger Seco, Albert Rivas-Ubach, Jorge Silva, Martí Boada, Constantí Stefanescu, Francisco Lloret i Jaume Terradas*

Unitat d'Ecologia Global CSIC-CEAB-CREAF, CREAF (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals), Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra

Josep Peñuelas i Reixach és professor d'Investigació del CSIC. Dirigeix la Unitat d'Ecologia Global CREAF-CEAB-CSIC. És *highly cited* de l'ISI *Essential Science Indicators* en ecologia/medi ambient, en biologia vegetal i animal i en el conjunt de tots els camps científics. Ecòleg especialitzat en ecofisiologia, estudia les interaccions biosfera-atmosfera. Temes recents de treball: canvi global, canvi climàtic, contaminació atmosfèrica, emissions biogèniques de COV, teledetecció, ecofisiologia vegetal, i funcionament i estructura dels ecosistemes mediterranis.

Iolanda Filella Cubells és investigadora científica del CSIC. Pertany a la Unitat d'Ecologia Global CSIC-CEAB-CREAF (CREAF, Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals). Ecòloga especialitzada en ecofisiologia vegetal. Temes recents de treball: canvi global, canvi climàtic, contaminació atmosfèrica, teledetecció, ecofisiologia vegetal, fenologia, funcionament i estructura dels ecosistemes mediterranis.

Marc Estiarte va néixer a Lleida el 1966. És doctor en biologia per la Universitat de Barcelona. Ha treballat estudiant els efectes de l'augment del CO₂ atmosfèric en la vegetació, i especialment en la composició química de les plantes. Darrerament, mitjançant la manipulació experimental de la temperatura i la precipitació en matollars mediterranis, estudia els efectes del canvi climàtic en l'ecofisiologia de les plantes i en la biogeoquímica dels ecosistemes. Actualment treballa com a científic titular en la Unitat d'Ecologia Global del CREAF-CEAB-CSIC.

Romà Ogaya Inurriagarro és investigador a la Unitat d'Ecologia Global CSIC-CEAB-CREAF (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals). La seva línia de recerca se centra en el creixement i l'ecofisiologia de les principals espècies mediterrànies, i la seva dependència de les diferents condicions climàtiques. Entre els seus objectius hi ha l'estudi dels efectes del canvi climàtic en el desenvolupament i distribució de les espècies dominants del bosc mediterrani, amb especial èmfasi en la disminució de la disponibilitat d'aigua prevista per les properes dècades a les zones de clima mediterrani.

* Agraïm el finançament de l'Institut d'Estudis Catalans per dur a terme aquest capítol, i el finançament d'una gran part de la recerca aquí exposada a càrrec del Govern espanyol (projectes CGL2006-04025 i Consolidar Montes CSD2008-00040) i del Govern català (projecte SGR2009-458).

Joan Llusà és investigador a la Unitat d'Ecologia Global CSIC-CEAB-CREAF. Doctor en Biologia, les seves línies de recerca, en l'àmbit de l'ecofisiologia, abarquen l'estudi dels factors abiòtics (temperatura, humitat, llum, ozó) i biòtics (relacions planta-planta, planta-animat) que afecten tant les emissions com el contingut de compostos orgànics volàtils (COVB) en plantes tropicals i mediterrànies, des d'una perspectiva tant individual com d'ecosistema, contextualitzant-ho en el marc del canvi global. Els resultats de les seves recerques són publicats en nombrosos articles de revistes d'àmbit internacional (incloses en el SCI) i nacional.

Jordi Sardans Galobart és investigador del CREAF i està adscrit al grup de recerca de la Unitat d'ecologia global del CSIC-CEAB-CREAF (Centre de Recerca Ecològica d'Aplicació Forestal). Doctor en Biologia i llicenciat en Ciències Químiques i en Farmàcia, les seves línies d'investigació són: els cicles biogeoquímics, l'ecofisiologia, la contaminació d'elements traça i els estudis metabolòmics i estequiomètrics en ecosistemes terrestres, fonamentalment mediterranis. Tanmateix, està focalitzant part dels seus estudis recents en els efectes dels canvis de la disponibilitat d'aigua i nutrients, i de la contaminació, en les respostes adaptatives de les plantes a través de l'estudi dels canvis químics dels seus teixits, a fi de conèixer millor el funcionament dels ecosistemes mediterranis i dels efectes que el canvi global poden tenir en la seva estructura i funcionament.

Alistar Jump Professor de la Universitat de Stirling a Escòcia. Ecòleg especialitzat en els estudis dels efectes del canvi climàtic sobre la distribució i la productivitat de les espècies vegetals, i en l'ús de l'ecologia molecular per desentrellar-ne els processos implicats.

Jorge Curiel Yuste és investigador del Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF) des de juliol de 2008. Doctorat en Ciències per la Universiteit Antwerpen (UA), ha fet estades post-doctorals en aquest mateix centre, a la University of California at Berkeley i a l'Scottish Crop Research Center (Durham, Escòcia). El 2007 va ser guardonat amb una beca postdoctoral Marie Curie (IEF) al CREAF on col·laborà durant dos anys amb la Unitat d'Ecologia Global CREAF-CEAB-CSIC liderada pel professor Josep Peñuelas. Les seves recerques s'han centrat en l'estudi de l'efecte del canvi climàtic sobre els balanços de carboni en ecosistemes terrestres, i també en la influència del canvi climàtic sobre les poblacions microbianes del sòl.

Jofre Carnicer és investigador post-doctoral a la Universitat de Groningen (Holanda). Les seves línies de recerca abarquen els efectes del canvi global en les dinàmiques poblacionals de papallones, ocells i plantes de la península ibèrica; els processos ecoevolutius que originen els gradients de riquesa d'espècies i les xarxes d'interacció planta-animat; i la teoria d'optimalitat en l'evolució del metabolisme i les formes de vida. Ha treballat també en la divulgació i l'estudi de les interaccions entre canvi climàtic, la crisi energètica global, i les polítiques de transició energètica i descarbonització de la societat.

This Rutishauser és professor ajudant a la Universitat de Bern, Suïssa, i investigador postdoctoral al Centre de recerca ecològica i aplicacions forestals (CREAF), a la Universitat Autònoma de Barcelona. És doctor en Geografia, Història i Ciències del clima. La seva recerca se centra en l'estudi de la fenologia de les plantes dins del sistema climàtic, des d'escala local fins a escala continental durant els darrers anys i segles. Per a la seva recerca utilitza informació extreta de bases de dades fenològiques, conjunts de dades històriques, sensors remots i diversos mètodes de modelització.

Laura Rico Cabanas Llicenciada en Biologia (UB, 1999) i doctorada en Biotecnologia (UB, 2006) amb una tesi doctoral realitzada al Laboratori de Genètica Molecular Vegetal de l'IBMB-CSIC, centrada en l'estudi de l'estructura del genoma, més concretament en la caracterització d'elements mòbils [MGG (2007) 277: 365-377]. Té experiència en diverses àrees de la biologia (biologia molecular, la genòmica de plantes, la seqüenciació del DNA, genotipatge i desenvolupament de nous marcadors moleculars, l'expressió gènica i la bioinformàtica). Actualment està vinculada a la Unitat d'Ecologia Global CSIC-CEAB-CREAF on aplica tècniques d'ecologia molecular per tal de reconstruir la resposta de poblacions vegetals sotmeses a l'efecte de la fragmentació de l'hàbitat i el canvi climàtic.

Trevor Keenan Post-Doctoral Researcher al CREAF de la UAB Treballa en la modelització dels efectes del canvi climàtic.

Martín Garbulsky actualment és investigador a la Unitat d'Ecologia Global CSIC-CEAB-CREAF CREAF de la UAB. Candidat a doctor a la Universitat Autònoma de Barcelona, i docent-investigador de la Universitat de Buenos Aires (Argentina), s'ha format inicialment com a enginyer agrònom i s'ha especialitzat en ecologia d'ecosistemes. Les principals àrees d'interès de les seves investigacions són els patrons i controls de la productivitat primària (PPNA) a escala global i els efectes del canvi global, la teledetecció de la PPNA, la relació entre els canvis en la PPNA i grans herbívors i la teledetecció de processos ecofisiològics en les plantes. Els resultats de les seves investigacions són publicats en revistes científiques internacionals així com en revistes de divulgació.

Marta Coll és biòloga per la Universitat Autònoma de Barcelona. Actualment realitza la seva tesi doctoral a la Unitat d'Ecologia Global CREAF-CEAB-CSIC estudiant els efectes del canvi climàtic sobre l'estat dels boscos catalans i europeus.

Maria Díaz de Quijano és biòloga per la Universitat de Barcelona. Actualment realitza la seva tesi doctoral a la Unitat d'Ecologia Global CREAF-CEAB-CSIC estudiant els efectes del canvi climàtic i l'augment d'ozó atmosfèric sobre l'estat dels boscos del Pirineu.

Roger Seco és biòleg per la Universitat Autònoma de Barcelona i actualment realitza la tesi doctoral al CREAF de la UAB estudiant la interacció entre la biosfera i l'atmosfera. El seu camp de treball és l'intercanvi (emissió i absorció) de compostos orgànics volàtils (COV) entre les plantes i l'aire, especialment en espècies mediterrànies com el pi blanc (*Pinus halepensis*) i l'alzina (*Quercus ilex*).

Albert Rivas-Ubach és biòleg per la Universitat Autònoma de Barcelona. Actualment realitza la seva tesi doctoral a la Unitat d'Ecologia Global CREAF-CEAB-CSIC estudiant la metabolòmica i l'estequiometria de les plantes mediterrànies en resposta al canvi climàtic.

Jorge Silva és biòleg per la Universitat de Vigo. Actualment realitza treballs d'anàlisi de camp i de laboratori en els sistemes experimentals on la Unitat d'Ecologia Global CREAF-CEAB-CSIC estudia els efectes del canvi climàtic sobre l'estat dels boscos i matollars catalans.

Martí Boada i Juncà és professor titular i investigador del Departament de Geografia i de l'Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). Doc-

tor en Ciències Ambientals i llicenciat en Geografia, les seves principals línies d'investigació se centren en el canvi ambiental global i la biodiversitat des de la perspectiva social, centrada particularment en el sistema urbà i els boscos. La seva tasca divulgadora en el camp de les ciències ambientals s'ha traduït en la publicació de nombrosos articles científics, de divulgació i d'opinió; en la participació en nombrosos congressos nacionals i internacionals, i en la publicació d'una cinquantena de llibres. Entre els reconeixements més destacats que ha rebut s'inclouen el Premi Global 500 de Nacions Unides (1995), la Creu de Sant Jordi (1999) i el Premi Nacional de Medi Ambient (2005). És conseller del CADS.

Constantí Stefanescu. Investigador de la Unitat d'Ecologia Global CREAM-CEAB-CSIC i del Museu de Granollers. Ecòleg especialitzat en l'estudi de les papallones en tots els seus aspectes, des dels mol·leculars als poblacionals i globals. Ha dut a terme nombrosos treballs sobre els efectes del canvi climàtic sobre la seva biologia.

Francisco Lloret Maya és catedràtic d'Ecologia del Departament de Biologia Animal, Biologia Vegetal i Ecologia de la Universitat Autònoma de Barcelona i investigador del CREAM. Va realitzar els estudis de Biologia i el doctorat a la Universitat Autònoma de Barcelona, i ha realitzat estades de recerca a la San Diego State University (Califòrnia, USA), la University of Madison (Wisconsin, USA), l'Instituto de Ecologia de la UNAM (Mèxic), el Center for Tropical Forest Research, CSIRO, Atherton (Australia) i la University of Montana, Missoula (USA). El seu camp de recerca ha estat l'estudi de les pautes de composició específica i de la dinàmica de comunitats vegetals, i més en concret: 1) la dinàmica de poblacions i la seva resposta funcional en un context de canvi climàtic; 2) la resposta de les comunitats mediterrànies al règim de perturbacions, particularment als incendis forestals; 3) els patrons en l'àmbit de la comunitat dels caràcters de les espècies en relació amb els gradients de perturbació i productivitat.

Jaume Terradas i Serra és catedràtic emèrit d'Ecologia de la Universitat Autònoma de Barcelona. Va organitzar el primer equip de recerca sobre ecosistemes terrestres a Catalunya i va ser un dels primers impulsors de l'educació ambiental a Espanya. Va ser promotor i primer director (1988-1998) del CREAM. Ha rebut nombroses distincions i premis nacionals per les seves tasques de recerca i divulgació.

Resum	379
10.1. Introducció: impactes, afectació de serveis i gestió	381
10.2. Canvis fenotípics: cicles vitals alterats i conseqüències a les comunitats i als ecosistemes	384
10.3. Adaptabilitat genètica de les espècies. Significativa però impotent davant el canvi actual	386
10.4. Migracions i extincions	387
10.5. Canvis en diversitat, biogeoquímica i funcionament	390
10.6. Altres canvis observats als nostres ecosistemes en relació amb el canvi climàtic	393
10.7. Efectes directes de l'augment de CO ₂ sobre els ecosistemes	396
10.8. El futur dels nostres ecosistemes terrestres davant el canvi climàtic previst per a les properes dècades	396
10.8.1. Boscos	397
10.8.2. Matollars	398
10.9. Retroalimentacions biològiques sobre el canvi climàtic	401
10.10. Béns i serveis dels ecosistemes terrestres. Alteració pel canvi climàtic i gestió	402
Referències	403

Resum

Si la combinació del canvi climàtic, les pertorbacions associades (inundacions, sequeres, incendis forestals...) i els canvis en els altres components del canvi global (sobretot els canvis d'usos del sòl, la contaminació i la sobreexplotació dels recursos) continuen com fins ara, poden superar la resiliència de molts ecosistemes (la seva capacitat per adaptar-se naturalment) (IPCC, 2007a). Amb la qual cosa se n'alteraria l'estructura i el funcionament, i es comprometrien els serveis que actualment proporcionen. L'efecte del canvi climàtic vindrà influït per les interaccions amb aquests altres components del canvi global i per la gestió que es faci de tot plegat.

El canvi climàtic és global, però els impactes ecològics varien localment. Els efectes del canvi climàtic seran diferents a les diverses àrees climàtiques, amb efectes més importants de l'escalfament a les àrees fredes (limitades per l'energia) i amb efectes més importants de l'eixut a les àrees més càlides i àrides (limitades per la disponibilitat d'aigua).

A mesura que cada espècie respon al canvi climàtic, canvien també les seves interaccions amb els altres organismes i amb el món fisicoquímic. Tot plegat genera una cascada d'impactes a través de tot l'ecosistema. Aquests impactes inclouen l'expansió d'algunes espècies a noves àrees i la seva desaparició en d'altres.

A Catalunya ara ja hi ha una quantitat substancial d'evidències observacionals i experimentals dels primers efectes biològics del canvi climàtic que hem viscut en les darreres dècades. La primavera s'ha avançat i l'hivern arriba més tard, de manera que el període vegetatiu s'ha perllongat uns quatre dies per dècada durant els darrers cinquanta anys, amb fortes implicacions per als éssers vius i el medi ambient. A més, algunes espècies s'han desplaçat cap a altituds i latituds més elevades. En els casos més extrems, algunes poblacions estan en perill per la sinergia entre l'estrès produït pel canvi climàtic, que fa inadequats els hàbitats on viuen, i pels canvis en els usos del sòl, com ara la fragmentació del territori, que dificulten la migració cap a hàbitats

amb condicions adients per a la seva supervivència. A les darreres dècades hi ha hagut també un augment de l'eficiència en l'ús de l'aigua per part de la vegetació, però tot i això, la sequera progressiva dels darrers anys s'ha traduït en creixents defoliacions i en força casos menor creixement dels arbres.

Unes espècies són més afectades que altres, amb la qual cosa s'altera la seva habilitat competitiva i, en darrer terme, la composició de la comunitat. S'ha vist, per exemple, una disminució de la riquesa d'espècies dels nostres matollars en els experiments que simulen l'escalfament i la sequera projectats a les properes dècades. Els gèneres mediterranis postpliocè semblen més adaptats per respondre a un medi no fàcilment previsible amb una gran variabilitat estacional i interanual i subjecte a pertorbacions freqüents. Aquests estudis experimentals mostren també que la sequera prevista per a les properes dècades exerceix un efecte negatiu sobre la diversitat bacteriana dels sòls, que va associat a una disminució en la descomposició de la matèria orgànica i també de la seva capacitat de resposta a l'augment de la temperatura.

Aquests canvis en la composició d'espècies de les comunitats vegetals, animals i microbianes han estat acompanyats per nombrosos canvis funcionals, com per exemple minves de l'activitat enzimàtica del sòl, del reciclatge de nutrients, del fòsfor acumulat als teixits vegetals als boscos i de l'absorció de CO₂ produïdes per les sequeres, o una major pèrdua de nutrients en els lixiviats després de les pluges i un augment de les emissions de compostos orgànics volàtils biogènics (COVB) en resposta a l'escalfament. I aquests canvis en generen d'altres en cascada; per exemple, aquests augments de COVB canvien la comunicació entre els organismes i afecten també la química atmosfèrica i el clima.

Els canvis biològics generats pel canvi climàtic, alhora tenen efectes significatius sobre el mateix canvi climàtic, tant per processos biogeoquímics com per processos biofísics. Entre els

primers destaquen la fixació de carboni, és a dir, l'actuació com a embornals del CO_2 atmosfèric, i les emissions de compostos orgànics volàtils. Pel que fa als efectes biofísics dels canvis en l'activitat i l'estructura de la vegetació produïts pel canvi climàtic, semblen especialment importants els que afecten l'albedo, la turbulència i les calors latent i sensible, tots ells mereixedors d'estudis quantitius més detallats.

Tots aquests canvis afecten i afectaran els múltiples serveis productius (subministrament de béns naturals renovables, com ara productes de fusta, caça, bolets, pastures, medecines, aliments...), ambientals (manteniment de la biodiversitat, regulació de la composició atmosfèrica, del cicle hidrològic i del clima, la protecció del sòl contra l'erosió, emmagatzematge de carboni...) i socials (usos recreatius, educatius i de lleure, valors tradicionals culturals, turisme i excursionisme...) proporcionats pels ecosistemes terrestres.

Un dels serveis més vinculats al canvi climàtic és de la fixació de CO_2 . Les respostes al canvi

climàtic i altres factors del canvi global alteraran l'emmagatzematge de carboni als ecosistemes terrestres, però l'extensió i la direcció del canvi no queden clars. Com a resultat dels múltiples canvis climàtics i globals, els models preveuen una producció ecosistèmica neta mitjana de $134 \text{ g C m}^{-2} \text{ any}^{-1}$ per al conjunt dels ecosistemes forestals de Catalunya, tant ara com a mitjan d'aquest segle XXI.

Les estratègies multiús per a la gestió i rehabilitació dels ecosistemes terrestres del país davant de perturbacions climàtiques reclamen un gran esforç educatiu, de recerca i governamental. En els propers anys, les polítiques de reforestació i de gestió d'espais agrícoles abandonats haurien de tenir en compte els canvis que s'estan produint i les condicions que s'estan projectant per al futur immediat. Entre aquestes, hi 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 actius més temps i d'una població creixent.

10.1. Introducció: impactes, afectació de serveis i gestió

Si la combinació del canvi climàtic, les pertorbacions associades (per exemple, inundacions, sequeres, incendis forestals...) i els canvis en els altres components del canvi global (sobretot els canvis d'usos del sòl, la contaminació i la sobreexploatació dels recursos) continuen com fins ara, és probable que superin la resiliència de molts ecosistemes (la seva capacitat per adaptar-se naturalment) (IPCC, 2007a), tot alterant-ne l'estructura i el funcionament (Walther *et al.*, 2002), i es comprometin els serveis que actualment proporcionen (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). L'impacte del canvi climàtic que aquí estudiem vindrà influït per les interaccions amb aquestes altres pressions i per la gestió que es faci de tot plegat.

A mesura que cada espècie respon al canvi climàtic, canvien també les seves interaccions amb els altres organismes i amb el món fisicoquímic. Tot plegat genera una cascada d'impactes en tot l'ecosistema. Aquests impactes, com veurem, inclouen l'expansió d'algunes espècies a noves àrees i fins i tot extincions. El canvi climàtic és global, però els impactes ecològics varien en funció de cada lloc. Per mostrar com el canvi climàtic afecta espècies i ecosistemes particulars del nostre país, presentem observacions majoritàriament dutes a terme a Catalunya.

A Catalunya, com passa arreu del planeta, ara ja hi ha una quantitat substancial d'evidències observacionals i experimentals sobre el lligam entre el canvi climàtic i els processos biològics i fisicoquímics dels ecosistemes. L'augment de temperatures, les noves pautes de precipitacions i altres canvis climàtics ja estan afectant els nostres ecosistemes i els seus organismes, a més de la nostra societat. Per exemple, ara ja és ben sabut que l'aparició de la primavera s'ha avançat i que l'arribada de l'hivern s'ha retardat, de manera que el període vegetatiu s'ha perllongat uns 4 dies per dècada de mitjana 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 en derivin canvis en la composició de les comunitats i desplaçaments en la distribució de les espècies. De fet,

ja se n'han descrit a les muntanyes del país, on les espècies mediterrànies sembla que es desplacen cap a altituds més elevades. En els casos més extrems, les poblacions d'algunes espècies estan en perill per la sinergia entre l'estrès produït pel canvi climàtic, que fa inadequats els hàbitats on vivien, i pels canvis en els usos del sòl, com ara la fragmentació del territori, que en dificulta la migració cap a hàbitats amb condicions adients per a la seva supervivència.

Als ecosistemes terrestres catalans, majoritàriament mediterranis, la disponibilitat hídrica té un paper cabdal en la composició de la vegetació i en la distribució de les espècies. És clar que una aridificació progressiva 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, disminució de les precipitacions), ha de tenir conseqüències importants per a la fisiologia, la fenologia, el creixement, la reproducció, l'establiment i, finalment, la distribució dels éssers vius i, per tant, sobre l'estructura i el funcionament dels ecosistemes. De fet, ja s'ha comprovat tant en estudis observacionals de les darreres dècades, com en estudis experimentals d'escalfament i de sequera, que hi ha espècies més afectades que d'altres, amb la qual cosa s'altera la seva habilitat competitiva i, en darrer terme, la composició de la comunitat. S'ha observat, per exemple, una disminució de la riquesa d'espècies dels nostres matollars. A més d'aquests canvis estructurals, també s'han trobat canvis funcionals, com per exemple la disminució de l'absorció de CO₂ produïda per les sequeres o la major pèrdua de nutrients en els llixiviats 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, més risc d'incendis, més 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 de fusta, caça, bolets, pastures...), ambientals (manteniment de la biodiversitat, regulació de la composició atmosfèrica i el

clima, conservació del sòl 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 continua preocupant en les polítiques ambientals és el vinculat 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 queden clars. L'augment de CO_2 atmosfèric pot incrementar 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 CO_2 a l'aire lliure i els duts a terme en les fonts naturals de CO_2 , és a dir, en condicions naturals i/o a llarg termini, així com el mesurament dels anells dels arbres, ens indiquen que aquests efectes del 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 CO_2 i/o perquè hi ha altres factors que passen a ser limitants, com per exemple, al nostre país, la disponibilitat d'aigua. L'augment de temperatura pot tenir tant efectes positius com negatius sobre aquest balanç de carboni, en gran part en funció de com evolucioni la disponibilitat d'aigua. Als nostres ecosistemes mediterranis, on el canvi climàtic fàcilment farà disminuir la humitat del sòl, la productivitat pot fàcilment decreixer i, per tant, també l'absorció de CO_2 . 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 pertorbacions com els incendis, és menys probable que augmenti. Com a resultat de tot això, els models preveuen una producció ecosistèmica neta mitjana de $134 \text{ g C m}^{-2} \text{ any}^{-1}$ per al conjunt dels ecosistemes forestals de Catalunya, tant ara com a meitat de segle (Gracia *et al.*, 2010), tot i que en aquest darrer cas resulta una producció primària bruta i una respiració total de quasi un 60% més grans que en l'actualitat, com a resultat d'un increment anual del CO_2 atmosfèric d'un 1%, i de la temperatura de $0,04^\circ \text{C}$ i d'una disminució d'un 0,03% de la pluja, valors conservadors entre les previsions actuals de l'IPCC (2007b), fins i tot per sota del que ja s'està pro-

duint (Canadell *et al.*, 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 CO_2 .

Els propers anys, i per pal·liar tant els efectes del canvi climàtic com l'augment de CO_2 atmosfèric que n'és l'origen, les polítiques de reforestació de zones pertorbades i de gestió de l'«aforestació» d'espais agrícoles abandonats haurien de tenir en compte les condicions que s'estan projectant per als propers anys i dècades. Entre aquestes, hi 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 i d'una població creixent. La gestió dels espais forestals, i dels naturals en general, ha d'incorporar una escala de paisatge en què 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 pertorbacions, com per exemple els incendis forestals.

Per conèixer millor en quin grau s'alteren i s'alteraran el funcionament i l'estructura dels ecosistemes mediterranis, es duen a terme estudis les condicions experimentals dels quals es procura que siguin al més similars possible a les naturals, i així, aprofitant els avenços tecnològics, s'apliquen a les diverses escales temporals i espacials per tal que ens donin idea de l'abast de l'alteració dels processos. Aquests estudis abasten 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, a més de la modelització en l'espai i el temps. L'estudi dels efectes que aquests canvis climàtics tenen sobre els nostres ecosistemes terrestres es du a terme mitjançant cinc tipus d'activitats que recorren diferents escales temporals: 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 museus, 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 dels darrers anys; 4) l'estudi experimental dels nostres ecosistemes en 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 5.000-6.000 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 (Estiarte *et al.*, 2008) 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 recol·lectats 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 un 21% i la discriminació del ^{13}C en un 5,2% en el conjunt de catotze espècies estudiades, tot indicant, junt amb estudis posteriors dels anells dels arbres, una possible adaptació a les condicions més càlides i àrides de l'actualitat mitjançant una major eficiència en l'ús de l'aigua (Peñuelas i Matamala, 1990; Peñuelas i Azcón-Bieto, 1992; Martínez-Vilalta, *et al.*, 2008; Peñuelas *et al.*, 2008; Andreu *et al.*, 2008). Tot i això, en les darreres dècades el seguiment anual de l'estat dels boscos —tant efectuat per diferents grups de recerca del país com per l'Administració, per exemple el Ministeri del Medi Ambient espanyol— ens ha permès comprovar com la sequera progressiva dels darrers anys ha anat malmetent l'estat sanitari dels nostres boscos (Carnicer *et al.*, 2010).

A part d'emprar eines paleoecològiques i històriques per moure'ns en el temps, els estudis del canvi climàtic i dels seus efectes demanen anar ascendint successivament en l'escala espacial des dels gens fins als organismes, 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 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. 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 fer mesuraments amb alta resolució espectral (nanòmetre per nanòmetre) i espacial (de quilòmetres a metres), i així aportar informació sobre el contingut hídric i la fisiologia de la vegetació (Peñuelas i Filella, 1998; Garbulsky *et al.*, 2008, 2010). Tot això és especialment interessant, per exemple, per a l'estudi dels nostres ecosistemes mediterranis, sovint perennifolis. Les noves eines ens permeten observar 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 (Garbulsky *et al.*, 2008). 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 modelització el que pot passar als ecosistemes si el canvi climàtic avança com preveuen els models climàtics de l'IPCC (2007b).

En aquest capítol repassem el que s'ha esdevingut en les darreres dècades i el que es preveu per al futur immediat als 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. Ens fixem en els efectes sobre la morfologia, la fisiologia i la fenologia dels organismes vius, les interaccions entre espècies, la distribució de les espècies, l'estructura i el funcionament dels ecosistemes i els efectes de retroalimentació dels canvis biològics sobre el clima. Més detalls i més referències, es poden trobar en els articles i treballs que esmentem.

Els organismes responen al canvi climàtic fent ús de la seva plasticitat fenotípica i també de la molt sovint menystinguda adaptació genotípica (selecció de descendents amb dotacions gèniques més adients a les noves condicions com a resposta a la pressió selectiva que aquestes exerceixen). També responen migrant quan s'obren nous hàbitats adients dins de la distància a la qual es poden dispersar. Aquí presentem els estudis que mostren aquests impactes, i de retruc comentem la retroalimentació, de vegades positiva i de vegades negativa, que aquests impactes tenen sobre el mateix canvi climàtic.

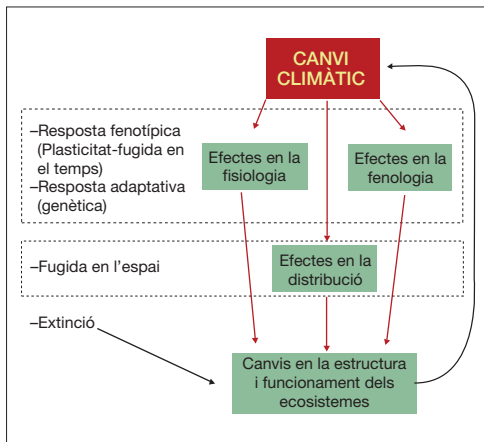


Figura 1. Esquema de les respostes biològiques al canvi climàtic

10.2. Canvis fenotípics: cicles vitals alterats i conseqüències a les comunitats i als ecosistemes

La nostra activitat i l'activitat de tots els organismes vius està fortament influïda per la temperatura. No podem esperar res més que alteracions d'aquesta activitat en escalfar-se el país per sobre

d'1 °C. No ha d'estranyar, doncs, que l'escalfament ja s'hagi traduït en canvis significatius en els cicles vitals de plantes i animals. Recordem que el pas per les diverses fases d'aquests cicles depèn, entre altres factors, de la temperatura acumulada, del que els biòlegs formalitzem com a «graus-dia», és a dir, del total d'energia requerida per un organisme per desenvolupar-se i passar d'un estadi a un altre del seu cicle vital. Les proves d'aquestes alteracions en els cicles vitals ja s'han descrit a diverses regions de tot el món, des dels ecosistemes freds i humits fins als càlids i secs, tot estudiant-ne els registres fenològics disponibles. Aquests canvis fenològics (fenologia és la ciència que estudia la temporalitat de les diverses fases dels cicles vitals dels organismes) s'han convertit en el símptoma més clar que el canvi climàtic ja afecta la vida (Peñuelas i Filella, 2001a).

El nostre país és un dels llocs on els canvis fenològics observats són més importants (Peñuelas *et al.*, 2002, 2004a, 2005). Però d'observacions com les trobades aquí, també n'hi ha, amb resultats comparables, arreu del món. Vegeu per exemple els presentats en la figura 2 referits a tot Europa (Menzel *et al.*, 2006). 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 poden arribar a treure 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 (Peñuelas *et al.*, 2002). I els cicles vitals dels animals també són alterats. Per exemple, l'aparició d'insectes com les papallones, que passen pels diversos estadis larvaris més ràpidament com a resposta a l'escalfament, s'ha avançat 11 dies de mitjana. Apareixen abans, són més actives i allarguen el seu període de vol (Stefanescu *et al.*, 2003). 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. A molts indrets el nombre de gelades anuals ha disminuït a

un terç des de fa cinquanta anys fins ara, 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 (Menzel *et al.*, 2006).

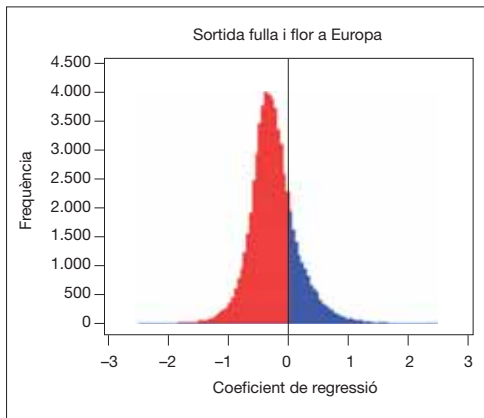


Figura 2. Freqüència de casos amb fenologia avançada i endarrerida a Europa des del 1970 al 2000. Les tendències temporals es mostren com a coeficients de regressió lineal en dies per any (Menzel *et al.*, 2006).

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. Com que la natura no és homogènia, les respostes a l'escalfament són diferents en funció de l'espècie (i àdhuc dels individus). Aquestes respostes diferents al canvi climàtic produeixen importants desincronitzacions en les interaccions entre les espècies, per exemple entre les plantes i els seus pol·linitzadors, entre les plantes i els seus herbívors, o entre els ocells i el seu aliment, com es mostra en la figura 3 (Grossman, 2004). Treballs recents han mostrat de forma generalitzada asincronies per a diferents nivells tròfics, tant en ecosistemes terrestres com aquàtics (per exemple, Thackeray *et al.*, 2010), la qual cosa du a una alteració de

l'estructura de les comunitats. Un exemple paradigmàtic de les desincronitzacions entre nivells tròfics el tenim en allò que 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 insectes, i, per tant, l'avançament en la disponibilitat de menjar per a les aus, es podria esperar una arribada més primerenca de les aus migratòries. I, malgrat tot, l'arribada d'algunes aus tan comunes i populars com el rossinyol, l'orenet, el cucut o la guatlla sembla que s'està endarrerint —almenys a algunes localitats de Catalunya— de mitjana dues setmanes respecte de fa trenta anys. L'endarreriment segurament ve determinat pel canvi climàtic al lloc des d'on parteixen, les regions subsaharianes, o a les regions que travessen en la seva ruta migratòria. Així, la sequera i la desforestació del Sahel, i la consegüent manca d'aliment, poden haver dificultat la preparació del seu viatge i haver afavorit 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'hi 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 els darrers anys en pot ser una conseqüència. D'altra banda, hi ha espècies abans migratòries que aprofiten que el nostre

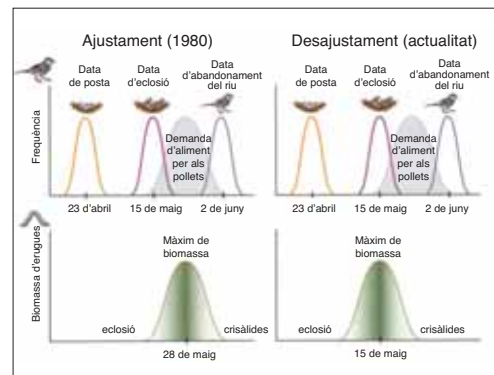


Figura 3. Asincronia en l'eclosió dels ous de la mallerenga carbonera i la biomassa d'erugues de les quals s'alimenten (Grossman, 2004, «Pérdida de sincronia en los ecosistemas»). Investigación y Ciencia; autors de la figura: Marcel E. Visser, Christiaan Both i Marcel M. Lambrechts; Nadia Strasser.

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. Atesa la gran importància dels registres fenològics a l'hora de detectar les manifestacions del canvi climàtic, proposem l'inici sistemàtic de registres fenològics, especialment als parcs naturals, als espais naturals protegits, als jardins botànics i a les zones agrícoles. La comparació d'aquests registres i d'altres d'impacte dels canvis climàtics permetria, a més, conèixer millor les diferències entre les respostes dels ecosistemes «naturals» i dels «antropitzats».

Quan ens mirem els canvis fenològics a escala global, trobem alteracions tan importants com ara l'augment de l'activitat biològica del nostre planeta en els últims trenta anys a causa en part a aquest allargament fenològic del període productiu. Ho mostren, tant les imatges dels satèl·lits d'observació de la Terra, com les dades de concentració atmosfèrica de CO_2 (Peñuelas i Filella, 2001a; IPCC, 2007a). Per al seguiment de les masses vegetals des de l'espai s'empren un índex de vegetació normalitzat, l'NDVI. Aquest índex 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 biomassa verda hi ha. Doncs bé, aquest NDVI corrobora les dades fenològiques dels observadors terrestres i mostra com en els darrers vint 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_2 i de les deposicions de nitrogen, també pot ser causat en part per aquest augment de temperatura i aquest allargament de l'estació de creixement (activitat vegetativa) almenys a regions on no hi ha el dèficit hídric que caracteritza moltes zones de Catalunya. De fet, les sequeres generalitzades dels darrers 15-20 anys als hemisferis Nord i Sud han tingut com a conseqüència que tot i l'avançament del període de creixement, hagi disminuït la capacitat d'embornal de la vegetació (Zhao i Running, 2010).

Tot això també ve corroborat per les dades de concentració atmosfèrica de CO_2 , que ens mostren canvis de l'oscil·lació estacional de CO_2 en les últimes dècades arran de l'avançada dismi-

nució primaveral de la concentració de CO_2 . Aquest allargament de l'estació de creixement té un paper molt important en la fixació global del carboni, la quantitat de CO_2 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, en el balanç de carboni, i en el propi clima (Peñuelas *et. al.*, 2009).

10.3. Adaptabilitat genètica de les espècies. Significativa però impotent davant el canvi actual

Fins a quin punt s'adapten les plantes i els animals a aquests canvis climàtics ràpids? Doncs sembla que ho intenten amb canvis fenotípics, com ara els esmentats canvis fenològics, i també amb canvis genotípics en la seva descendència, és a dir que sembla que la pressió selectiva ha fet molt més efecte del que havíem pensat fins fa poc. Fins i tot plantes de vida llarga com el faig han mostrat certa capacitat de canviar la freqüència genètica en paral·lel a l'escalfament de les darreres dècades (figura 4). Així ho hem comprovat al Montseny (Jump *et al.*, 2006a). I ho hem comprovat també en plantes de vida més curta com la *Fumana thymifolia* a les brolles del Garraf, on les plantes crescudes en condicions experimentals de sequera (disminució de l'aigua del sòl en un 19%) presenten diferents freqüències de diversos gens ja només després de 6 anys de tractament de sequera relativament suau (Jump *et al.*, 2008). Aquests resultats demostren tant obser-

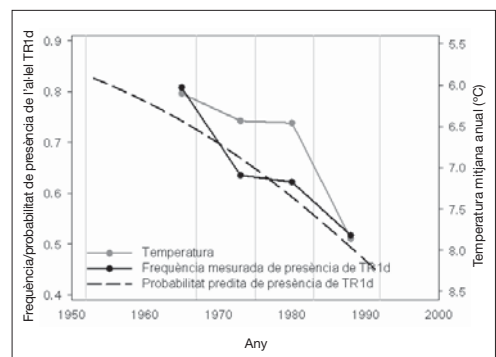


Figura 4. La freqüència de l'al·lel TR1d als faigs del Montseny ha disminuït les darreres dècades en paral·lel amb l'augment de temperatura (Jump *et al.*, 2006a). Noteu que l'eix de la temperatura està invertit per facilitar la comparació amb el canvi de freqüència al·lelica.

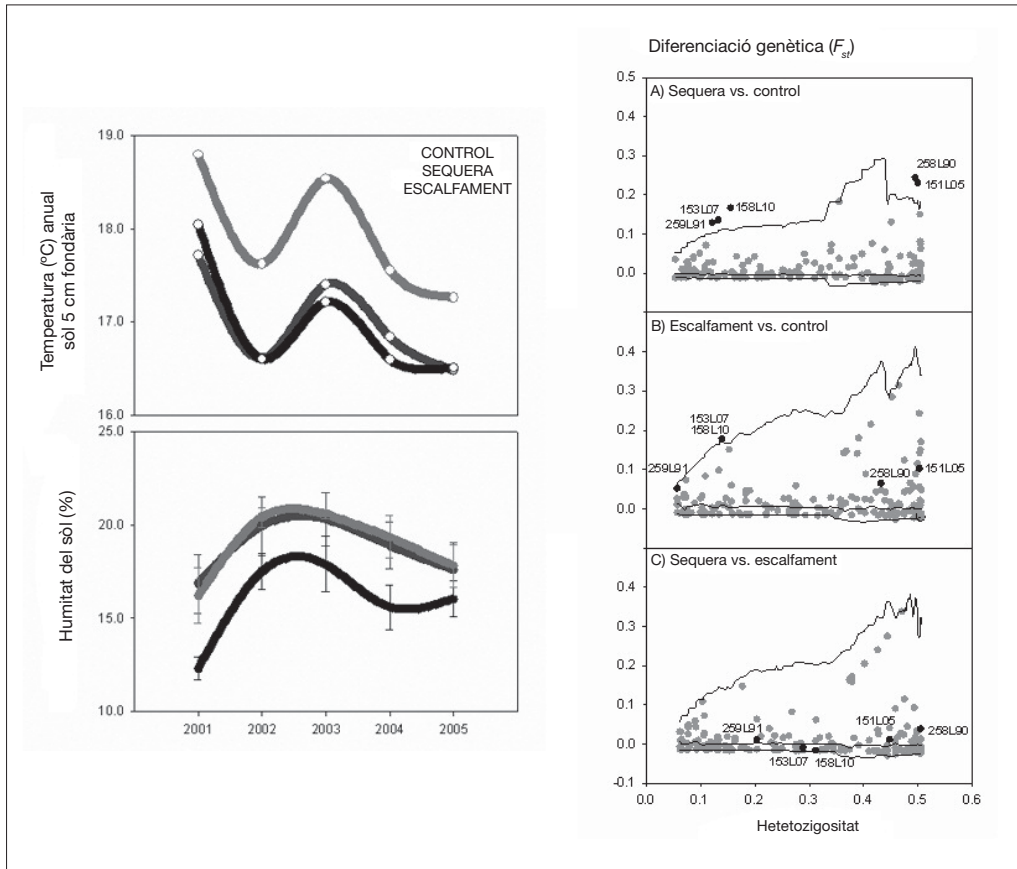


Figura 5. La freqüència de diversos al·lels de *Fumana thymifolia* varia significativament a les població de plantes crescudes amb sequera (19% menys d'aigua al sòl) en els experiments del Garraf. Els al·lels no neutrals detectats en la comparació entre els individus crescuts amb sequera i els crescuts en condicions control estan marcats en negre.

Font: Jump et al., 2008

vacionalment com experimental que hi ha resposta genotípica a les poblacions naturals.

Però tot i això, els canvis genètics no semblen anar a prou velocitat com per poder adaptar les plantes al ràpid canvi climàtic de les darreres dècades. Per això, els mateixos faigs de les zones baixes del Montseny creixen cada vegada menys (50% menys que no pas fa 50 anys) (figura 5) (Jump et al., 2006b), i en general tots els boscos catalans (i els espanyols també) mostren una progressiva defoliació en els darrers anys paral·lelament a la progressiva aridificació i a la seqüència d'anys desfavorables que estem vivint (figura 6) (Carnicer et al., 2010). Per això, l'exclusió parcial de l'aigua de pluja i de l'escoriment superficial, que generen una disminució d'un 15% de

la humitat del sòl en un altre experiment dels deu darrers anys, aquest dut a terme als boscos de Prades, ha reduït el creixement diametral dels troncs un 22%, encara que no totes les espècies han resultat afectades de la mateixa manera. Algunes hi són força sensibles, com ara *Arbutus unedo* i *Quercus ilex*, que mostren, respectivament, una reducció del creixement diametral del 63% i 41%, respectivament, en condicions de sequera, mentre que d'altres, com *Phillyrea latifolia*, no presenten cap disminució apreciable en el seu creixement diametral (figura 8) (Ogaya i Peñuelas, 2007). La mortalitat dels individus mostra un patró semblant, ja que *Arbutus unedo* i *Quercus ilex* mostren una mortalitat més elevada que *Phillyrea latifolia* (Ogaya i Peñuelas, 2007).

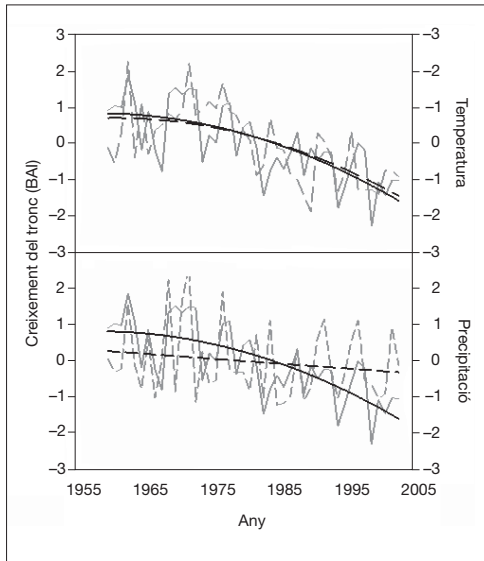


Figura 6. Disminució del creixement del tronc dels faigs a baixa altitud al Montseny en paral·lel a l'augment de temperatures els darrers 50 anys. Les línies trencades mostren les pautes temporals de les variables climàtiques estandarditzades, la línia contínua mostra el creixement del tronc (increment d'àrea basal) estandarditzat. Noteu que l'eix de la temperatura està invertit per facilitar la comparació amb el creixement diametral (Jump *et al.*, 2006b).

Aquesta tendència es pot veure incrementada si l'augment d'aridesa es manifesta en episodis de sequera greu, els quals han ocasionat en els darrers anys defoliacions importants en les masses forestals i mortalitats significatives en algunes espècies, com *Pinus sylvestris* o fins i tot *Quercus ilex* (Peñuelas *et al.*, 2001b). Aquests efectes estan mediatitzats per factors que incrementen la vulnerabilitat, com són la menor disponibilitat hídrica en alguns rodals, la seva estructura forestal (densitat d'arbres, àrea basal) o les interaccions amb paràsits (insectes) o hemiparàsits (el vesc, sobretot en coníferes) (Carnicer *et al.*, 2010). El futur d'aquests boscos ve determinat per les espècies que es regeneren després d'aquests episodis, i en alguns casos la manca de plàntules joves de les espècies dominants afectades (com el pi roig) va acompanyada pel reclutament de plàntules d'altres espècies (com les de *Quercus*). Per tant, es donen una sèrie d'elements que suggereixen la possibilitat d'unes transformacions ràpides d'algunes comunitats forestals associades a aquests esdeveniments climàtics

extremes. A més, malgrat que en molts casos la coberta forestal es recupera després d'aquests esdeveniments, el consum dels recursos emmagatzemats (com el midó) manté un important grau de vulnerabilitat de les poblacions si els episodis de sequera esdevenen més freqüents (Lloret *et al.*, 2004a). En l'àmbit de la comunitat, la diversitat d'espècies llenyoses pot tenir un paper significatiu en l'impacte d'aquestes sequeres en la coberta vegetal, particularment als boscos de caire més mediterrani (com pinedes de *Pinus halepensis*), on un major nombre d'espècies incrementaria les probabilitats que alguna resisteixi l'episodi extrem (Lloret *et al.*, 2007).

10.4. Migracions i extincions

Tan aviat com les condicions d'un hàbitat proper esdevenen adients per a una espècie dins de la distància de dispersió de la població més propera, hi pot haver migració mitjançant la colonització del nou hàbitat disponible. En el procés de migració, alguns individus tenen èxit i d'altres no, amb la qual cosa la selecció actua novament d'una manera no aleatòria, tot portant a un augment de la salut de la població establerta respecte de la població inicial migradora. A Catalunya, i en general a tot el planeta, ja s'han constatat 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 gaires evidències com a resposta a l'escalfament actual (Jump *et al.*, 2009). Cal recordar que aquests processos sovint demanen un temps superior a pocs anys o dècades. De totes maneres, recentment, s'ha comparat la distribució de la vegetació actual del Montseny amb la de principi i meitat del segle xx i s'ha pogut constatar que els ecosistemes mediterranis guanyen terreny als temperats i els temperats als subalpins (figura 9) (Peñuelas i Boada, 2003; Peñuelas *et al.*, 2007a). 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), estan a la base d'aquests canvis, en un exemple paradigmàtic de com interactuen els diferents components del canvi global.

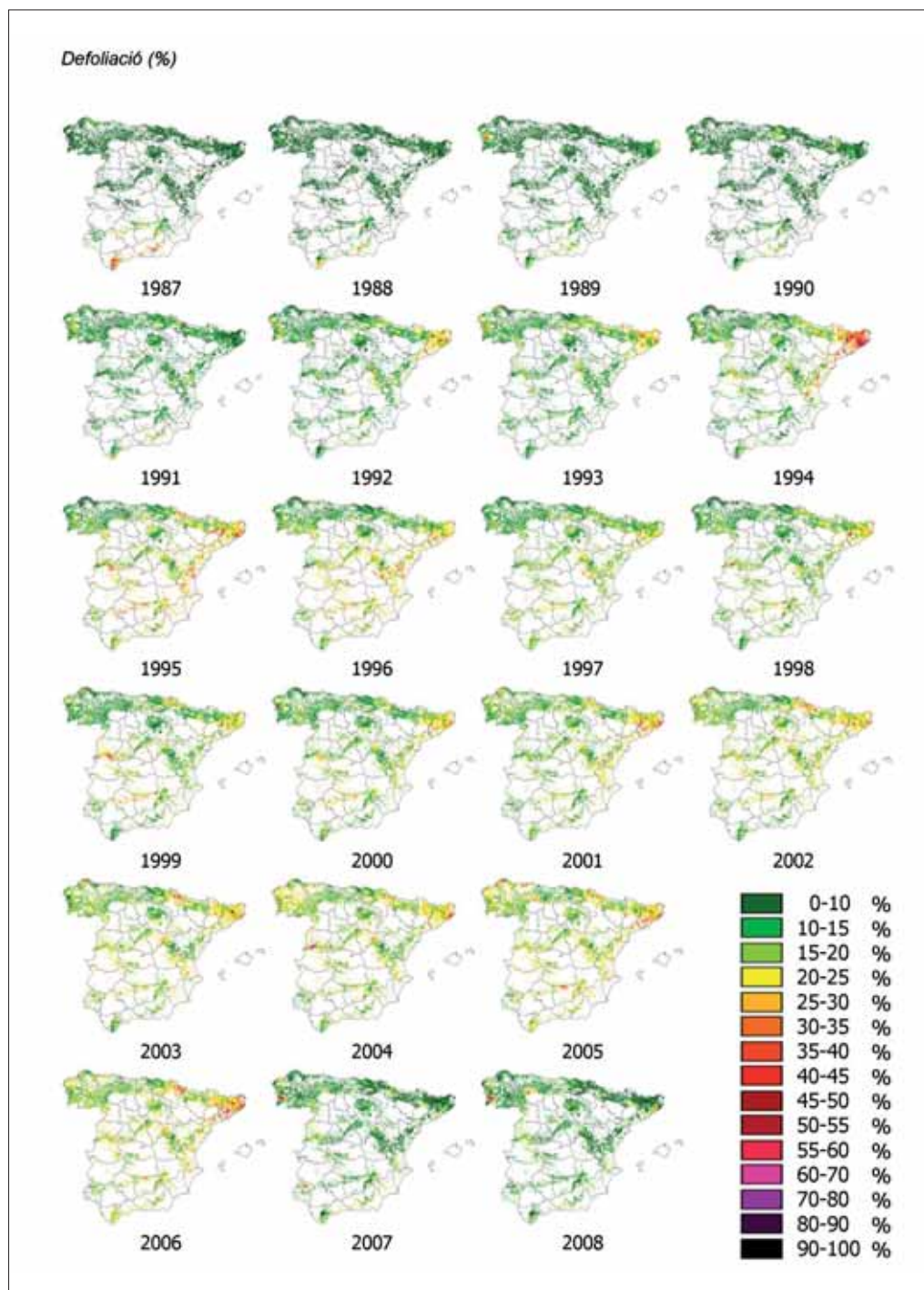


Figura 7a. Defoliació progressiva del conjunt (7a) i de la major part d'espècies forestals espanyoles (7b) durant les tres darreres dècades en paral·lel amb els períodes de sequera.
Font: De Carnicer et al., 2010.

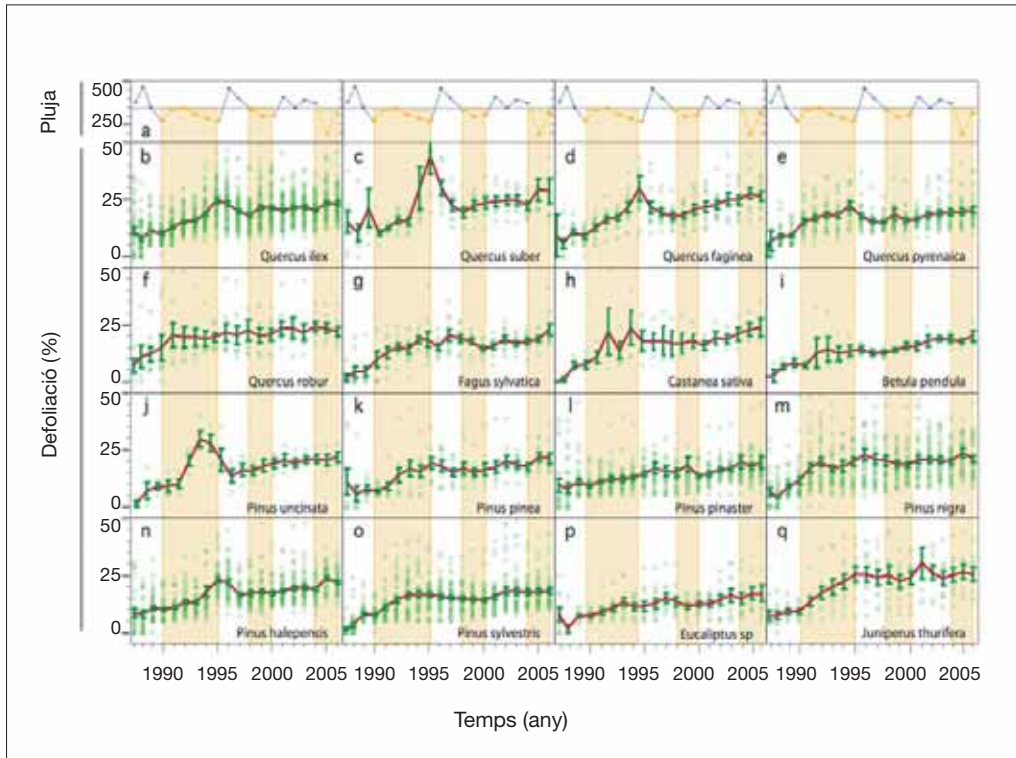


Figura 7b.

Els estudis paleoecològics suggereixen que moltes espècies vegetals poden migrar amb suficient rapidesa com per adaptar-se al canvi climàtic, però solament si existeixen ecosistemes contigus no pertorbats, la qual cosa 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 centrals de Catalunya. 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 amb una exigència més gran d'àrea poden extingir-se. Es parla de «l'ascensor cap a l'extinció».

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 llindars específics de cada espècie pel que fa a la tempera-

tura i la disponibilitat d'aigua. I tot això no només fa referència a les plantes, els animals no hi són pas menys sensibles. Al contrari, hi responen més ràpidament, atesa la seva mobilitat. S'han documentat força desplaçaments d'espècies animals relacionats amb el clima, per exemple desplaçaments latitudinals cap al Nord de, per exemple, odonats o de papallones com l'*Heodes tityrus* (Parmesan *et al.*, 1999).

10.5. Canvis en diversitat, biogeoquímica i funcionament

Com que no totes les espècies resulten igualment afectades pel canvi climàtic, hi pot haver un canvi en la composició específica de les comunitats dels nostres ecosistemes. De fet en un experiment dut a terme durant els darrers 10 anys a les brolles del Garraf, s'ha vist que la sequera i l'escalfament fan disminuir la seva riquesa d'espècies no tan sols de plantes (figura 10) (Prieto *et al.*, 2009a) i d'animals, sinó també

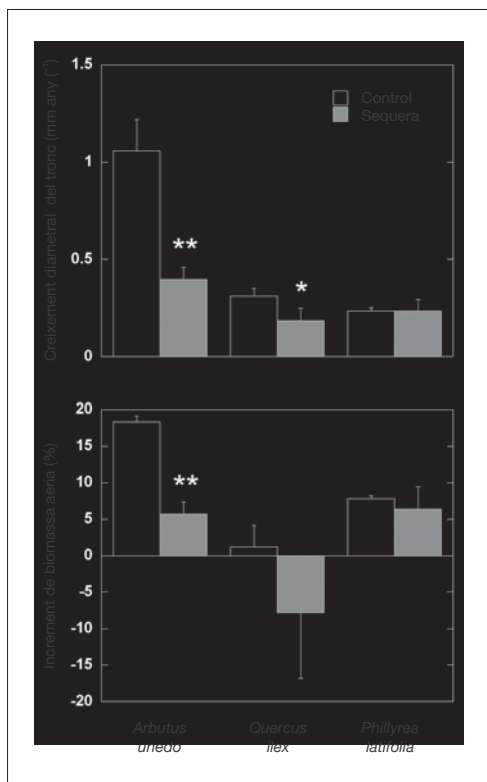


Figura 8. Diferent resposta a la sequera (disminució del 15% de la humitat del sòl) en les tres espècies dominants de l'alzinar de Prades.

Font: D'Ogaya i Peñuelas, 2007.

de bacteris i fongs (figura 11) (Curiel *et al.*, 2010). Els 10 anys de tractament de sequera han exercit un efecte negatiu sobre la diversitat bacteriana tant a l'alzinar de Prades com a les brolles del Garraf. Els canvis han estat menys significatius en la diversitat de fongs, la qual cosa indica que la comunitat fúngica podria ser més resistent als canvis induïts pel clima. Aquesta disminució de la diversitat bacteriana i fúngica s'associa a una disminució en la descomposició de la matèria orgànica i també de la seva capacitat de resposta a la temperatura (Curiel *et al.*, 2010).

De fet, tots aquests canvis estructurals i funcionals resulten en grans canvis biogeoquímics. Per exemple, la sequera experimental esmentada del 15% de disminució d'aigua al sòl està fent minvar el fòsfor acumulat als teixits vegetals als



Figura 9. Desplaçament altitudinal de la fageda del Montseny a la carena Turó de l'Home-Les Agudes durant el darrer segle. La fageda ha esdevingut més densa a les parts altes i s'ha desplaçat per sobre la línia d'arbres amb l'establiment d'individus nous i vigorosos. 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.

Font: Peñuelas *et al.*, 2007a.

bosc de Prades (figura 12) (Sardans *et al.*, 2007a). També disminueix l'activitat enzimàtica del sòl (Sardans i Peñuelas, 2005, 2008a), tot produint un augment de les formes no disponibles per a les plantes de fòsfor (Sardans i Peñuelas, 2004), i canvis en les proporcions de carboni, nitrogen i fòsfor en la biomassa aèria (Sardans i Peñuelas, 2007; Sardans *et al.*, 2008b). D'altra banda, la disminució del 19% de la humitat del sòl a les brolles del Garraf fa disminuir les emissions de gasos com ara el CO₂ o el N₂O

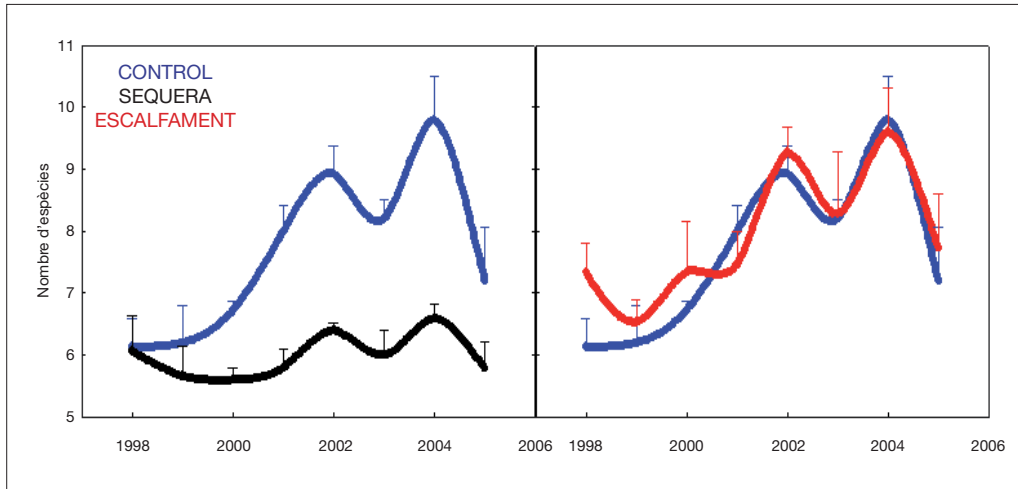


Figura 10. Menor nombre d'espècies en parcel·les amb sequera (19% menys d'aigua al sòl) que en parcel·les control i parcel·les amb escalfament (1 °C més que a les de control) a les brolles del Garraf, tot mostrant un alentiment en el procés de successió secundària post-incendi de brolla a pineda causat per la sequera projectada a les nostres contrades per a les properes dècades.

Font: De Prieto et al., 2009.

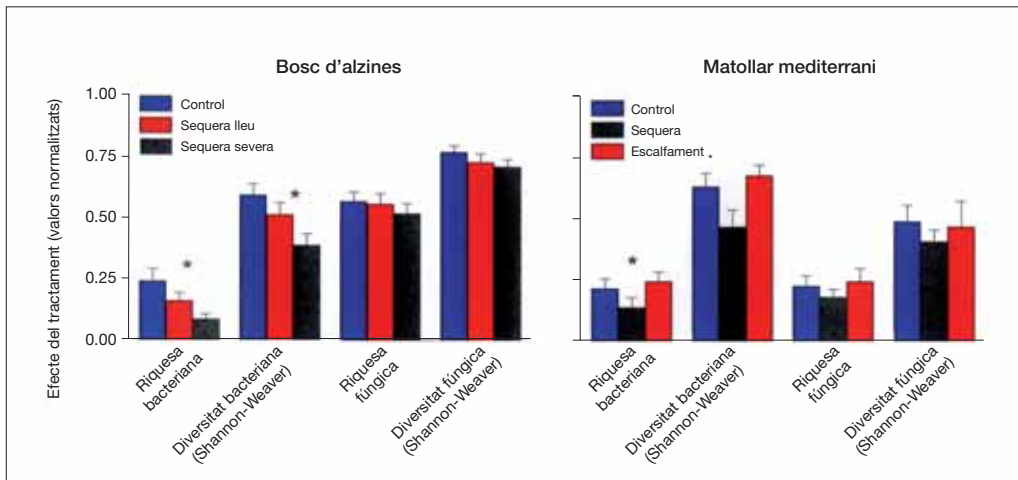


Fig. 11. Efectes de la sequera (19% menys d'aigua al sòl del matollar i 10-20% menys d'aigua al sòl del bosc) i l'escalfament (1°C més que a control) sobre la diversitat bacteriana i fúngica dels sòls mediterranis.

Font: De Curiel et al., 2010.

(figura 13), i semblantment al que s'ha observat a Prades, produeix una disminució de l'activitat enzimàtica del sòl (Sardans et al., 2006, 2008c) i de les arrels (Sardans et al., 2007b), tot disminuint també el fòsfor acumulat als teixits d'algunes espècies (Sardans et al., 2008d) i canviant les pro-

porcions de carboni, nitrogen i fòsfor a la biomassa aèria (Sardans et al., 2008e). Aquests canvis estequiomètrics tenen una influència molt significativa sobre el funcionament dels ecosistemes i fins i tot en les mides dels organismes dels diversos nivells tròfics (Peñuelas i Sardans, 2009).

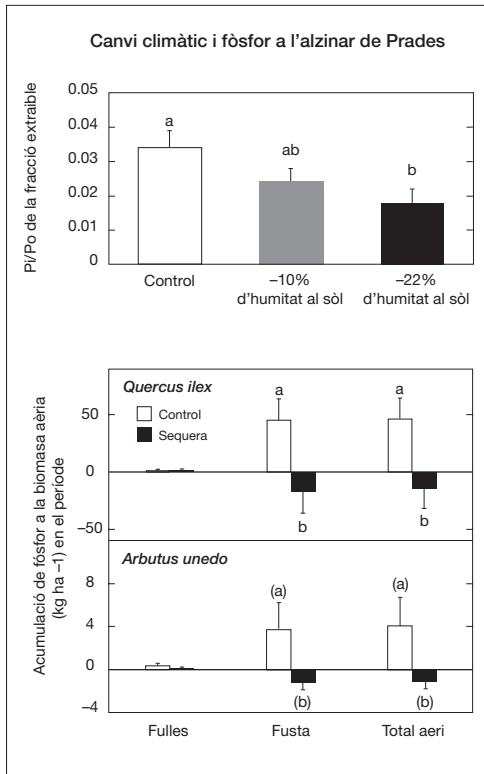


Fig. 12. Disminució de la disponibilitat de fòsfor soluble al sòl i disminució de l'acumul de P a la biomassa vegetal d'un bosc mediterrani (Prades) en resposta a una sequera experimental (15% disminució de l'aigua al sòl).

Font: De Sardans i Peñuelas, 2007.

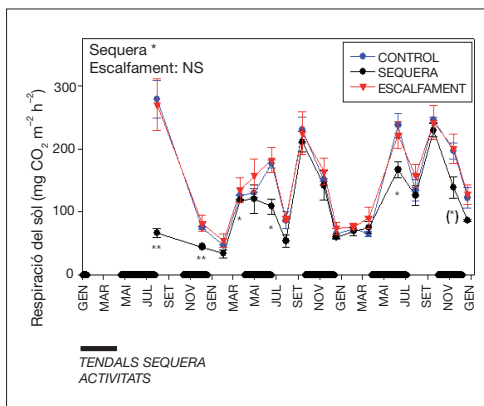


Fig. 13 Canvis en la respiració del sòl en resposta a la sequera en parcel·les de brolles mediterrànies del Garraf sotmeses a 1°C d'escalfament o a una disminució de la humitat del sòl del 19%.

Font: De Estiarte et al., 2010.

10.6. Altres canvis observats als nostres ecosistemes en relació amb el canvi climàtic

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, és clar, també als canvis en usos del sòl, demogràfics i econòmics. Els impactes i les vulnerabilitats són diferents en ambients com la muntanya o les planes litorals, per causes específiques com la innivació o la pujada del nivell del mar. A més, Catalunya té diversos tipus de clima, fet que suposa regions on els impactes i les vulnerabilitats seran diferents.

El canvi climàtic augmenta l'estress 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 (90% al bosc de Prades, per exemple). A més 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.

Més sequeres greus. 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/o secs, en tenim exemples recents en els calorosos i secs 1986, 1994, 2003 i 2005. Cada un d'aquests episodis va afectar profundament la vegetació mediterrània. Només cal observar els mapes de defoliació de la figura 7 per adonar-se'n. Per exemple, el que hem estudiat més a bastament, el del 1994, va danyar greument molts boscos i matollars de la península ibèrica (80% de les 190 localitats peninsulars estudiades presentaven espècies danyades) (Peñuelas et al., 2001a, Carnicer et al., 2010). Les alzines, per exemple, es van assecar en moltes localitats de Catalunya. Estudis isotòpics amb ¹³C i ¹⁵N (Peñuelas et al., 2000) 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 distinta gravetat dels efectes sobre els boscos del país va venir donada, entre altres factors, per: 1) l'orientació 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 aladerns, que creixen menys, però són més resistents a l'embolisme, 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) (Peñuelas *et al.*, 2000, Carnicer *et al.*, 2010).

El grau d'afectació també fou diferent depenent del tipus funcional i de la història evolutiva de les distintes espècies. Els gèneres mediterranis, *Lavandula*, *Erica*, *Genista*, *Cistus* i *Rosmarinus*, majoritàriament 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 no els gèneres evolucionats amb anterioritat: *Pistacia*, *Olea*, *Juniperus*, *Pinus* i *Quercus*, majoritàriament arbres (Peñuelas *et al.*, 2001b). Tot i això, els gèneres mediterranis es recuperaren molt millor després d'uns anys de més disponibilitat hídrica. Els gèneres mediterranis postpliocè semblen més adaptats per respondre a un ambient no fàcilment previsible, amb una gran variabilitat estacional i interanual i subjecta a perturbacions freqüents. De fet, això té relació amb la fondària de les arrels. Si els eixuts afecten les reserves profundes, els arbres no es recuperen, perquè la seva estratègia passa per tenir aigua tot l'any, mentre que les altres espècies ja estan adaptades a passar èpoques sense aigua. Entendre aquestes respostes és important per preveure la futura composició de les comunitats si continua 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 CO₂, i els canvis en els usos del sòl, com ara l'abandonament de terres de cultiu seguit d'un procés d'aforestació i acumulació de combustible, augmenten la freqüència i la 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 focs tenen un origen natural i la immensa majoria d'ignicions són provocades per les activitats humanes, sigui per negligència, accident o intencionadament. Els incendis, que han augmentat al llarg del segle xx (Piñol *et al.*, 1998), ara ja constitueixen una de les perturbacions més importants en els ecosistemes mediterranis. A més, les noves condicions climàtiques podrien incrementar el risc climàtic d'incendi en àrees on fins ara aquest risc és relativament reduït (per exemple zones de muntanya dels Pirineus) i on la vegetació no presenta una capacitat de regenerar-se tan efectiva com en comunitats típicament mediterrànies (Lloret *et al.*, 2005). A més, d'una manera general podem dir que el previsible increment de l'aridesa limitaria la recuperació de la vegetació després dels incendis, la qual cosa deixaria l'ecosistema més vulnerable a l'erosió, particularment si el règim de precipitacions esdevé més torrencial. De fet, l'augment de perturbacions per foc pot ser un factor de modificació del paisatge més fort, efectiu i ràpid que no el mateix canvi climàtic, especialment perquè l'increment de la freqüència dels incendis dificulta la regeneració. La vegetació es regenera bé després d'un foc, però si hi ha un segon foc ja ho fa molt pitjor (Díaz-Delgado *et al.*, 2002).

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 (COVB). Aquestes emissions biogèniques de COV afecten la química atmosfèrica, no solament pel que fa al cicle del carboni (emissions globals d'unes 1.500 Tg C any⁻¹) o la formació d'aerosols, sinó pel seu paper en l'equilibri oxidatiu de l'aire (nivells d'OH, NO_x, O₃,...) (Peñuelas i Llusà, 2003; Peñuelas i Staudt, 2010). Les emissions resulten de la difusió dels COVB 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 la gran reactivitat dels COVB. Per tant, les emissions són controlades pels

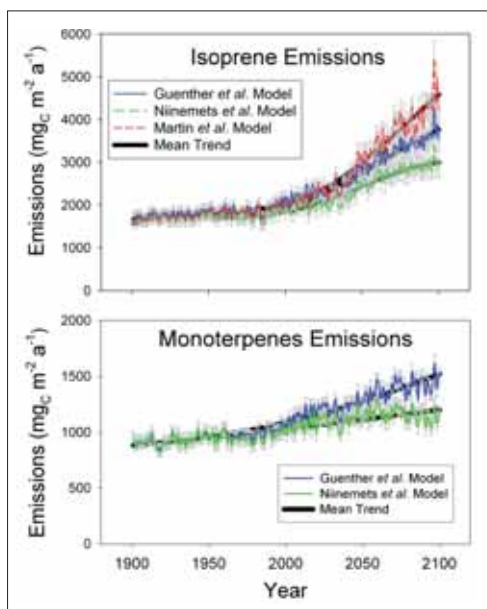


Fig. 14. Estimació de les emissions d'isoprè i monoterpens a Europa des del 1900 i fins el 2100 en funció de les projeccions climàtiques basades en l'escenari climàtic A2 (IPCC 2007a)
Font: De Keenan et al., 2009.

factores 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 COVB en activar-ne la síntesi enzimàtica i la pressió de vapor i en disminuir la resistència a l'emissió. D'altra banda, la sequera extrema 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 algun tan important ambientalment com és l'emissió biogènica de COV. De moment, però, tot indica que les emissions han augmentat amb l'escalfament (Peñuelas, 2008; Peñuelas i Staudt, 2010) i que ho continuaran fent les properes dècades (Keenan et al., 2009) (figura 14). I aquest augment ha de tenir efectes molt importants, tant sobre el funcionament dels organismes i dels ecosistemes com sobre la química atmosfèrica i el clima (figura 15).

Vinculada amb el canvi climàtic, una de les funcions més importants que semblen tenir alguns d'aquests COVB, com ara els terpens, en la

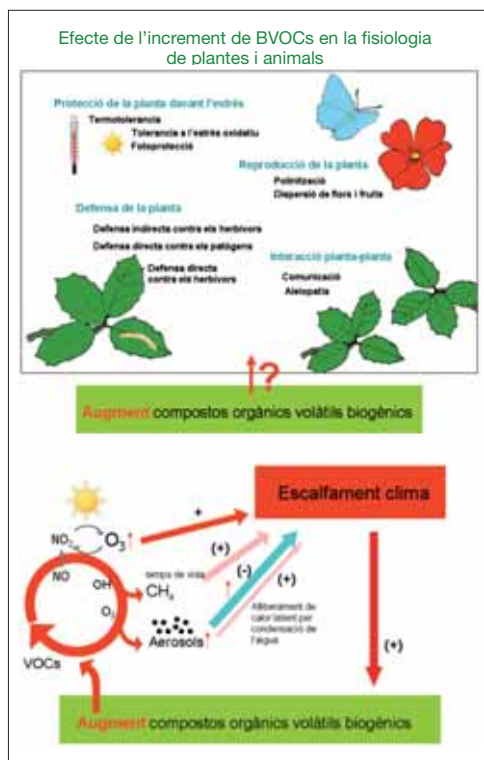


Fig. 15. Efectes ecològics i ambientals de l'augment d'emissions biogèniques de COVs.

Font: De Peñuelas i Staudt, 2010.

fisiologia vegetal, és actuar com a elements termoprotectors. Les plantes emprarien aquests compostos com a estabilitzadors de les membranes cel·lulars i, més concretament, de les membranes íntimament relacionades amb els fotosistemes, i també com a desactivadors dels radicals oxidats per protegir-se de les altes temperatures de l'estiu (Peñuelas i Llusà, 2004). Però a més a més de «refrigerar» la planta, aquestes emissions de COVB podrien retroalimentar negativament l'escalfament del mateix clima atmosfèric, en actuar com a aerosols que fan disminuir la irradiància. Caldrà estudiar-ho, perquè també podrien retroalimentar positivament l'escalfament a través del seu efecte d'hivernacle directe, en absorbir la radiació infraroja, i indirecte, en allargar la vida mitjana del metà i altres gasos hivernacle (Peñuelas i Llusà, 2003). Som davant d'un exemple més de l'important paper que tenen els ecosistemes sobre el mateix clima i el possible

canvi climàtic, a part del més conegut i important efecte sobre el balanç del CO₂ a l'atmosfera.

10.7. Efectes directes de l'augment de CO₂ sobre els ecosistemes

De fet, tots aquests factors ara comentats: disponibilitat d'aigua, temperatura, incendis, COVB i nutrients, interaccionen amb el factor generador del canvi climàtic, el mateix augment de CO₂ atmosfèric, el qual, a més a més, té efectes directes sobre els organismes, sobretot vegetals que l'usen com a substrat de la fotosíntesi, i ecosistemes (Peñuelas, 1993; Korner, 2006).

Aquests efectes s'han estudiat en plantes crecudes a diferents concentracions de CO₂ en diversos sistemes experimentals, que van des de cambres controlades fins a sistemes de fumigació a l'aire lliure, tot passant per hivernacles i fonts naturals de CO₂. La majoria d'espècies estudiades amb concentracions creixents de CO₂ han mostrat taxes fotosintètiques més altes, més productivitat i menors concentracions tissulars de nitrogen, si més no en els estudis duts a terme a curt termini i amb plantes joves (Peñuelas *et al.*, 1995; Lopez-Claramunt *et al.*, 1997). També redueixen la transpiració (menor conductància estomàtica i de vegades menor nombre d'estomes) 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 CO₂, però, depèn de la interacció amb altres factors ambientals: temperatura, radiació, sequera, disponibilitat de nutrients o presència de contaminants atmosfèrics (Peñuelas, 1993; Korner, 2006). Per exemple, els efectes hídrics semblen més accentuats a les nostres condicions de sequera mediterrània que no pas a les pròpies del centre i el nord d'Europa, o els efectes de l'ozó vénen moderats pel tancament estomàtic produït pel CO₂. Les respostes al CO₂ són diferents depenent de les espècies (Peñuelas *et al.*, 2001b), i àdhuc dels genotips (Castells *et al.*, 2002), la qual cosa podria dur també a canvis quant a comunitat, a mesura que aquest gas augmenta.

De totes maneres, no queda clar què 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 con-

trolades, amb plantes aïllades, joves i a curt termini. Per exemple, aquestes respostes podrien amortir-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 un alt CO₂ (Peñuelas *et al.*, 1997). Tampoc no hi ha una resposta única entre les espècies pel que fa a la química foliar (Peñuelas *et al.*, 2001b). Tot i això, d'altra banda, la vegetació actual sembla que presenta més eficiència en l'ús de l'aigua i menys concentració de nitrogen i altres elements diferents del carboni respecte de la vegetació de fa uns decennis, tal com han posat de manifest els estudis morfològics, químics i isotòpics dels espècimens d'herbari (Peñuelas i Matamala, 1990; Peñuelas i Azcon-Bieto, 1992) i dels anells dels arbres (Peñuelas *et al.*, 2008) de Catalunya. Aquests estudis isotòpics indiquen també que els ecosistemes mediterranis podrien respondre a la major demanda de N tot disminuint-ne les pèrdues, incrementant-ne la fixació i aprofitant la creixent fixació i deposició antropogènica (Peñuelas i Filella, 2001b).

10.8. 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 CO₂, 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 actualment són en una part important resultat de l'activitat humana. Els diversos usos humans han produït un mosaic d'ecosistemes amb diferents graus de maduresa, i han format paisatges heterogenis que garanteixen el manteniment de la diversitat d'aquestes regions mediterrànies. La majoria d'aquests ecosistemes mostren una gran resiliència a les pertorbacions i usualment es recuperen per un procés d'autosuccessió.

La disponibilitat hídrica és el factor crític en l'efecte del canvi climàtic sobre aquests ecosiste-

mes 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 (Sabaté *et al.*, 2002), fenòmens associats a l'increment de la temperatura, comportaran un augment de l'aigua transpirada que s'afegeix a una major evaporació potencial resultant de l'augment de la temperatura. En aquells llocs on el bosc disposa d'aigua suficient per compensar aquesta demanda hídrica més elevada, cal preveure que hi augmenti la producció forestal (Peñuelas *et al.*, 2009). Ara bé, als llocs amb dèficit hídric, que representen la majoria dels ecosistemes terrestres de Catalunya, s'hi 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.

Al nostre país es duen a terme estudis experimentals en els quals es manipula experimentalment la temperatura i la disponibilitat d'aigua de l'ecosistema per estudiar els canvis funcionals i estructurals que resultarien en les properes dècades 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, els boscos i els matollars mediterranis, que són els que més abunden al nostre país, també són, segurament per això mateix, els més estudiats pel que fa al canvi climàtic projectat per als propers anys.

10.8.1. Boscos

Com hem repetit, 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 fent un experiment a l'alzinar de la Solana dels Torners (serra de Prades) des de ja fa 11 anys, tal com s'ha esmentat més amunt. Es tracta d'un bosc d'uns sis metres d'alçada i una densitat mitjana de 16.617 peus ha⁻¹, 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 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 va afectar la dinàmica foliar (Sabaté i Gracia, 1994; Rodà *et al.*, 1999). El tractament de sequera actual ha reduït el creixement diametral dels troncs un 22%, però no totes les espècies són afectades per un igual. Algunes hi resulten bastant sensibles, com *Arbutus unedo* i *Quercus ilex*, que mostren reduccions en el seu creixement diametral al voltant del 50%, mentre que d'altres, com *Phillyrea latifolia*, no experimentarien cap disminució apreciable en el creixement diametral (figura 8). La mortalitat dels individus mostra un patró semblant, ja que *Arbutus unedo* i *Quercus ilex* presenten una mortalitat més elevada que no *Phillyrea latifolia*. En condicions de sequera, l'acumulació de biomassa total aèria del bosc ha minvat un 83% (Ogaya i Peñuelas, 2007).

Per tant, l'experiment posa de manifest que en condicions més àrides que les actuals, els boscos mediterranis poden veure minvar 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 en resultarien igualment afectades, a llarg termini hi podria haver un canvi en la composició específica del bosc, i resultar-ne més afavorides 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 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, al bosc estudiat, estratègies diferents 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 no 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 (Lloret *et al.*, 2004b). 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 excessivament exposades a la radiació, sobretot en els estadis inicials. Si disminueix molt la cobertura arbòria a causa del canvi climàtic, també pot ser que disminueixi la disponibilitat d'àrees on les plàntules es puguin instal·lar.

10.8.2. Matollars

També es duen a terme, com ja hem assenyalat, estudis de les respostes al canvi climàtic previst per a les properes dècades en l'altre gran grup d'ecosistemes terrestres, els matollars. Hi destaca el d'escalfament amb tècniques no intrusives que es du a terme al Garraf des de fa 11 anys. Abans s'havien usat diverses tècniques per manipular la temperatura de l'ecosistema, com radiadors d'infraroig, cables enterrats i hivernacles, però aquests mètodes impliquen pertorbacions no desitjades d'alguns paràmetres físics (llum, vent o humitat relativa) o fins i tot d'una part de l'ecosistema (sòl). Una tècnica menys intrusiva, «l'escalfament nocturn passiu», és el que s'ha emprat a les brolles del Parc Natural del Garraf, on 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 retinuda 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 (figura 5), però sense alterar altres variables ambientals. La sequera s'indueix amb la mateixa tecnologia però cobrint les parcel·les amb tendals de plàstic impermeable mentre duren les pluges (Beier *et al.*, 2004).

L'experiment de Garraf representa una de les localitats més seques 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 d'1 °C augmenta entre 0-24% la respiració del sòl, mentre que la minva del 19% de l'aigua al sòl la fa disminuir un 12-29%. D'altra banda, la descomposició de la virosta no es veu afectada a llarg termini, tot i que a curt termini la sequera en retarda la descomposició. Al llarg del gradient climàtic només s'observen taxes positives de mineralització del N 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.*, 2004). Així es comprova, 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 (Beier *et al.*, 2004; Emmet *et al.*, 2004; Peñuelas *et al.*, 2004b, 2007b). En el primer *Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya* vam mostrar un exemple de canvi funcional provocat pel canvi climàtic: els resultats d'estudis experimentals a matollars holandesos on s'observava que l'escalfament augmenta l'alliberament de nitrats als lixiviats del sòl. Aquí mostrem la disminució de l'emissió de CO₂ en resposta a la sequera (figura 13). Recordem que els processos biogeoquímics depenen de la temperatura i que entre aquests podem esmentar un altre que ara preocupa com a component important del canvi global arreu del món i a moltes comarques catalanes

particularment: la progressiva eutrofització, és a dir, l'enriquiment en nutrients, al nostre país sobretot nitrats, 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 aliens a aquest fenomen. L'escalfament augmenta la mineralització en les èpoques humides, i la sequera posterior, sobretot als estius, impedeix l'ús de nutrients en les plantes i facilita les pèrdues del sistema quan arriben les pluges. De fet, els resultats d'estudis experimentals en matollars mostren que l'escalfament augmenta l'alliberament de nitrats als llixiviats dels sòls rics en nitrats (Peñuelas *et al.*, 2005). Un altre exemple d'alteració biogeoquímica el tenim en l'estimulació de la descomposició per l'escalfament. La manca d'aigua, en canvi, l'alenteix. Convindrà estudiar el balanç de la interacció d'aquests dos factors sobre el cicle de la matèria i el funcionament dels nostres ecosistemes mediterranis.

Aquests estudis mostren que la magnitud de la resposta a l'escalfament i a la sequera figura a semblar 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. 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 (Peñuelas *et al.*, 2007b). La diferent direcció de la resposta a l'escalfament en funció de l'estació de l'any està relacionada amb l'efecte que el fred hivernal té sobre la fisiologia de les espècies mediterrànies. Per a la nostra sorpresa, 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, 2002). Per tot això, els efectes del canvi climàtic seran diferents a les diverses àrees climàtiques de Catalunya, amb efectes més importants de l'escalfament a les àrees fredes de muntanya limitades per l'energia, i amb efectes més importants de l'eixut a les àrees més càlides i àrides limitades per la disponibilitat d'aigua.

Els experiments de sequera i escalfament duts a terme al Garraf indiquen que la sequera pre-

vista per als propers anys fa disminuir el nombre i riquesa de plàntules (Lloret *et al.*, 2004c) i finalment la riquesa d'espècies (figura 10-11) (Peñuelas *et al.*, 2007b, Prieto *et al.*, 2009a, Curiel *et al.*, 2010). Aquesta disminució també es dona, però en proporcions molt menors, en el tractament d'escalfament. Aquest efecte es produeix principalment en 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 (Lloret *et al.*, 2004c). En el curs d'aquesta llarga dècada d'estudis al Garraf s'ha pogut comprovar que la sequera alenteix el procés de successió secundària des de matollar a bosc de pins després del darrer incendi del 1994 (figura 16) (Prieto *et al.*,

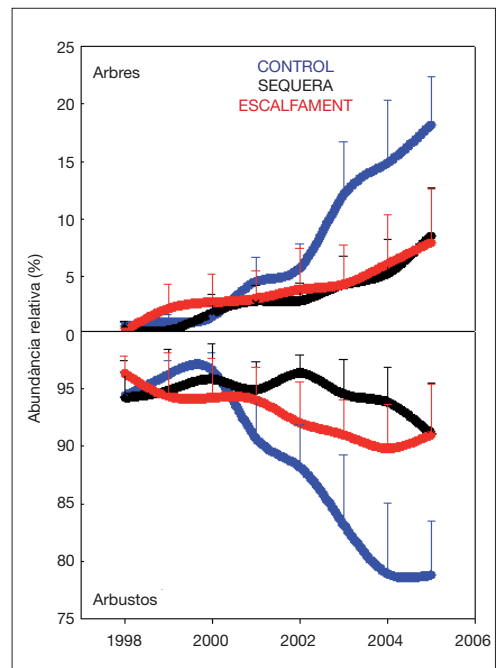


Fig. 16. Alentiment de la successió cap a bosc després d'un incendi en parcel·les de brolles mediterrànies del Garraf sotmeses a 1°C d'escalfament o a una disminució de la humitat del sòl de 19%.

Font: De Prieto *et al.*, 2009.

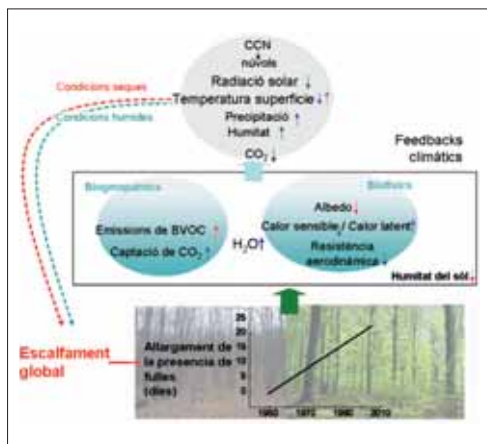


Fig. 17. El canvi de la natura adormida hivernal a la biològicament activa primavera, que es produeix cada vegada més aviat, té efectes biogeoquímics i biofísics sobre el propi clima, la intensitat dels quals s'ha d'escatir. encara.

Font: De Peñuelas et al., 2009.

2009a). 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 llindars 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 demanen un millor coneixement de les seves respostes als canvis climàtics i de bones prediccions regionalitzades del clima i dels usos del sòl. Això encara és lluny d'estar disponible a causa de les inherents variabilitat i impredictibilitat del sistema climàtic a nivell 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 no 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. Amb tot això

podem, però, començar a preveure que si les coses continuen com ara, en 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 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, i disminueix 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, perquè entre altres coses incrementen les proporcions de parts mortes i seques a les plantes (Prieto *et al.*, 2009b) 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'incendi i erosió són els més greus per als matollars mediterranis; el d'erosió especialment a les zones més àrides, les quals, d'altra banda, ja tenen poc per cremar.

Com més àrida és l'àrea considerada, més triga la vegetació a recuperar-se després de sequeres múltiples i prolongades i/o després d'un incendi, tant perquè triga molt a construir nova biomassa com perquè sovint hi té lloc una degradació del sòl, especialment si hi ha sobreexplotació durant els períodes secs o si hi ha recurrència de focs. I així es facilita l'erosió i, en casos extrems, es pot arribar a la desertització, un problema que ja és present 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 en 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 en camps generalment sobre substrats margosos molt sensibles a l'erosió, on la precipitació és minsa (350-600 mm, o menys) i principalment concentrada a la tardor, i on, atès l'ús agrícola previ, hi ha un menor nombre d'espècies rebrotadores. Aquests trets podrien agreujar els efectes directes de la sequera i portar l'ecosistema a condicions més àrides. L'atractiu d'aquests ecosistemes per a activitats recreatives com ara l'observació de la natura o la cacera podria disminuir, i la quantitat de carboni emmagatzemada i absorbida també. O sigui que els béns i serveis d'aquests ecosistemes poden ser alterats profundament.

Els models en l'exploració d'escenaris futurs. Menys aigua

La comprensió d'aquests processos en permet la modelització en funció de les condicions ambientals (Sabaté *et al.*, 2002). Si bé els resultats de les projeccions d'un model cap al futur depenen del mateix model (processos que descriu i segons com ho faci), també depenen dels escenaris de canvi climàtic amb què es confronti el model. És a dir, quan parlem de canvi climàtic, això pot significar moltes coses diferents dins un ventall d'escenaris generats amb criteris i assumpcions de partida distints. En general, podem dir que la majoria dels escenaris de canvi climàtic preveuen un increment de temperatura, i a la zona mediterrània, una disminució de la precipitació, al voltant d'un 5-15% (IPCC, 2007b). 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 i a les quals poden quedar exposades els nostres ecosistemes en un futur. Vegeu el capítol 5 d'aquest mateix volum (Gracia *et al.*, 2010) pàgines 135 a 182.

A Catalunya, si es genera un escenari de canvi climàtic assumint un increment gradual de la temperatura de 0,04 °C/any, un increment anual d'un 1% de CO₂ i una disminució de la pluja d'un -0,03% per any, la qual cosa equival a un escenari de tipus mitjà dels previstos de l'IPCC, s'obtenen canvis fenològics que com-

porten importants canvis fisiològics i, en particular, un increment de la transpiració anual. Com a conseqüència, la reserva hídrica als sòls forestals, que actualment és de 32 mm (l/m²) quan es considera la mitjana anual a cada punt, passa a ser de només 24 mm (Peñuelas *et al.*, 2005), la qual cosa representa una disminució del 25% de la reserva hídrica; fet particularment crític en un ambient amb dèficit hídric estival com és ara la regió mediterrània. Segons aquests resultats és fàcil comprendre que el paper de molts dels nostres boscos com a embornals de carboni es pot veure seriosament compromès durant les properes dècades. Novament, per a comentaris detallats sobre aquest tema, vegeu el capítol de Gracia *et al.* (2010) en aquest mateix volum suara esmentat.

10.9. Retroalimentacions biològiques sobre el canvi climàtic

Els organismes vius i els ecosistemes no són pas mers objectes passius del canvi climàtic. La seva estructura, la seva activitat i els canvis en ambdues generats pel canvi climàtic tenen, al seu torn, efectes significatius sobre el mateix canvi climàtic, tant per processos biogeoquímics com per processos biofísics. Entre els primers destaquen la fixació de carboni, és a dir, l'actuació com a embornals del CO₂ atmosfèric, i les emissions de compostos orgànics volàtils.

No sabem en quina intensitat els boscos i matollars catalans estan actuant com a captadors i acumuladors de carboni. En aquest balanç intervenen molts processos complexos, sotmesos a moltes interaccions. Tancar aquest balanç al detall no és una tasca fàcil, i menys quan intervenen en l'anàlisi escales de temps i espai diferents. També apareixen incerteses pel que fa a la comprensió de com afecten combinadament les condicions ambientals que interaccionen amb els processos implicats. S'ha avançat molt en aquest àmbit els darrers anys, però encara queda molta recerca per fer. Per exemple, encara no queda clar que l'augment de CO₂ atmosfèric es tradueixi en una major fixació de carboni per les plantes (Peñuelas *et al.*, 2010). Altres factors com la sequera determinen en alguns casos fins i tot minves en la fixació (Ogaya i Peñuelas, 2007). En tot cas, remetem al capítol corresponent

d'aquest volum per a una descripció detallada del tema (Gracia *et al.*, 2010). Pel que fa als COVB, es tracta de compostos orgànics que generen aerosols i nuclis de condensació de núvols, tenen efecte d'hivernacle, allarguen la vida mitjana del CH₄ en consumir radicals hidroxils durant la seva oxidació, alteren la calor de condensació, i amb tot plegat afecten el clima d'una manera i amb una intensitat que encara hem d'escatir, però potencialment ben significativa (Peñuelas i Llusà, 2003; Peñuelas i Staudt, 2010).

Pel que fa als efectes biofísics dels canvis en l'activitat i estructura de la vegetació produïts pel canvi climàtic, semblen especialment importants els que estan vinculats a la proporció entre calor latent i sensible i els relacionats amb l'albedo. Per exemple, els mateixos canvis fenològics en la presència de fulles que hem comentat abans poden tenir uns efectes que no teníem presents, com ara un major segrest de diòxid de carboni i un major consum d'aigua al sòl. A les zones humides, els boscos poden transpirar intensament i acumular molt de vapor i es poden formar núvols que refresquen l'ambient i incrementen les pluges. A les regions mediterrànies, en canvi, durant els períodes de sequera estival, i encara que els arbres rebin molta radiació, no disposen d'aigua suficient per transpirar i, així, refrescar l'ambient o generar aquesta mateixa nuvolositat. El resultat és que el clima d'aquestes àrees encara es fa més càlid. Aquest fenomen sembla haver tingut un paper significatiu en les recents onades de calor, com la del 2003 (Peñuelas *et al.*, 2009). A més, la disminució de l'aigua del sòl abans d'hora afecta, és clar, també el funcionament de la vegetació i, per tant, de l'ecosistema. El fenomen d'una prolongació del període d'activitat dels arbres de fulla caduca pot tenir, doncs, tant efectes de mitigació com d'amplificació del canvi climàtic. Que la balança es decanti cap a un punt o un altre dependrà de la disponibilitat d'aigua i de les característiques particulars de cada regió, i per això cal aprofundir aquesta línia d'investigació amb estudis més quantitius.

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

Des del punt de vista antròpic, els ecosistemes terrestres són sistemes proveïdors de múltiples

béns i serveis (Rodà *et al.*, 2003): productius, ambientals i socials. En la seva funció productiva, subministren béns naturals renovables, com aliments, medicines, productes de fusta i altres (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 protecció del sòl contra l'erosió, la regulació hidrològica, 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. D'entre aquestes funcions i serveis ecosistèmics, interessa especialment l'emmagatzematge 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 CO₂ atmosfèric, gairebé segur un dels orígens més importants del fenomen que aquí ens ocupa, el canvi climàtic.

En aquest capítol hem vist com els canvis atmosfèrics i climàtics afecten d'una manera important el funcionament i l'estructura dels nostres ecosistemes terrestres, tant pels seus efectes propis com per les seves interaccions. I és important recordar que tots els canvis biològics descrits en aquestes darreres dècades han tingut lloc amb un escalfament que es només un terç o menys del projectat per al segle que ara hem encetat. Està clar que tots aquests canvis tindran un impacte sobre molts d'aquests béns i serveis i, per tant, afectaran els sistemes socioeconòmics (Winnet, 1998; Millenium Ecosystem Assessment, 2005), i també està clar que les influències del canvi climàtic són difícils de destriar de les dels altres components del canvi global, com són els canvis atmosfèrics o els canvis en els usos del sòl.

Per tal de conèixer i gestionar millor en quin grau aniran produint-se aquests i nous canvis, calen més estudis experimentals en condicions al més properes possible a les naturals, i que aprofitin els avenços tecnològics, per exemple

per aplicar-los als estudis del passat remot i proper i a la teledetecció. No cal dir, a més, que s'han de buscar les sinergies pròpies de la multidisciplinarietat. Aquests exemples de treballs que aquí hem presentat resumits pretenen anar en aquesta línia.

Els ecosistemes catalans presenten una extraordinària varietat orgànica en l'espai i el temps, a més d'una important resiliència. Aquesta heterogeneïtat multidimensional i resiliència són el resultat de la coevolució amb els humans i les seves activitats. Els ecosistemes evolucionen constantment, modificats pels focs, els humans i el seu bestiar i les seves eines. I ara, a més, pel canvi climàtic i el canvi global. La dinàmica dels nostres ecosistemes, gairebé tots seminaturals, es pot entendre com una sèrie de degradacions antropogèniques i regeneracions subsegüents. 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. Les estratègies multiús per a la gestió i rehabilitació dels ecosistemes terrestres mediterranis demanen un gran esforç educatiu, de recerca, governamental i econòmic per continuar gaudint dels seus serveis i per 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.

En tot cas, la gestió dels ecosistemes terrestres en relació amb el canvi climàtic sembla que hauria de considerar el següent:

— La gestió forestal hauria d'incorporar el canvi de condicions ambientals que estem vivint, 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.

— En els propers anys, les polítiques de reforestació de zones pertorbades i la gestió de l'«aforestació» d'espais agrícoles abandonats haurien de tenir en compte els canvis que s'estan produint i les condicions que s'estan projectant per al futur immediat. Entre aquestes, hi destaca la d'una disponibilitat hídrica decreixent com a conseqüència tant de la disminució de les preci-

pitacions i/o l'augment de l'evapotranspiració potencial com de la major demanda d'uns ecosistemes més actius i d'una població creixent.

— La gestió dels espais forestals, i dels naturals en general, ha d'incorporar l'escala de paisatge i la regional, en què s'inclouï la 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 ben escasses i urgentment necessàries.

— Per pal·liar el canvi climàtic per mitjà d'una major captació i menor pèrdua de CO₂, s'hauria d'actuar sobre la reforestació i l'«aforestació», com s'ha assenyalat abans, i, a més, s'hauria d'allargar la immobilització del carboni en els productes forestals i protegir els sòls, però alhora s'haurien de considerar les alteracions que tot això genera en el cicle de l'aigua.

Referències

- ANDREU, L.; PLANELL, O.; GUTIERREZ, E. [et al.] (2008). «Climatic significance of tree-ring width and ¹³C in a Spanish pine forest network». *Tellus B* 60:5, 771-781.
- BEIER, C.; EMMETT, B.; GUNDERSEN, P. [et al.] (2004). «Novel Approaches to study Climate Change effects on terrestrial ecosystems in the field: drought and passive nighttime warming». *Ecosystems*, vol. 7, p. 583-597.
- CANADELL, J.G.; CORINNE, L.E.; QUÉRÉ, MICHAEL, R. [et al.] (2007). «Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks». *Proceedings of the National Academy of Science*, vol. 104 no. 47, p. 18866-18870.
- CARNICER, J.; COLL, M.; NINYEROLA, M.; et al. (2010). Generalized crown condition decline in the Mediterranean basin forests with increased climate-change drought impacts. (En revisió.)
- CASTELLS, E.; ROUMET, C.; ROY, J.; PEÑUELAS, J. (2002). «Intraspecific variability of phenolic concentrations and their responses to elevated CO₂ in two Mediterranean perennial grasses». *Environmental Experimental Botany*, vol. 47, p. 205-216.

- CURIEL J.; PEÑUELAS J.; ESTIARTE, M. [et al.] (2010). Diversity of drought-resistant fungi controls the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition. (Per enviar.)
- DÍAZ-DELGADO, R.; LLORET, F.; PONS, X.; 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. [et al.] (2004). «The responses of soil processes to climate change: results from manipulation studies across an environmental gradient». *Ecosystems*, vol. 7, p. 625-637.
- ESTIARTE, M.; PEÑUELAS, J.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, C.; PÉREZ-OBOL, R. (2008). «Holocene palaeoenvironment in a former coastal lagoon of the arid south eastern Iberian Peninsula: salinization effects on 15N». *Veget Hist Archaeobot*, vol. 17, p. 667-674.
- GARBULSKY M.F.; PEÑUELAS, J.; PAPALE, D.; FILELLA, I. (2008). «Remote estimation of carbon dioxide uptake by a Mediterranean forest». *Global Change Biology*, vol. 14, p. 2860-2867.
- GARBULSKY, M.F.; PEÑUELAS, J.; PAPALE, D. [et al.] (2010). Patterns and controls of the variability of radiation use efficiency and primary productivity across terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, vol. 19, p. 253-267.
- 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.aect.org/ecosistemas/022/investigacion4.htm>
- GRACIA, C.; SABATÉ, S.; VAYREDA, J. [et al.] (2010). «Embornals». A: LLEBOT, J.E. *Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*; Barcelona: Institut d'Estudis Catalans i Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible.
- GROSSMAN, D. (2004). «Pérdida de sincronía en los ecosistemas». *Investigación y Ciencia*, vol. 330, p. 68-76.
- IPCC. (2007a). «Climate change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change». A: PARRY, M.L.; CANZIANI, O.F.; PAULIKOF, J.P. [et al.]. Cambridge: Cambridge University Press.
- (2007b). «Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change». A: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M. [et al.]. Cambridge, UK—New York USA: Cambridge University Press, p.996.
- JUMP, A.; HUNT, J.M.; MARTÍNEZ-IZQUIERDO, J. A.; PEÑUELAS, J. (2006a). «Natural selection and climate change: temperature-linked spatial and temporal trends in gene frequency in *Fagus sylvatica*». *Molecular Ecology*, vol. 15, p. 3469-3480.
- JUMP, A.; HUNT, J.; PEÑUELAS, J. (2006b). «Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*». *Global Change Biology*, vol. 12, p. 2163-2174.
- JUMP, A.; PEÑUELAS, J.; RICO, L. [et al.] (2008). «Simulated climate change provokes rapid genetic change in the Mediterranean shrub *Fumana thymifolia*». *Global Change Biology*, vol. 14, p. 637-643.
- JUMP, A.; MATYAS, C.; PEÑUELAS, J. (2009). «The altitude-for-latitude disparity in the range retractions of woody species». *Trends in Ecology and Evolution* vol. 24, p. 694-701, DOI 10.1016/j.tree.2009.06.007
- KEENAN, T.; NIINEMETS, Ü.; SABATÉ, S. [et al.] (2009). «Process based inventory of isoprenoid emissions from European forests: model comparisons, current knowledge and uncertainties». *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 9, p. 4053-4076.
- KÖRNER, C. (2006). «Plant CO₂ responses: an issue of definition, time and resource supply». *New Phytologist*, vol. 172, p. 393-411.
- LLORET, F.; SISCART, D.; DALMASES, C. (2004a). «Canopy recovery after drought dieback in holm-oak Mediterranean forests of Catalonia (NE Spain)». *Global Change Biology*, vol. 10, p. 2092-2099.
- LLORET, F.; PEÑUELAS, J.; OGAYA, R. (2004b). «Establishment of co-existing Mediterranean tree species under a varying soil moisture regime». *Journal of Vegetation Science*, vol. 15, p. 237-244.
- LLORET, F.; PEÑUELAS J.; ESTIARTE M. (2004c). «Experimental evidence of seedling diversity reduction by climate change in a Mediterranean-type community». *Global Change Biology*, vol. 10, p. 248-258.
- LLORET, F.; ESTEVAN, H.; VAYREDA, J.; TERRADAS, J. (2005). «Fire regenerative syndromes of forest woody species across fire and climatic gradients». *Oecologia*, vol. 146, p. 461-468.
- LLORET, F.; ESTEVAN, H.; LOBO, A. [et al.] (2007). «Woody plant richness and NDVI response to drought event in Catalanian (NE Spain) forests». *Ecology*, vol. 88, p. 2270-2279.
- LÓPEZ-CLARAMUNT, B.; SABATÉ, S.; RUIZ, I.; GRACIA, C. (1997). «Effects of elevated CO₂ and decreased water availability on holm oak seedlings in controlled environment chambers». A: MOHREN, G. M.

- J., KRAMER K., SABATÉ, S. *Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p.125-133.
- MARTÍNEZ-VILALTA, J.; LÓPEZ, B.C.; ADELL, N. [et al.] (2008). «Twentieth century increase of Scots pine radial growth in NE Spain shows strong climate interactions». *Global Change Biology*, vol. 14, p. 2868-2881.
- MENZEL, A.; SPARKS, T.; ESTRELLA, N. [et al.] (2006). «European phenological response to climate change matches the warming pattern». *Global Change Biology*, vol. 12, p. 1969-1976.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005). «Ecosystems and human well-being: synthesis». Washington D.C.: Island Press.
- OGAYA, R.; PEÑUELAS, J. (2007). «Tree growth, mortality, and above-ground biomass accumulation in a holm oak forest under a five-year experimental field drought». *Plant Ecology*, vol. 189, p. 291-299.
- OLIVEIRA, G.; PEÑUELAS, J. (2002). «Comparative protective strategies of *Cistus albidus* and *Quercus ilex* facing photoinhibitory winter conditions». *Environmental and Experimental Botany*, vol. 47, p. 281-289.
- PARMESAN, C.; RYRHOLM, N.; STEFANESCU, C. [et al.] (1999). «Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming». *Nature*, vol. 399, p.579-583.
- PEÑUELAS, J. (1993). «El aire de la vida (una introducción a la ecología atmosférica)». Barcelona: Ariel.
- (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.
- (2008). «An increasingly scented world». *New Phytologist*, vol. 180, p. 735-738.
- PEÑUELAS, J.; AZCON-BIETO, J. (1992). «Changes in 13C of herbarium plant species during the last 3 centuries of CO₂ increase». *Plant, Cell and Environment*, núm. 15, p. 485-489.
- PEÑUELAS, J.; BIEL, C.; ESTIARTE, M. (1995). «Growth, biomass allocation, and phenology of peppers plants submitted to elevated CO₂ and different nitrogen and water availabilities». *Photosynthetica*, núm. 31(1), p. 91-99.
- 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.; FILELLA, I. (1998). «Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status». *Trends in Plant Science*, núm. 3, p. 151-156.
- (2001a). «Phenology: Responses to a warming world». *Science*, núm. 294, p. 793-795.
- (2001b). «Herbaria century record of increasing eutrophication in Spanish terrestrial ecosystems». *Global Change Biology*, núm. 7, p. 1-7.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; COMAS, P. (2002). «Changed plant and animal life cycles from 1952-2000». *Global Change Biology*, núm. 8, p. 531-544.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; LLUSIÀ, J. [et al.] (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. [et al.] (2000). «Effects of a severe drought on water and nitrogen use by *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*». *Biologia Plantarum*, vol. 43, vol. 1, p. 47-53.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; SABATE, S.; GRACIA, C. (2005). «Sistemes naturals: ecosistemes terrestres». A: LLEBOT, J.E. (ed). *Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans i CADS, p. 517-553.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; TOGNETTI, R. (2001b). «Leaf mineral concentrations of *Erica arborea*, *Juniperus communis*, and *Myrtus communis* growing in the proximity of a natural CO₂ spring». *Global Change Biology*, núm. 7, p. 291-301.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; ZHANG, X. [et al.] (2004a). «Complex spatio-temporal phenological shifts in as a response to rainfall changes». *New Phytologist*, vol. 161, p. 837-846.
- PEÑUELAS, J.; GORDON, C.; LLORENS, L. [et al.] (2004b). «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.; HUNT, J.; OGAYA, R.; JUMP, A. (2008). «Twentieth century changes of tree-ring 13C at the southern range-edge of *Fagus sylvatica*: increasing water-use efficiency does not avoid the growth decline induced by warming at low altitudes». *Global Change Biology*, vol. 14, p. 1076-1088.
- PEÑUELAS, J.; IDSO, B.; RIBAS, A.; KIMBALL, B.A. (1997). «Effects of long-term atmospheric CO₂ enrichment

- on the mineral concentration of *Citrus aurantium* leaves». *New Phytologist*, núm. 135, p. 439-444.
- PEÑUELAS, J.; LLORET, F.; MONTOYA, R. (2001a). «Severe drought effects on Mediterranean woody flora in Spain». *Forest Science*, vol. 47, p. 214-218.
- PEÑUELAS, J.; LLUSIÀ, J. (2003). «BVOCs: Plant defense against climate warming?». *Trends in Plant Science*, núm. 8, p. 105-109.
- (2004). «Plant VOC emissions: making use of the unavoidable». *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 19, p. 402-404.
- 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 CO₂ increase». *Journal of Experimental Botany*, núm. 41 (230), p. 1119-1124.
- PEÑUELAS, J.; OGAYA, R.; BOADA, M.; JUMP, A. (2007a). «Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia». *Ecography*, vol. 30, p. 830-838.
- PEÑUELAS, J.; OGAYA, R.; CANADELL, J. (2010). «Metanálisi CO₂ fertilization effect». *Global Ecology and Biogeography* (en premsa).
- PEÑUELAS, J.; PRIETO, P.; BEIER, C. [et al.] (2007b). «Response of plant species richness and primary productivity in shrublands along a north-south gradient in Europe to seven years of experimental warming and drought: reductions in primary productivity in the heat and drought year of 2003». *Global Change Biology*, vol. 13, p. 2563-2581.
- PEÑUELAS, J.; RUTISHAUSER, T.; FILELLA, I. (2009). «Phenology Feedbacks on Climate Change». *Science*, vol. 324, p. 887-888.
- PEÑUELAS, J.; SARDANS, J. (2009). «Elementary factors». *Nature* vol. 460, p. 803-804.
- PEÑUELAS, J.; STAUDT, M. (2010). «Global change-induced alterations in BVOCs and BVOCs-induced alterations in global change». *Trends in Plant Science*, vol. 15, p. 133-144.
- 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.
- PRIETO, P.; PEÑUELAS, J.; LLORET, F. [et al.] (2009a). «Experimental drought and warming decrease diversity and slow down post-fire succession in a Mediterranean shrubland». *Ecography*, vol. 32, p. 623-636.
- PRIETO, P.; PEÑUELAS, J.; LLUSIÀ, J. [et al.] M. (2009b). «Effects on experimental warming and drought on biomass accumulation in a Mediterranean shrubland». *Plant Ecology*, vol. 205, p. 179-191.
- RODÀ, F.; IBAÑEZ, J.; GRACIA, C. (2003). «Estat dels boscos de Catalunya». A: *Informe sobre l'estat del medi ambient a Catalunya 2001*. Barcelona: Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient, p. 43-54.
- 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.
- 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.; PEÑUELAS, J. (2004). «Drought decreases P availability in an evergreen oak Mediterranean forest». *Plant and Soil*, vol. 267, p. 367-377.
- (2005). «Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean holm oak forest». *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 37, p. 455-461.
- (2007). «Drought changes phosphorus and potassium accumulation patterns in an evergreen Mediterranean forest». *Functional Ecology*, vol. 21, p. 191-201.
- SARDANS, J.; PEÑUELAS, J.; ESTIARTE, M. (2006). «Warming and drought alter soil phosphatase activity and soil P availability in a Mediterranean shrubland». *Plant and Soil*, vol. 289, p. 227-238.
- (2007). «Patterns of soil and root-surface phosphatase activities in a Mediterranean shrubland. Effects of experimental drought. Biology and Fertility of Soils». *Biol. Fertil. Soils*, vol. 43, p. 779-786.
- (2008a). «Changes in soil-enzymes related to C and N cycle and in soil C and N content under prolonged warming and drought in a Mediterranean shrubland». *Applied Soil Ecology*, vol. 39, p. 223-235.
- (2008b). «Warming and drought induced different patterns of change of P and K accumulation in biomass and soil in a Mediterranean shrubland». *Plant and Soil*, vol. 306, p. 261-271.

- SARDANS, J.; PEÑUELAS, J.; OGAYA, R. (2008b). «Drought induced changes in C and N stoichiometry in a *Quercus ilex* Mediterranean forest». *Forest Science*, vol. 54, p. 513-522.
- (2008c). «Drought reduced acid and alkaline soil phosphatase activities and increased soil organic extractable P in a *Quercus ilex* Mediterranean forest». *European Journal of Soil Biology*, vol. 44, p. 509-520.
- SARDANS, J.; PEÑUELAS, J.; PRIETO, P.; ESTIARTE, M. (2008e). «Different plant specific and ecosystem patterns responses of C and N accumulation in a Mediterranean shrubland under drought and warming conditions». *Global Change Biology*, vol. 14, p. 2304-2316.
- STEFANESCU, C.; PEÑUELAS, J.; FILELLA, I. (2003). «The effects of climatic change on the phenology of butterflies in the Northwest Mediterranean Basin». *Global Change Biology*, vol. 9, p. 1494-1506.
- THACKERAY, S.J.; SPARKS, T.H.; FREDERIKSEN, M. [et al.] (2010). «Trophic level imbalances in rates of phenological change for marine, freshwater and terrestrial environments». *Global Change Biology*, en premsa.
- WALTHER, G.R.; POST, E.; CONVEY, P. [et al.] (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.
- ZHAO, M.S.; RUNNING, S.W. (2010). «Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2009 through 2009». *Science*, vol. 9, p. 940-943.

