



El canvi climàtic als Pirineus: impactes, vulnerabilitat i adaptació

Bases de coneixement per a la futura
Estratègia d'Adaptació al Canvi Climàtic als Pirineus



OPCC-CTP (2018). El canvi climàtic als Pirineus: impactes, vulnerabilitats i adaptació
Bases de coneixement per a la futura estratègia d'adaptació al canvi climàtic als Pirineus

ISBN: 978-84-09-06268-3

Coordinació i edició de textos: Juan Terrádez e Idoia Arauzo
Revisió de textos en català: Lluís Guitard
Disseny de la portada: La Page Original
Edició gràfica i maquetació: Collserola
Foto de portada: © OPCC

Avís legal

El contingut d'aquesta publicació no reflecteix necessàriament les opinions oficials de l'Observatori Pirinenc del Canvi Climàtic o altres institucions de la Unió Europea. Ni l'Observatori Pirinenc del Canvi Climàtic ni cap persona que actui en nom de l'OPCC és responsable de l'ús que pugui fer de la informació continguda en aquest informe.

Avís de copyright



Reconeixement-No comercial (CC BY-NC)

Aquesta llicència permet a altres barrejar, ajustar i construir a partir del seu treball per a fins no comercials, i encara que en les seves noves creacions hagin de reconèixer la seva autoria i no puguin ser utilitzades de manera comercial, no han d'estar sota una llicència amb els mateixos termes.

Descarrega l'informe complet i el resum executiu a ES, FR, CAT o A al portal d'informació del Observatori Pirinenc del Canvi Climàtic: <https://opcc-ctp.org/>

Informe sobre el canvi climàtic als Pirineus

Des del seu llançament l'any 2010 sota la presidència de Midi-Pyrénées, l'Observatori Pirinenc del Canvi Climàtic de la Comunitat de Treball dels Pirineus (CTP) ha treballat analitzant la vulnerabilitat al canvi climàtic de les diverses poblacions, sectors socials, econòmics i naturals de l'espai pirinenc transfronterer, a través del desenvolupament de metodologies adequades i sota el prisma de la cooperació.

Durant l'any 2018 i seguint la línia de treball de l'Observatori, la CTP ha elaborat un informe en el qual s'actualitza el coneixement sobre les repercussions del canvi climàtic en el territori pirinenc transfronterer. Aquest informe recull les bases científiques sobre els impactes del canvi climàtic i la seva repercussió en el territori, així com un compendi de recomanacions sectorials d'adaptació formulades en conseqüència. Aquestes bases de coneixement són indispensables per orientar les polítiques en matèria d'adaptació al canvi climàtic de manera més eficaç, per aprofitar les oportunitats emergents i maximitzar les sinergies positives amb altres polítiques sectorials. El seu valor afegit rau sens dubte en l'esperit de cooperació que n'ha marcat tant la concepció com la redacció. Hi han participat prop de 100 científics i experts de referència provinents d'ambdues vessants dels Pirineus. Han col·laborat en la seva redacció així com en els diversos processos de revisió que atorguen a aquest document un ampli consens científic. És necessari recalcar que sense la llarga trajectòria de cooperació, treball en xarxa i projecció internacional amb organismes com la Convenció dels Alps, la Convenció dels Carpats o l'Agència Europea de Medi Ambient, seria impossible crear documents de referència com el present informe. La visió d'aquest informe és la pròpia de l'Observatori, que concep els Pirineus com una única "bioregió" que no entén de límits administratius i que té uns sistemes socioeconòmics i biofísics que presenten una especial vulnerabilitat al canvi climàtic. Les evidències científiques recollides en aquest informe posen de manifest el mateix que altres estudis ja han demostrat en altres territoris: les zones de muntanya estan experimentant augments de temperatura superiors a les zones planes i, per tant, els impactes del canvi climàtic són més intensos. En concret, per als Pirineus ja s'estan observant impactes en tots els sectors naturals i socioeconòmics com la desaparició accelerada d'ecosistemes sensibles i elements iconogràfics com els glaciers; l'alteració del cicle de vida de moltes espècies, entre elles algunes d'endèmiques; la incidència del canvi climàtic en els riscos naturals, en les activitats lligades al turisme, en l'agricultura o els canvis observats en el cicle hidrològic. El canvi climàtic es posiciona com un factor d'estrès afegit que agreuja els problemes ja coneguts en el territori pirinenc com la despoblació, els canvis d'ús del sòl o la falta de relleu generacional en el sector primari. Des de la CTP s'entén la lluita contra el canvi climàtic i l'adaptació als seus impactes com a instruments transversals que ofereixen una multitud d'oportunitats per abordar els desafiaments dels Pirineus, que són a la vegada desafiaments globals. D'aquesta manera, la CTP, des de l'acció local, contribueix a la consecució de l'Objectiu 13, Acció pel Clima, de l'Agenda 2030 de Desenvolupament Sostenible de las Naciones Unides.



D. Francisco Javier Lambán Montaños
President de la CTP

1. Clima i variabilitat climàtica als Pirineus	6
1.1. El clima del període glacial i la deglaciació	6
1.1.1. El clima de l'Holocè	6
1.1.2. Els darrers 2.000 anys	7
1.2. El clima actual	10
1.2.1. Evolució de la temperatura mitjana anual i estacional	10
1.2.2. Evolució de la precipitació anual i estacional	11
1.2.3. Evolució del mantell de neu als Pirineus	13
1.3. Projeccions de canvi climàtic als Pirineus	16
2. L'impacte del canvi climàtic en els sectors biofísics	18
2.1. El canvi climàtic durant l'Holocè	18
2.2. Biodiversitat de muntanya: fauna	22
2.2.1. Canvis en la productivitat i abundància de les espècies	22
2.2.2. Modificacions del cicle de vida (alteracions fenològiques) i de les interaccions entre espècies	24
2.2.3. Modificacions en la distribució geogràfica	26
2.2.4. Alteracions de les interaccions ecològiques i del funcionament dels ecosistemes	30
2.2.5. Risc més elevat d'invasió i/o expansió d'espècies exòtiques	32
2.2.6. Impacte en la interconnexió entre les xarxes d'espais protegits	33
2.2.7. Conclusions i recomanacions	33
2.3. Biodiversitat de muntanya: flora	36
2.3.1. Alteracions fisiològiques i canvis en la productivitat i l'abundància de les espècies	37
2.3.2. Canvis del cicle vital (canvis fenològics)	37
2.3.3. Alteracions ecològiques i del funcionament dels ecosistemes	38
2.3.4. Canvis en la composició i en les interaccions entre espècies a la comunitat ecològica	38
2.3.5. Vulnerabilitats i serveis ecosistèmics	41
2.3.6. Conclusions i recomanacions	42
2.4. Boscos	44
2.4.1. Impactes potencials del canvi climàtic sobre la diversitat de les comunitats vegetals i sobre el repartiment de les espècies forestals	44
2.4.2. Alteració de la productivitat dels boscos i paper dels boscos com a pou de carboni	47
2.4.3. Impacte del canvi climàtic en el paper dels boscos en la mitigació dels riscos naturals	49
2.4.4. Alteració de les condicions de salut dels boscos i possible desequilibri amb les comunitats d'agents patògens	51
2.4.5. Impacte del canvi climàtic en el risc d'incendis forestals als Pirineus	54
2.4.6. Conclusions i recomanacions	56
2.5. Ecosistemes sensibles d'alta muntanya: estanys i torberes	58
2.5.1. Característiques dels estanys i torberes pirinencs	58
2.5.2. Processos en estanys i torberes d'alta muntanya en un context de canvi climàtic	59
2.5.3. Impactes previstos	62
2.5.4. Principals desafiaments	64
2.5.5. Conclusions i Recomanacions	64
2.6. Cicle hidrològic i recursos hídrics	66
2.6.1. Canvis en les aigües superficials: aportació anual	68
2.6.2. Canvis en les aigües superficials: règim mensual	70
2.6.3. Canvis en les aigües subterrànies i en les surgències	70
2.6.4. Canvis en les característiques físico-químiques de les masses d'aigua	73
2.6.5. Canvis en la composició biològica de les masses d'aigua	74
2.6.6. Conclusions i recomanacions per a l'adaptació	76
3.	

Impacte del canvi climàtic en els sectors socioeconòmics	78
3.1. Turisme	78
3.1.1. Reducció de l'atractiu turístic hivernal de les estacions d'esquí	78
3.1.2. Alteració dels elements iconogràfics del paisatge pirinenc	82
3.1.3. Augment del risc per a les infraestructures turístiques com a conseqüència dels fenòmens hidrològics, geològics i dels esdeveniments climàtics extrems	83
3.1.4. Prolongació de l'estació de turisme de muntanya	83
3.1.5. Conclusions i recomanacions	85
3.2. Cultius agrícoles i agropastoralisme de muntanya	87
3.2.1. Impactes i vulnerabilitats en el sector agrícola	87
A. Desplaçament de les àrees d'idoneïtat dels cultius	87
B. Canvis en els rendiments dels cultius	88
C. Expansió de plagues i malalties agrícoles	92
3.2.2. Pastures naturals de muntanya: impactes i vulnerabilitat	94
A. Canvis en la producció i la qualitat de les pastures	94
B. Alteracions en la composició florística i de la diversitat	95
3.2.3. Sector ramader extensiu: impactes i vulnerabilitats	96
A. Reducció del benestar animal i de la producció ramadera	96
B. Noves zoonosis i difusió de malalties del bestiar	97
3.2.4. Conclusions i recomanacions	98
3.3. Energia	102
3.3.1. Disminució de la capacitat de producció d'energia hidroelèctrica	102
3.3.2. Disminució de l'eficiència en la producció d'energia termoelèctrica	104
3.3.3. Canvi climàtic i energies renovables	104
3.3.4. Variació estacional de la demanda energètica	106
3.3.5. Increment del risc de danys en les infraestructures energètiques	107
3.3.6. Conclusions i recomanacions	108
3.4. Riscos naturals	111
3.4.1. Augment dels fenòmens meteorològics extrems	111
3.4.2. Augment de la freqüència d'inundacions i crescudes	113
3.4.3. Augment dels lliscaments i desprendiments de roques	115
3.4.4. Majors riscos relacionats amb la degradació del permafrost	115
3.4.5. Allaus	117
3.4.6. Dissenyar una estratègia d'adaptació als riscos naturals en el futur	118
3.4.7. Conclusions i recomanacions	119
Bibliografia	124
1. Clima i Variabilitat Climàtica als Pirineus	124
1.1. El clima del període glacial i la deglaciació	124
1.2. El clima actual	125
1.3. Projeccions de canvi climàtic als Pirineus	125
L'impacte del canvi climàtic en els sectors biofísics	128
2.1. El canvi climàtic durant l'Holocè	128
2.2. Biodiversitat de muntanya: fauna	128
2.3. Biodiversitat de muntanya: flora	131
2.4. Boscos	133
2.5. Ecosistemes sensibles d'alta muntanya: estanys i torberes	136
2.6. Cicle hidrològic i recursos hídrics	137
3. Impacte del canvi climàtic en els sectors socioeconòmics	140
3.1. Turisme	140
3.2. Cultius agrícoles i agropastoralisme de muntanya	142
3.3. Energia	143
3.4. Riscos naturals	143

1. Clima i variabilitat climàtica als Pirineus

Coordinadors: José María Cuadrat (UNIZAR),

Blas Valero Garcés (IPE-CSIC)

Autors: Ana Moreno (IPE-CSIC), Blas Valero Garcés (IPE-CSIC), Deborah Verfaillie (METEO-FRANCE), Didier Galop (CNRS), Ernesto Rodríguez (AEMET), Ernesto Tejedor (UNIZAR), Fernando Barreiro-Lostres (IPE-CSIC), Jean-Michel Soubeyroux (METEO-FRANCE), Jordi Cunillera (SMC), José M. Cuadrat (UNIZAR), José María García-Ruiz (IPE-CSIC), Juan Ignacio López-Moreno (IPE-CSIC), Laura Trapero (CENMA), Marc Pons (CENMA), Marc Prohom (SMC), Miguel A. Saz (UNIZAR), Penélope González-Sampérez (IPE-CSIC), Petra Ramos (AEMET), Pilar Amblar (AEMET), Ramón Copons (CENMA), Roberto Serrano-Notivoli (UNIZAR), Simon Gascoin (CESBIO), Yolanda Luna (AEMET).

1.1 El clima del període glacial i la deglaciació

Els canvis climàtics durant el Quaternari (darrers 2,6 milions d'anys), i en particular la successió de períodes glacials i interglacials, han fet importants empremtes en el relleu (modelat del paisatge, geomorfologia) i en els ecosistemes pirinencs, com és la formació de grans valls en forma de "U" i circs glacials, depòsits glaciolacustres i mesoformes glacials. Als Pirineus, hi ha evidències de glaciacions anteriors a l'últim màxim glacial global (UMG), que va tenir lloc ara fa uns 22.000 anys, sincrònic a l'Estadi Isotòpic Marí 2 i contemporani a la màxima extensió dels casquets glacials continentals. Per exemple, a la vall de l'Aragón hi ha depòsits morrènics i fluvioglacials de 171.000 i 263.000 anys d'antiguitat (García-Ruiz et al., 2013), a la vall del Gállego n'hi ha de 170.000 anys d'antiguitat (Lewis et al., 2009), a la vall de l'Arieja n'hi ha que indiquen avenços glacials als 79.000 i 35.000 (Delmas et al., 2011)

Encara que la successió de períodes freds i càlids és sincrònica a escala planetària, la màxima extensió de les glaceres pirinencs no va tenir lloc al voltant dels 20.000 anys, durant l'UMG, sinó ara fa uns 60.000 anys (Lewis et al., 2009) amb lleugeres variacions entre les diferents valls. La manca de sincronia és causat pel clima als Pirineus ha estat controlat per la interacció que hi ha entre els processos atmosfèrics i oceànics de l'Atlàntic Nord, per la dinàmica atmosfèrica subtropical,

i pels canvis en la radiació solar incident que generen les variacions de l'òrbita de la Terra (paràmetres orbitals) (González-Sampérez et al., 2017; Bartolomé et al., 2015). Durant l'Últim Màxim Global (ara fa entre 22.000 i 19.000 anys) les glaceres pirinencs també van experimentar un creixement, encara que no van superar la màxima extensió a la que havien arribat entre 30.000 i 40.000 anys abans ja que és probable que fos un període relativament sec.

El començament de l'última deglaciació, ara fa uns 19.000 anys, es correspon amb un increment ràpid de la temperatura i de la humitat ben documentat en els registres glacials (Bordonau, 1992; Palacios et al., 2017), en estanys (Millet et al., 2012; González-Sampérez et al., 2017) i en espeleotemes (Bartolomé et al., 2015). Les glaceres pirinencs van retrocedir molt fins a quedar confinades en les àrees de capçalera. La deglaciació van ser un període de clima inestable, amb canvis tant d'escala mil·lenària com d'abruptes causats, en últim lloc, per la inestabilitat dels casquets glacials i per la dinàmica de l'Atlàntic Nord. Després d'un període inicial relativament sec i àrid, es va produir una nova expansió de les glaceres, ara fa uns 17.000 anys, seguida de condicions més càlides i humides, ara fa 14.700-12.900 anys, interrompudes novament per un període de condicions gairebé glacials durant la fase coneguda amb el nom de Younger Dryas. En aquesta darrera fase es va produir a un descens de la temperatura de gairebé 2 °C als Pirineus (Bartolomé et al., 2015) amb el creixement de glaceres de petita entitat en ambdós vessants (Pallàs et al., 2010). El Younger Dryas va ser el final de l'última glaciació i el començament de l'interglacial actual: l'Holocè.

1.1.1 El clima de l'Holocè

Al començament del Holocè, ara fa 11.700 anys, hi va haver un canvi substancial del clima a escala global amb l'augment generalitzat de les temperatures a latituds mitjanes. L'augment va anar associat a l'increment de la insolació durant l'estiu a l'hemisferi nord i a la desaparició dels casquets glacials. Al vessant sud dels Pirineus centrals, l'augment de les precipitacions que va tenir lloc al començament de l'Holocè a escala global sembla ser que es va retrassar, éssent als 9.500 anys (Leunda et al., 2017). En general, el clima durant l'Holocè inicial, fins fa

(1) L'Últim Màxim Glacial (UMG) es defineix com el període en què els casquets glacials continentals van tenir la seva màxima extensió en l'hemisferi nord. Els estadis isotòpics marins defineixen períodes glacials (números parells) i interglacials (números imparells) basats en la composició isotòpica dels fòssils de foraminífers acumulats al fons del mar.

1.1 LA PETITA EDAT DEL GEL ALS PIRINEUS

La petita edat del gel PEH (1300 – 1850 CE) va ser l'última fase climàtica a escala global de l'Holocè, i va succeir entre ca. 1300 - 1850 CE, abans de l'escalfament global actual (Oliva et al., 2018). En les nostres latituds es va caracteritzar per temperatures més fredes i un augment dels fenòmens extrems, encara que amb gran variabilitat regional. Tres fases fredes entorn de 1650, 1770 i 1850 CE semblen associades a mínims de l'activitat solar (mínims de taques solars de Maunder, Spörer i Dalton), encara que altres factors com les grans erupcions volcàniques (Tambora a Indonèsia en 1815) també van contribuir al descens de les temperatures. Durant aquests segles, moltes glaceres pirinencs es van reactivar i van avançar fins a aconseguir la seva màxima extensió en tot l'Holocè, de manera que els paisatges i ecosistemes pirinencs es van adaptar a condicions més fredes abans de l'Escalfament Global del segle XX. Les temperatures mitjanes, estimades a partir de les Línies d'Equilibri Glacial, van anar uns 0.9 °C inferiors a les actuals (Copons i Bordonau, 1997; López-Moreno, 2000).

uns 8.000 anys, va ser més càlid i humit als Pirineus que durant la deglaciació, però probablement amb diferències entre ambdós vessants i entre les zones mediterrànies i atlàntiques (González-Sampérez et al., 2017). A més, el clima d'aquest període va estar caracteritzat per l'alta estacionalitat causada per la configuració dels paràmetres orbitals, que va provocar un augment de l'acumulació de neu als cims pirinencs durant l'hivern i unes altes taxes de fusió durant l'estiu. Al vessant sud dels Pirineus centrals (seqüència de Bassa de la Mora) la inestabilitat climàtica de l'Holocè inicial (entre els 9.800 i 8.100 anys abans d'ara) es caracteritza per quatre esdeveniments ràpids i de curta durada que van es donar ara fa 9.700, 9.300, 8.800 i 8.300 anys.

Des de fa 8.100 anys aproximadament i fins a 5.700 anys abans d'ara, el clima va ser més estable i amb precipitacions més abundants. De la mateixa manera que en moltes àrees de muntanya de l'hemisferi nord, segurament la majoria de les glaceres pirinencs van desaparèixer a l'Holocè inicial, quan les temperatures en Europa van ser probablement les més elevades de tot el període interglacial (Rius et al., 2012; CLIVAR, 2010).

Als Pirineus, les màximes temperatures probablement van tenir lloc al final de l'Holocè inicial i durant l'Holocè mitjà, ara fa uns 7.000 i 6.000 anys (Millet et al., 2012). El progressiu descens de les precipitacions durant l'Holocè mitjà va conduir a condicions més seques i, probablement, més fredes al voltant dels 5.500 anys.

Al massís pirinenc, hi ha indicis de que aquest canvi va tenir lloc primer a les regions més atlàntiques i després a les mediterrànies (González-Sampérez et al., 2017; Leunda et al., 2017). Als Pirineus centrals (Marboré) s'han trobat evidències d'un període d'avenç de les glaceres anomenat Neoglacial i que va tenir lloc ara fa entre 5.100 i 4.600 anys (García-Ruiz et al., 2016).

1.1.2 Els darrers 2.000 anys

La variabilitat climàtica durant els últims 2.000 anys ha estat controlada per processos interns naturals del sistema climàtic i per variacions de forçament extern natural o antropogènic. Els processos interns es deuen a les interaccions no lineals del sistema climàtic i es manifesten en forma de diferents patrons atmosfèrics (per exemple, NAO, Oscil·lació de l'Atlàntic Nord i EA, Oscil·lació de l'Atlàntic Oriental i SCAN, Oscil·lació d'Escandinàvia) i/o oceànics. Les variacions de forçament extern es deuen a causes naturals (per exemple, canvis en la insolació i el vulcanisme) i antropogèniques (per exemple, variacions en la concentració dels gasos d'efecte hivernacle i/o aerosols) (Giralt et al., 2017). Aquests processos i interaccions poden explicar a més els gradients regionals i temporals d'humitat i temperatura.

Durant els dos últims mil·lenis han tingut lloc quatre fases climàtiques ben caracteritzades a escala global: el període càlid i humit Ibero-Romà (des dels 250 anys abans de la nostra era comú fins a l'any 500 de l'era comú, CE), l'Alta Edat Mitjana (o "Edats Fosques", conegudes pel nom en anglès Dark Ages: 500-900 CE), l'Anomalia Climàtica Medieval (ACM ó MCA per la seva sigla en anglès Medieval Climate Anomaly: 900-1300 CE) i la Petita Edat de Gel (PEH ó LIA de l'anglès Little Ice Age: 1300-1850 CE). Tant la intensitat com la cronologia de les fases, mostren una gran variabilitat a la Península Ibèrica (Cisneros et al., 2016; Moreno et al., 2012; Giralt et al., 2017). Durant el Període Ibero-Romà, als Pirineus es detecta una tendència a l'augment de la temperatura a altituds altes (Pla i Catalán, 2011) i mitjanes (Morellón et al., 2012). Pel que fa a la humitat, als Pirineus es van donar condicions més àrides que al sud de la península Ibèrica (Morellón et al., 2012). Durant l'Alta Edat Mitjana, les temperatures mitjanes van devallar, encara que les condicions d'humitat van tenir una gran variabilitat regional caracteritzades, en general, per la major aridesa al Mediterrani (Menorca, Cisneros et al., 2016) i als Pirineus (Morellón et al., 2012). No obstant això, alguns registres pirinencs suggereixen un augment de les precipitacions o dels esdeveniments extrems (tempestes) (Corella et al., 2016).

Pel que fa a l'ACM, podria servir com un anàleg de l'actual període de Calentament Global i avaluar millor la variabilitat natural del clima abans del gran impacte humà en el clima durant l'Antropocè. Aquest període

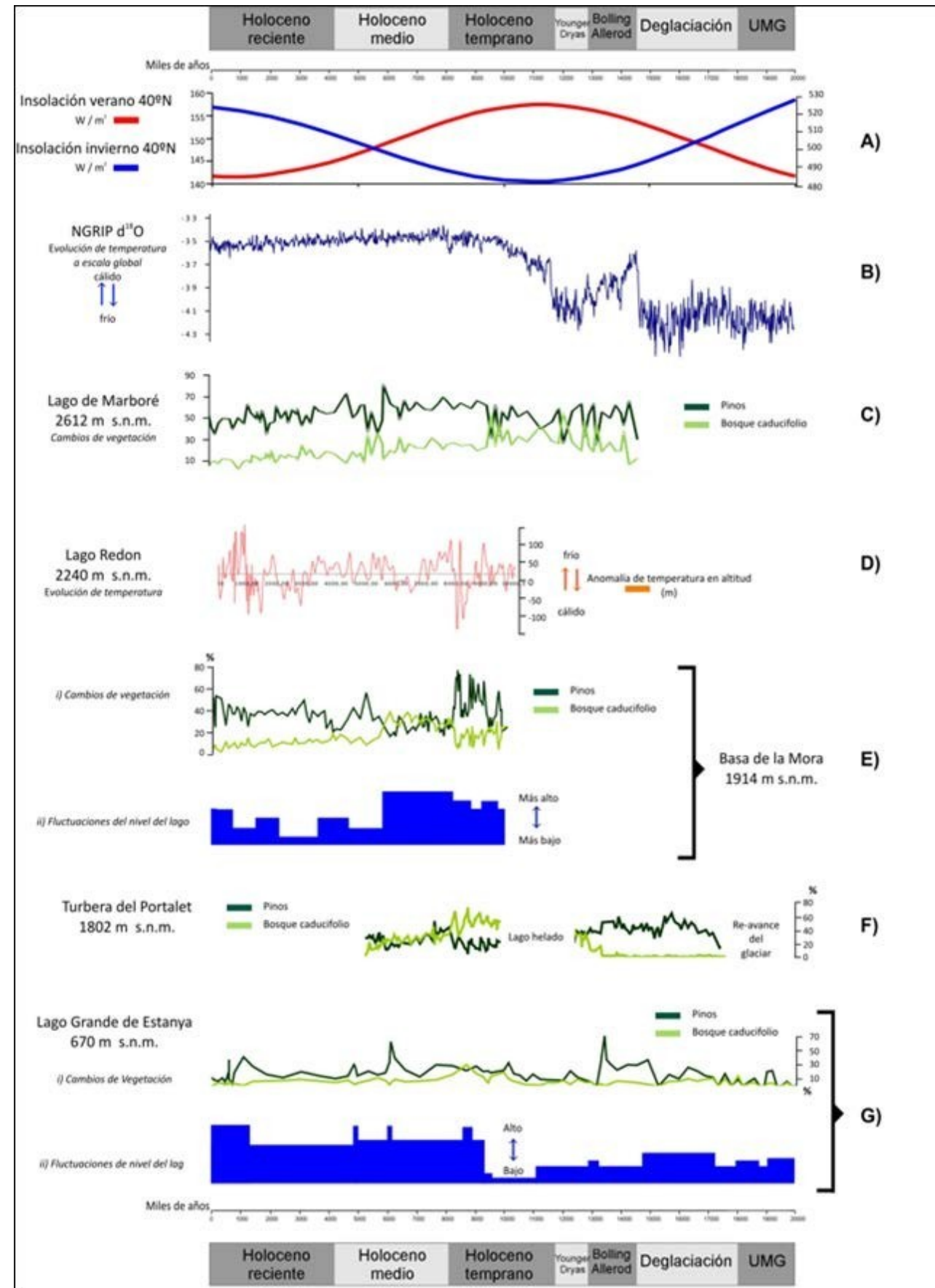


Figura 1.1.1 Registres pirinencs de variabilitat climàtica des de l'últim màxim glacial. Les corbes i l'escala temporal estan organitzades en mil·lers d'anys, sent el més antic el que està a la dreta de la figura i l'actual a l'esquerra. La barra inicial i la final inclouen els principals períodes climàtics reconeguts en els darrers 20.000 anys i els seus límits cronològics (la sigla UMG significa "últim màxim glacial"). Les corbes estan ordenades per altitud i comencen en la part superior per les que representen indicadors d'escala global (orbital i planetària). Correspon, de dalt a baix, al següent: A) evolució de la insolació (quantitat d'energia que arriba a la Terra des del Sol), a l'estiu (vermell) i hivern (blau), a 40o latitud Nord; B) evolució de la temperatura a escala global reconstruïda a partir d'isòtops d'oxigen del sondeig de Gel NGRIP de Groenlàndia (els valors més negatius impliquen temperatures més baixes i corresponen al període glacial); C) Canvis de vegetació arbòria dominant basats en la proporció de grans de pol·len de pi (verd fosc) i d'espècies típiques de bosc caducifoli (bedoll, avellaner, roble, freixe, om, til·ler, etc., en verd clar) del sondeig de l'estany de Marboré D) reconstrucció de l'anomalia de temperatura d'hivern-primavera durant els darrers 10.000 anys en cotes altes dels Pirineus centrals a partir del registre de crisofícies de l'estany Redón; E) Canvis de vegetació arbòria dominant (pol·len de pi en verd fosc i de bosc caducifoli en verd clar) i fluctuacions del nivell de l'estany reconstruïts a partir del registre sedimentari de la Bassa de la Mora; F) Canvis de vegetació arbòria dominant (pol·len de pi, verd fosc, i d'espècies típiques de bosc caducifoli, verd clar) de la torbera d'El Portalet i G) Canvis de vegetació arbòria dominant (pol·len de pi en verd fosc i de bosc caducifoli en verd clar) i fluctuacions del nivell de l'estany reconstruïts a partir del registre sedimentari de l'estany Gran d'Estanya. Totes les referències detallades de cadascuna de les seqüències i els indicadors inclosos es poden trobar en González-Sampéiz et al., (2017).

al., 2012; Oliva et al., 2017). Una disminució de l'1% de la radiació solar podria provocar una disminució de la temperatura mitjana global d'entre 1 i 2 °C que ja seria suficient per explicar els episodis freds. Alguns dels episodis més freds al voltant dels anys 1650, 1770 i 1850 CE semblen estar associats a mínims de l'activitat solar (mínims en el nombre de taques solars de Maunder, Spörer i Dalton), encara que hi ha altres factors com són les grans erupcions volcàniques que van tenir lloc en aquesta època (el volcà Laki a Islàndia entre 1783 i 1784, i el Tambora a Indonèsia al 1815) també van contribuir al descens de les temperatures. També hivan haver episodis més càlids entre els anys 1480-1570, 1715-1760, 1800-1815 i post 1850 CE. Alguns registres suggereixen que el període més humit, com a mínim en altituds mitjanes, va ser durant el segle XIX (Morellón et al., 2012). Les reconstruccions dendroclimàtiques mostren que el segle XVIII es va caracteritzar per una alta freqüència d'esdeveniments extrems que van anar disminuint durant el segle XIX (Oliva et al., 2018). Durant els episodis més freds, amb un descens de la temperatura mitjana de gairebé 1 °C, les glaceres pirinènques van avançar en ambdós vessants (Copons i Bordonau, 1997; López-Moreno, 2000).

1.2 UN CALENTAMENT GLOBAL RECENT INUSUAL

La variabilitat Climàtica durant el Quaternari ha modelat el territori pirinenc i controlat l'evolució dels ecosistemes. Durant la deglaciació, els canvis en la temperatura mitjana van arribar a ser de 6 °C, amb períodes de canvi climàtic ràpid de més de 1 °C en poques dècades. Durant l'Holocè, els canvis en temperatura van ser menors, però s'han enregistrat nombroses fases humides/seques. A l'últim mil·lenni, s'ha manifestat una fase particularment seca i càlida (Anomalia Climàtica Medieval, ACM, 900 -1300 CE) seguida de la Petita Edat del Gel (PEH, 1300 -1850 CE) amb temperatures més fredes, de fins 0.9 °C inferiors a l'actualitat, i amb un augment dels fenòmens extrems. Durant aquells segles, moltes glaceres es van reactivar i van avançar fins assolir l'extensió més gran de tot l'Holocè, de forma que els paisatges i ecosistemes pirinencs es van adaptar a condicions més fredes abans del Calentament Global del segle XX. La taxa d'augment de temperatura durant el calentament global del segle XX és superior a la de les transicions glacial/interglacial i als canvis manifestats durant l'Holocè.

mostra un accentuat caràcter àrid i càlid al Mediterrani occidental (Moreno et al., 2012). Cap al nord, les condicions van ser seques (Morellón et al., 2012), encara que en alguns llocs d'alta muntanya, com és el cas dels Pirineus, s'han documentat episodis humits (Pla i Catalán, 2011), a més d'una major freqüència de les tempestes fins i tot en altituds mitjanes (Corella et al., 2016). Quant a la PEH (1300 – 1850 CE), va ser un període més fred que va començar acompanyat per un augment de les tempestes (Corella et al., 2016). A més, està caracteritzat per episodis més humits alternats amb d'altres de seques intenses, fet que mostra una gran variabilitat en les zones de muntanya de la Península (Morellón et

1.2 El clima actual

La disponibilitat actual d'informació meteorològica instrumental permet una major aproximació al coneixement del clima als Pirineus i a l'avaluació de l'impacte del canvi climàtic. Tanmateix, l'estudi és complex en àrees de muntanya, ja que la topografia genera una gran diversitat d'ambients locals on el valor de les variables climàtiques és difícil de determinar. A tot això cal sumar-hi la manca de dades amb sèries llargues i la disminució del nombre d'observatoris amb l'altitud, ja que hi ha molt poques estacions ubicades en cotes altes. Per aquest motiu, és molt complicat entendre tot el que succeeix per sobre d'un llindar determinat, malgrat la importància de la informació climàtica a l'alta muntanya, des d'un punt de vista tant científic com aplicat, atès que algunes activitats humanes i nombrosos processos ecològics es concentren en aquestes zones.

A la vessant francesa, l'interès per l'observació meteorològica es manifesta des de finals del segle XVIII amb el registre de mesuraments al Mont-Luis, a 1.600 metres d'altitud, seguit de la creació de l'Observatori del Pic du Midi a 2.880 metres i, posteriorment, amb nous observatoris establerts al llarg del segle XX. Però fins al desenvolupament de les xarxes automatitzades a la dècada de 1990, els mesuraments per damunt dels 1.500 metres són irregulars i escassos. A la vessant espanyola, la situació és molt semblant. La creació recent d'estacions automàtiques i d'una xarxa climatològica amb el suport de les observacions de refugis de muntanya constitueix una valuosa base de dades per a l'estudi de l'evolució dels canvis climàtics, però la longitud temporal redueix l'abast del diagnòstic. Per tal de minimitzar aquest problema, cal comptar amb més observatoris, impulsar actuacions de rescat de dades i assegurar la pervivència de les observacions ja existents, així com de llur bona qualitat. En aquest sentit, cal destacar l'exemple de la serralada dels Alps, on a partir del projecte HISTALP es treballa des de fa anys en la recuperació de sèries climatològiques (Böhm et al, 2009).

Malgrat aquestes limitacions, s'han fet nombrosos estudis del clima dels Pirineus i, en especial, sobre les precipitacions i les temperatures (entre d'altres, els treballs de Balseinte, 1966; Creus, 1983; Gottardi, 2009; Pérez Zanón et al, 2017), la neu (Esteban et al, 2005; López Moreno, 2005 i 2009; Durand et al., 2012), el clima i les activitats de lleure (Pons et al, 2012 i 2015; Gilaberte et al, 2014), la variabilitat i el canvi climàtic (Bücher i Dessens, 1991; Vicente Serrano et al, 2007; López Moreno i Vicente Serrano, 2007; Espejo et al, 2008; López Moreno et al, 2011; Esteban et al, 2012; Buisán et al, 2015) i les projeccions climàtiques (López

Moreno et al, 2011; Verfaillie et al, 2017 i 2018). Això no obstant, la majoria de treballs presenten conclusions limitades per llur aproximació únicament regional (francesa, andorrana o espanyola), és a dir, considerant només una vessant dels Pirineus. Per aquest motiu, no permeten extreure una comprensió global dels processos climàtics a escala del conjunt de la serralada.

Les accions desenvolupades per l'Observatori Pirinenc del Canvi Climàtic han permès superar aquestes limitacions, a més d'optimitzar l'ús de les fonts d'informació i consolidar una major aproximació interdisciplinària. Un pas fonamental ha estat la creació d'una primera base de dades única, amb control de qualitat i homogeneïtzada, del període 1950-2010, i seguir una metodologia comuna per a caracteritzar el clima pirinenc i observar-ne la variabilitat. Amb aquesta informació, generada en el marc de l'OPCC, s'estan duent a terme les primeres aproximacions al coneixement dels patrons temporals i espacials de les temperatures i precipitacions del conjunt dels Pirineus i l'anàlisi de les seves tendències (Soubeyroux et al, 2011; Miquel, 2012; Cuadrat et al, 2013; Deaux et al, 2014).

1.2.1 Evolució de la temperatura mitjana anual i estacional

Tant els estudis regionals sobre Andorra, Espanya i França, com els estudis generals del conjunt de la serralada indiquen un clar augment de les temperatures en qualsevol moment de l'any (Spagnoli et al, 2002; Maris et al, 2009; López Moreno et al, 2010; El-Kenawy et al, 2011; Esteban et al, 2012). A més, aquest augment ha estat regular i cada cop més marcat al llarg de les darreres tres dècades, en consonància amb el diagnòstic global que realitza el Panell Intergovernamental del Canvi Climàtic (IPCC, 2013).

A Andorra, l'estimació de la tendència realitzada a partir de la informació de tres observatoris indica, per al període 1935-2008, l'augment significatiu de la temperatura màxima mitjana anual (d'entre 0,13 i 0,15°C per dècada), la màxima estival (0,22 °C per dècada) i la mínima estival (0,11 °C per dècada). Aquestes tendències d'increment tèrmic prenen força quan l'anàlisi se centra en el subperíode 1950-2008 (Esteban et al, 2012). Als Pirineus centrals espanyols, Pérez Zanón et al(2017) han detectat anomalies regionals de 0,11 °C per dècada per a les temperatures màximes i de 0,06 °C per dècada per a les mínimes per al període 1910-2013, que augmentarien fins a 0,57 °C i 0,23 °C per dècada respectivament al període 1970-2013. Aquests valors coincideixen, en part, amb els valors observats a la vessant francesa: Deaux et al(2014) indiquen per a la sèrie de Tarbes-Ossun un escalfament

de les temperatures mitjanes d'entre 0,25 °C i 0,36 °C per dècada, amb un rang d'incertesa d'entre 0,15 °C i 0,48 °C per dècada, segons el període considerat. Així mateix, apunten que el senyal d'augment és especialment fort a partir de la dècada de 1980, tal com succeeix en d'altres observatoris pirinencs. Quan l'anàlisi es fa per al conjunt dels Pirineus, el resultat és idèntic: a les darreres dècades, la temperatura ha experimentat un clar augment. Aquesta és la conclusió de la recerca desenvolupada a l'acció Clima del projecte OPCC-POCTEFA EFA 235/11, a partir de l'estudi de 32 sèries de temperatures d'alta qualitat i homogeneïtzades per al període 1959-2010. La tendència de l'indicador de temperatura mitjana anual per al global del període analitzat és positiva i estadísticament significativa, amb un valor de l'ordre de 0,2 °C per dècada. Aquest augment tèrmic és general a tota la serralada, amb anomalies sistemàticament positives des de 1980 i fins a l'actualitat, i amb poques diferències entre la vessant nord i la vessant sud de la serralada.

De tota la sèrie considerada (1959-2010), l'any més càlid va ser el 1997, amb una temperatura mitjana superior en 1,5 °C a la mitjana del període 1961-1990, seguit pels anys 2006 i 2003. En sentit contrari, l'any 1972 va ser el més fred, amb 0,8 °C menys que la

mitjana de referència, seguit dels anys 1963 i 1980. L'indicador de temperatura mitjana per a les quatre estacions mostra que l'augment tèrmic al llarg de les darreres cinc dècades és molt marcat a l'estiu: de l'ordre de 0,4 °C per dècada, un valor que supera els llindars estadístics de significació. A la primavera, aquest és una mica més baix: prop de 0,2 °C per dècada (també estadísticament significatiu). L'anomalia estacional a la tardor i a l'hivern és bastant menor i, a més, la tendència no és estadísticament significativa en aquestes dues estacions, de manera que el seu valor queda subjecte a un grau d'incertesa més alt. A escala internacional, també s'observen poques diferències en aquest indicador entre la vessant nord i sud dels Pirineus.

De l'anàlisi d'esdeveniments concrets s'observa que entre les anomalies càlides (positives) en destaca especialment la temperatura mitjana de l'estiu del 2003, amb valors de 3,6 °C per sobre de la mitjana del període 1961-1990 (en el context d'una onada de calor notable que va afectar bona part del continent europeu) i la de l'hivern del 1990, amb 2,8 °C per sobre de la mitjana. En sentit contrari, les anomalies fredes (negatives) més importants són la de l'hivern de 1963, que se situà en -2,5 °C per sota de la mitjana, i la de la tardor de 1974, amb una anomalia de -2,2 °C.

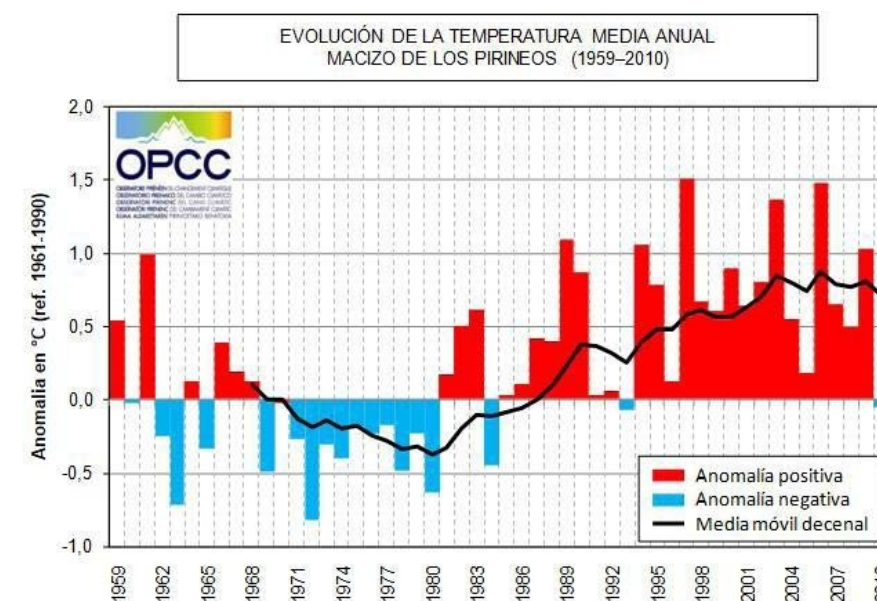


Figura 1.2.1 Evolució de la temperatura mitjana anual al conjunt dels Pirineus durant el període 1959-2010. Es mostra l'anomalia anual respecte del valor mitjà del període referència 1961-1990 (línia vermella: positiva; línia blava: negativa) i l'evolució de la mitjana mòbil per a un període de 10 anys (línia negra). Font: OPCC, 2013

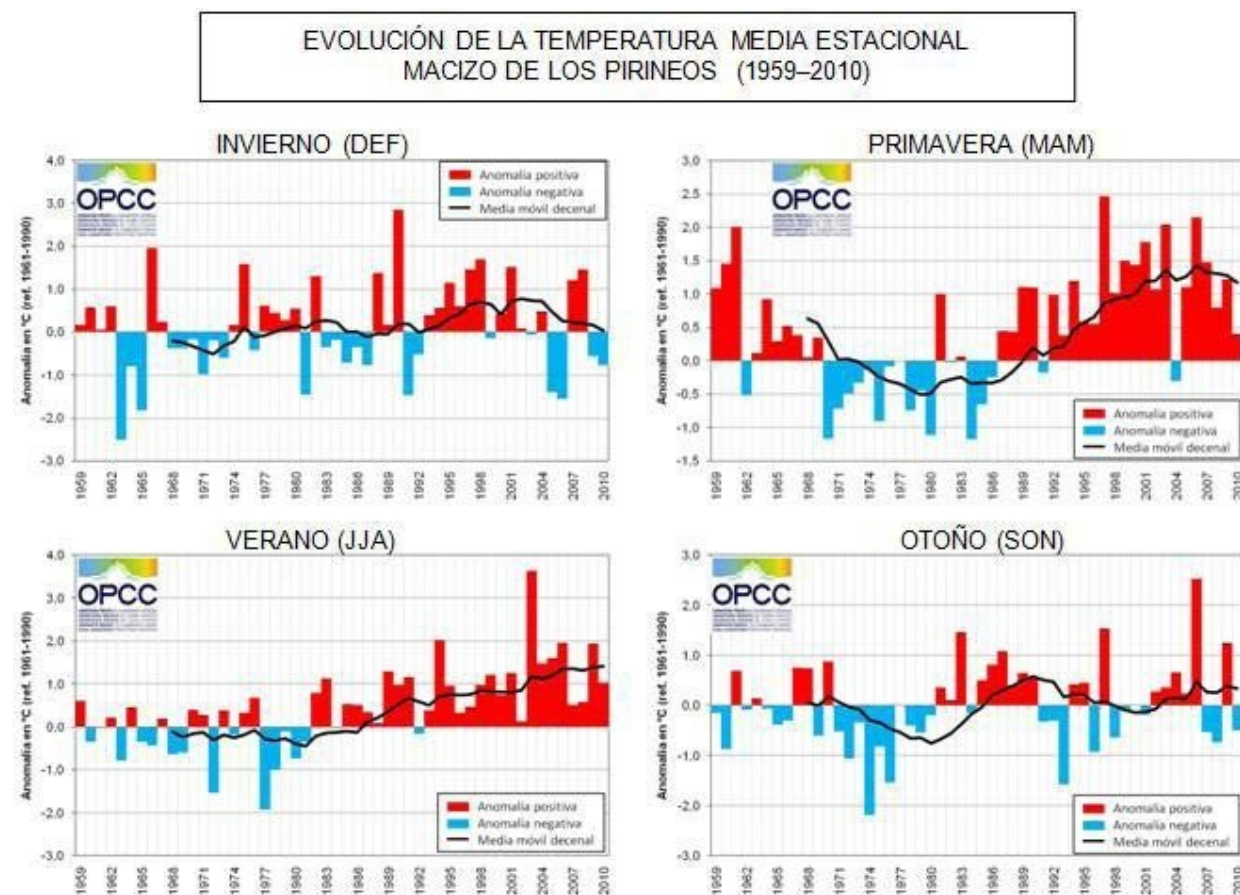


Figura 1.2.2 Evolució de la temperatura mitjana estacional al conjunt dels Pirineus durant el període 1959-2010. L'anomalia anual es calcula en relació amb el valor mitjà del període referència 1961-1990 (línia vermella: positiva; línia blava: negativa) i l'evolució de la mitjana mòbil per a un període de 10 anys (línia negra). Font: OPCC, 2013

La tendència a l'escalfament sembla que es mantindrà al llarg del segle XXI i, a escala temporal anual, podria oscil·lar entre els 2,8 °C i 4 °C, segons els pitjors escenaris. A més, els efectes del canvi climàtic seran més pronunciats a la vessant meridional de la serralada i a les zones costeres (López Moreno et al, 2008). Tanmateix, s'ha de reconèixer que la nostra capacitat per a estimar amb la precisió adequada els possibles canvis futurs és molt limitada.

1.2.2 Evolució de la precipitació mitjana anual i estacional

Els patrons temporals i espacials de la precipitació demostren una certa tendència cap a la disminució dels totals pluviomètrics i, en particular, cap a un descens en la freqüència dels esdeveniments de major intensitat i una major freqüència de temporades seques de llarga durada. Tanmateix, l'elevada diversitat espacial de la

regió pirinenca obliga a prendre's aquests patrons de canvi amb reserves, ja que la modificació que introdueix el relleu de la circulació atmosfèrica pot ésser molt rellevant.

Això sembla observar-se a Andorra, on Esteban et al(2012) confirmen tendències decreixents i estadísticament significatives per al període 1935-2008, que fins i tot es generalitzen i reforcen entre 1950 i 2008. En canvi, als índexs de precipitació no se'n detecta cap amb tendència significativa per al període 1935-2008, mentre que alguns d'ells sí que presenten valors decreixents amb significació estadística per al subperíode 1950-2008. Al sector central dels Pirineus espanyols, Pérez Zanón et al(2016) observen una important variabilitat interanual, sense tendència significativa, amb alguna diferència entre el comportament estacional. El percentatge d'anys amb precipitacions anuals normals disminueix al període 1950-2013 en comparació amb el període 1910-1949; també augmenten els anys secs i

humits. El principal descens s'observa a l'hivern, al voltant d'un 2,25 % per dècada, xifra que coincideix amb la recerca de López Moreno et al(2005), que va identificar una disminució notable de la capa de neu per al període 1950-1999. En canvi, es detecta un augment a la tardor del 2,25 % per dècada.

La disminució de pluges es constata igualment als Pirineus espanyols al llarg de la segona meitat del segle XX, tant en volum total com en nombre de dies de precipitació, temporades seques i precipitacions extremes: en el Pirineu central s'hi comprova que la disminució és més gran a la primavera i a l'estiu; a la tardor hi ha pocs observatoris que mostrin tendències significatives; mentre que a l'hivern es constata un evident descens, encara que amb marcats contrastos espacials (Vicente Serrano et al, 2007). En el Pirineu i Prepirineu oriental sembla també evident el descens de la precipitació anual des de 1950, amb una tendència estadísticament significativa entre el 3 i 5 % per decenni; i de fins al 8% per decenni a l'estiu (BAIC, 2018).

La disminució de pluges es constata, igualment, als Pirineus aragonesos al llarg de la segona meitat del segle XX, tant en volum total com en nombre de dies de precipitació, les temporades seques i les precipitacions extremes (Vicente Serrano et al, 2007). En aquest sector pirinenc, s'hi comprova que la disminució és més gran a la primavera i a l'estiu, mentre que a la tardor hi ha pocs observatoris que mostrin tendències significatives. A l'hivern es distingeix un marcat contrast espacial, amb un descens als Pirineus centrals, si bé a la regió oriental, les tendències no són significatives o, fins i tot, són positives.

Aquestes anàlisis coincideixen, en bona part, amb els resultats de l'estudi de l'acció Clima de l'OPCC per al conjunt dels Pirineus, amb dades de 101 sèries per al període 1959-2010. Als darrers 50 anys, el descens de la pluviometria anual és d'un 2,5 % per dècada. El valor és estadísticament significatiu, però presenta una gran variabilitat interanual: durant les darreres dues o tres dècades, han predominat els anys secs amb quantitats anuals de precipitació força inferiors a la mitjana del període de referència, seguits de diversos anys plujosos, que destaquen per damunt del terme mitjà. Quant a les diferències espacials, la disminució de la precipitació anual és més gran a la vessant sud que al nord, tot i que els contrastos no són importants. Els anys especialment plujosos de la sèrie analitzada van ser l'any 1992 (amb una mitjana d'un 23,2 % superior a la del període de referència 1961-1990), així com els anys 1979 i 1996. Paral·lelament, els anys més secs de les darreres cinc dècades són el 1989 (un 23,1 % inferior a la mitjana de referència), el 1985 i el 1983. L'indicador per a les quatre estacions de l'any no té un comportament clar, si bé en totes s'hi observa una lleugera disminució,

una mica més marcada a l'hivern i a l'estiu. Cal destacar que les tendències estacionals no són estadísticament significatives, de manera que d'aquesta escala temporal no se'n poden extreure conclusions gaire sòlides. S'observa una gran variabilitat interanual a totes les estacions de l'any, amb períodes secs intercalats amb estacions plujoses, si bé durant les dues últimes dècades hi han predominat els episodis de períodes secs, com fou el cas dels hiverns dels períodes 1989-1993 i 2005-2008. Això no obstant, i amb la prudència necessària per a la interpretació dels resultats, aquest patró general de descens pluviomètric es pot posar en relació amb comportaments semblants observats en d'altres regions de l'àrea mediterrània.

1.2.3 Evolució del mantell de neu als Pirineus

Les limitacions mencionades en termes d'informació climàtica disponible a zones d'alta muntanya es fan encara més patents quan ens referim a l'existència de registres amb longitud i qualitat suficients per analitzar l'evolució del mantell de neu als Pirineus al llarg de les últimes dècades. Aquest fet explica l'absència d'una avaluació global adequada de les tendències del mantell de neu per al conjunt de la serralada. Fins avui, l'única informació disponible a la vessant espanyola se sustenta en les sèries sintètiques generades a partir d'una relació estadística robusta entre les sèries climàtiques de la zona i les dades del gruix de neu en una xarxa de balises on s'hi mesura el mantell de neu de la vessant sud dels Pirineus centrals (figura 6). Aquestes sèries van permetre inferir un descens estadísticament significatiu del mantell de neu en aquest sector per al període 1950-2000 (López-Moreno, 2005). La reducció es confirmà per al període 1950-2010 (figura 6) en un estudi posterior (García-Ruiz et al, 2011); el descens també va quedar demostrat per una pèrdua significativa del senyal nival al règim dels rius de la vessant sud dels Pirineus (Morán-Tejeda et al, 2013, Sanmiguel-Valladolid, 2017).

La disminució de les precipitacions als mesos hivernals sembla la causa principal de la reducció del mantell de neu. Tanmateix, aquestes tendències semblen sobreimposades a una elevada variabilitat interanual, que s'explica per les fortes oscil·lacions de les temperatures i les precipitacions amb el temps. Aquesta variabilitat s'interpreta, fonamentalment, per la freqüència anual dels diversos tipus de temps al sud-oest europeu durant els mesos d'hivern, controlats en gran mesura per l'Oscil·lació de l'Atlàntic Nord (NAO, López-Moreno et al, 2011). Així, una major abundància de neu a la vessant sud dels Pirineus centrals s'associa a una major freqüència de fluxos de l'oest, sud-oest i nord-oest que es produeixen, fonamentalment,

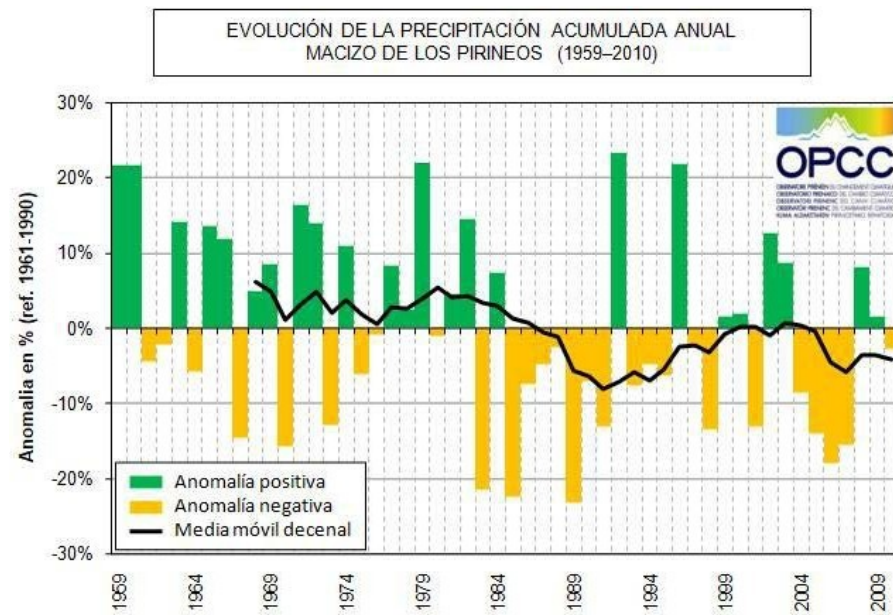


Figura 1.2.3. Evolució de les precipitacions anuals al conjunt dels Pirineus durant el període 1959-2010. L'anomalia anual es calcula en relació amb el valor mitjà del període referència 1961-1990 (línia vermella si és positiva; línia blava si és negativa) i l'evolució de la mitjana mòbil per a un període de 10 anys (línia negra). Font: OPCC, 2013

EVOLUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN ACUMULADA ESTACIONAL MACIZO DE LOS PIRINEOS (1959-2010)

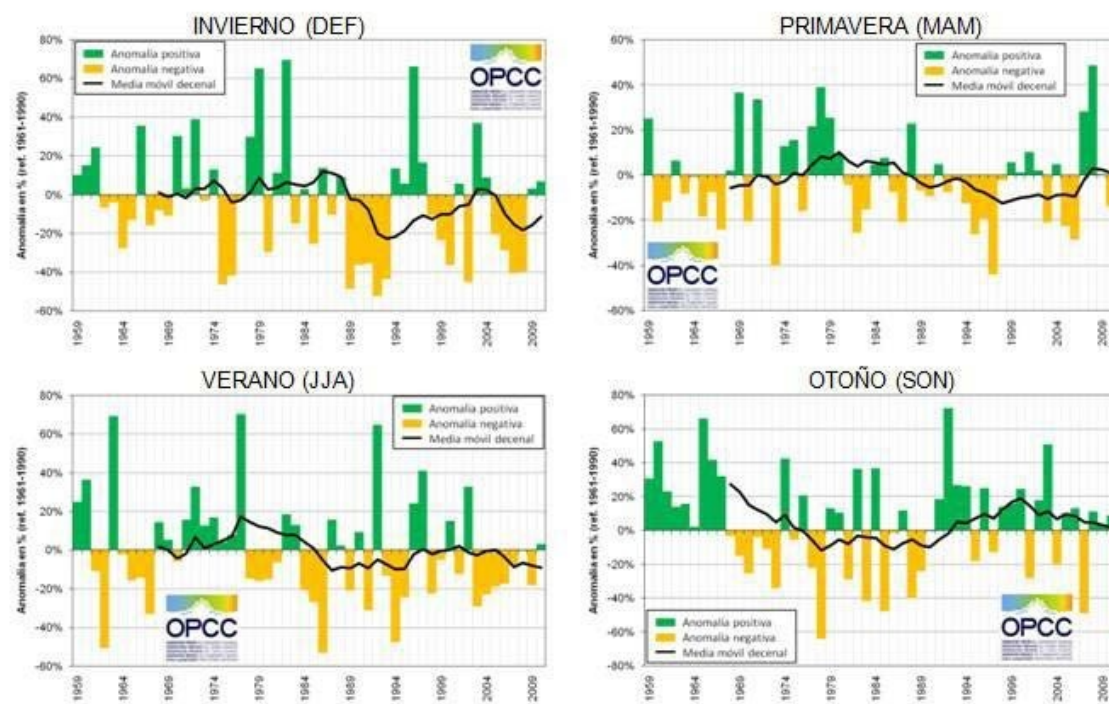


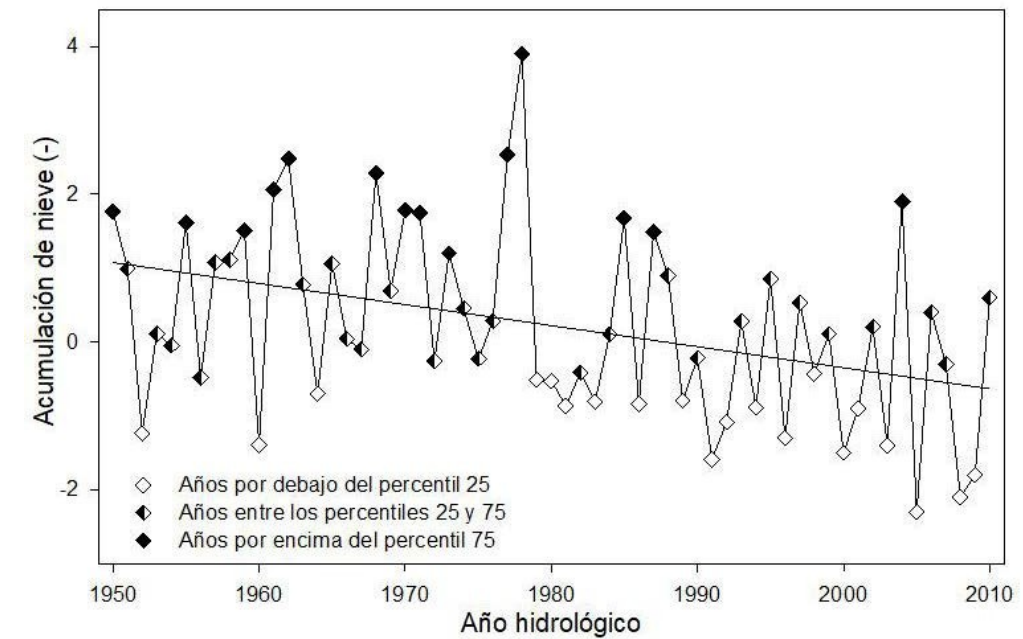
Figura 1.2.4. Evolució de les precipitacions anuals al conjunt dels Pirineus durant el període 1959-2010. L'anomalia anual es calcula en relació amb el valor mitjà del període referència 1961-1990 (línia vermella si és positiva; línia blava si és negativa) i l'evolució de la mitjana mòbil per a un període de 10 anys (línia negra). Font: OPCC, 2013

als anys on l'índex NAO és negatiu (López-Moreno i Vicente-Serrano, 2006, Buisán et al, 2015). Si bé l'índex NAO ha mostrat una tendència positiva a llarg termini, té una forta variabilitat decennal (Vicente-Serrano i López-Moreno, 2008), fet que explica que a les últimes dècades hi hagi hagut anomalies negatives freqüents que han dut a la serralada pirinenca una important innivació, sobretot a les cotes altes. De fet, quan s'analitzen sèries de neu de les últimes dues dècades, la major part dels observatoris no mostren cap tendència estadísticament significativa i, fins i tot, assenyalen una lleu tendència cap a l'increment (Buisán et al, 2015).

Malgrat que no es disposa d'estudis específics per a la vessant francesa dels Pirineus, l'existència de tendències comunes a les precipitacions i les temperatures a les dues vessants suggereixen que s'hi ha produït un descens de l'acumulació de neu si es considera a llarg termini, però amb un senyal molt variable durant les últimes dues dècades.

IDEES CLAU

- Al conjunt dels Pirineus, la temperatura mitjana anual ha mostrat un clar increment, estimat en prop de 0,2 oC per dècada, amb poques diferències entre les dues vessants de la serralada.
- L'augment és molt clar a partir dels anys 80, i l'última dècada ha esdevingut la més càlida des que hi ha registres instrumentals.
- A escala estacional, l'ascens més significatiu s'ha produït a l'estiu, amb 0,4 oC per dècada, i ha estat una mica inferior a la primavera, al voltant dels 0,2 oC, amb increments més moderats a la tardor i a l'hivern.
- S'observa una tendència de disminució dels volums anuals de precipitacions a causa del descens detectat dels totals d'hivern i estiu, tot i que no hi ha una tendència ben definida. Hi ha diferències espacials significatives i la variabilitat interanual presenta magnituds particularment elevades.
- En gran mesura, aquests resultats coincideixen amb els resultats observats en regions veïnes i amb la tendència general del clima a l'Europa mediterrània.



Evolució del mantell de neu (en metres) al mes d'abril, entre 1959 i 2010, simulat a partir de la relació entre temperatura i precipitació hivernal i l'acumulació de neu en una balisa del Canal d'Izas, Vall d'Aragó. Font: Projecte OPCC, 2013.

1.3 Projeccions de canvi climàtic als Pirineus

L'estudi del sistema climàtic i de la seva evolució futura es realitza, normalment, mitjançant l'ús de models climàtics. Aquests models són representacions numèriques del sistema climàtic, basades en les propietats físiques, químiques i biològiques dels seus components, les seves interaccions i els seus processos de realimentació. Quan aquests models engloben tot el sistema, es parla de models climàtics globals. Tanmateix, es tracta de models que, actualment, no disposen de la resolució necessària per a determinats estudis i, per tant, és necessari recórrer a mètodes de regionalització. Aquests mètodes solen agrupar-se en dos grans grups: els mètodes dinàmics i els mètodes estadístics. Els primers engloben els models regionals, que són models climàtics però aplicats a una regió determinada.

Entre les causes que poden induir un canvi al clima, s'hi troben l'alteració de la composició de l'atmosfera global; hi ha evidències que demostren l'existència de l'alteració a conseqüència de l'activitat humana. Per tal d'incorporar els possibles efectes d'aquestes alteracions als models climàtics, la comunitat científica ha definit un grup d'escenaris denominats Trajectòries de Concentració Representatives (Representative Concentration Pathways, RCP). Aquests escenaris se centren en les emissions antropogèniques i representen el forçament radiatiu total calculat per a l'any 2100 respecte l'any 1750 (per exemple, l'RCP 2.6 significa 2,6 W/m²). Es basen en una combinació de models d'avaluació integrats, models climàtics simples, models de química de l'atmosfera i models de cicle de carboni. A més, poden contemplar una varietat de polítiques climàtiques, és a dir, cada RCP pot ésser el resultat de diferents combinacions de futurs econòmics, tecnològics, demogràfics i polítics. Les simulacions que s'obtenen amb aquests escenaris constitueixen les denominades projeccions climàtiques (IPCC, 2013). A la regió pirinenca, les projeccions s'estan duent a terme amb dues metodologies complementàries que parteixen d'algoritmes dinàmics i estadístics, així com en la generació d'anàlisis de referència de les temperatures i la precipitació diàries amb una alta resolució horitzontal (malla de 5 km) (Peral et al, 2017) i vertical (reanàlisi SAFRAN per a trams d'altitud de 300 m) (Verfaillie et al, 2017). Les projeccions s'han obtingut a partir de les sortides d'un conjunt de models climàtics globals (GCM) del CMIP5 (19 models) i del conjunt de models climàtics regionals (RCM) d'Euro-Cordex (13 combinacions GCM/RCM), tenint en compte quatre escenaris d'emissions (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 i RCP

8.5). Aquest conjunt de projeccions permet explorar les incerteses associades als escenaris d'emissions, als models climàtics i a les tècniques de regionalització. A partir d'una avaluació preliminar d'aquestes projeccions, una primera aproximació probabilística de predicció del clima futur ofereix els resultats següents:

- Les temperatures màximes i mínimes diàries augmentaran al llarg del segle XXI d'acord amb les tres RCP analitzades (RCP 8.5, RCP 6.0 i RCP 4.5) (figura 1.3.1. a, b), a totes les estacions de l'any i a tota la zona pirinenca. Aquest augment serà més ràpid en el cas de l'RCP 8.5, associada a escenaris més emissius al llarg d'aquest segle.
- Les incerteses associades a les RCP i als models climàtics globals per a les temperatures augmenten al llarg del segle, tal com posa de manifest la figura 1.3.1. i s'aprecia tant una separació entre les línies d'evolució (entre RCP), com en l'increment de les zones ombrejades (entre models climàtics globals).

- Quant a l'evolució de les precipitacions futures, d'acord amb els escenaris analitzats i la metodologia empleada, no s'obtenen canvis significatius al llarg del segle XXI, i les diferents condicions d'emissió tenen poca influència sobre l'evolució de la pluviometria (figura 1.3.1c). El nombre de models que indiquen un augment de les precipitacions és similar al nombre de models que mostren un descens d'aquestes. Les incerteses van augmentant al llarg del segle, sobretot en el cas de l'RCP 8.5.

Si prenem finestres de 15 anys centrades als anys 2030, 2050 i 2090, i si estimem la incertesa lligada als models a través dels percentils 17 i 83, obtenim que:

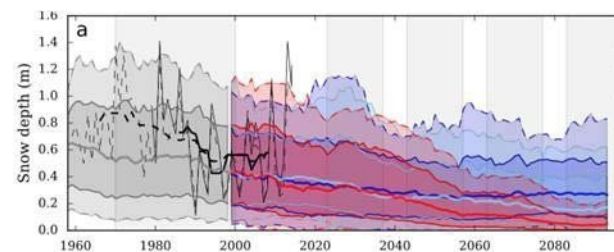


Figura 1.3.2 Evolució de la distribució estadística del gruix mitjà de neu als Pirineus centrals (altitud 1.800 m) a partir de la sèrie de l'observatori de La Mongie (línia negra contínua), les simulacions històriques (línia gris) i de la reanàlisi Safran (línia negra puntejada) per al futur del conjunt EURO-CORDEX amb les RCP 2.6 (blau fosc), RCP 4.5 (blau clar) i RCP 8.5 (vermell). Font: Météo-France

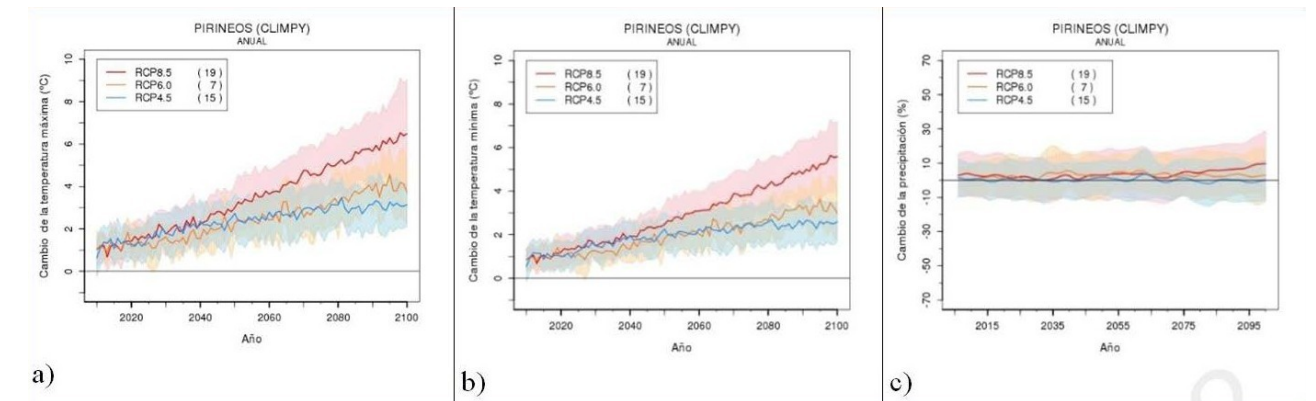


Figura 1.3.1 Evolució de l'anomalia mitjana anual de la (a) temperatura màxima, (b) temperatura mínima i (c) precipitació mitjana als Pirineus. Font: projecte CLIMPY.

- Per a l'horitzó 2030, el canvi del valor de mitjana anual de la temperatura màxima respecte al període de referència (1961-1990) podria oscil·lar, de mitjana i per a la zona pirinenca, entre 1 °C i 2,7 °C per a l'RCP 8.5 (valors molt semblants als que s'obtenen per a les altres RCP). Per a la temperatura mínima, s'obtenen augment semblants o lleugerament més baixos: entre 0,9 °C i 2,2 °C per a l'RCP 8.5.

- Per a l'horitzó 2050, l'escalfament seria una mica més elevat, amb un grau d'incertesa cada cop més gran per l'augment de les temperatures. Així, per a la temperatura màxima, les forquilles anirien de 2,0 °C a 4,0 °C i d'1,4 °C a 3,3 °C per a les RCP 8.5 i RCP 4.5 respectivament, mentre que per a la temperatura mínima, serien d'1,7 °C a 3,3 °C i d'1,2 °C a 2,8 °C. L'augment de les temperatures mínimes continua essent lleugerament menor al de les temperatures màximes.

- Per a finals de segle, els rangs de valors s'amplien encara més, tal com passa amb la intensitat dels canvis. A més, la separació entre les evolucions associades a les RCP és encara més clara. Per a la temperatura màxima de l'RCP 8.5, el seu canvi anual se situaria de mitjana entre 4,3 °C i 7,1 °C, mentre que per a l'RCP 4.5, oscil·laria entre 1,9 °C i 4,2 °C. Per a la temperatura mínima, els intervals corresponents se situarien entre 3,6 °C i 6,0 °C en el primer cas i 1,6 °C i 3,5 °C en el segon.

Les projeccions del canvi climàtic per a la neu es realitzen a partir d'aquests escenaris climàtics i permeten caracteritzar-ne l'evolució futura respecte al

IDEES CLAU

- Les projeccions futures del clima a la zona pirinenca mostren un augment progressiu tant de les temperatures màximes com de les temperatures mínimes al llarg del segle XXI. Aquest augment serà més ràpid als escenaris més emissius.
- L'escalfament també indicarà una disminució tant del gruix de la neu com de la longitud del període durant el qual la neu cobreix el sòl.
- Per al cas de la precipitació, l'acord entre les projeccions és menor que per a la temperatura i no poden apreciar-s'hi canvis significatius.

clima actual (Verfaillie et al, 2018). Els primers resultats per als Pirineus indiquen un descens significatiu del gruix de neu, tot i que conserven una forta variabilitat interanual. Així, a 1.800 metres d'altitud als Pirineus centrals (figura 1.3.2), el gruix mitjà de la neu podria disminuir a la meitat a l'horitzó 2050 respecte de la referència actual, mentre que el període de permanència de la neu al sòl es reduiria en més d'un mes, compartit entre la tardor i la primavera al llarg de l'estació freda. Tanmateix, aquestes xifres varien molt amb l'altitud, amb tendència a la reducció de manera sensible per damunt dels 2.000 metres d'altitud i també depenent dels escenaris d'emissió considerats (López-Moreno et al, 2009).

2. L'impacte del canvi climàtic en els sectors biofísics

Coordinadors: Blas Valero-Garcés (IPE-CSIC)

Autors: Blas Valero-Garcés (IPE-CSIC), Didier Galop (EcoLab-CNRS), Lluís Camarero (CEAB-CSIC), Jordi Catalán (CREAF), Ana Moreno (IPE-CSIC), Fernando Barreiro-Lostres (IPE-CSIC), Juan Ignacio López (IPE-CSIC), José María García-Ruiz (IPE-CSIC), Graciela Gil-Romera (IPE-CSIC), Mario Morellón (Universidad de Cantabria), Penélope González-Sampériz (IPE-CSIC)

RESUM

Els canvis en el clima durant l'Holocè (darrers 11700 anys) han tingut impactes importants en el territori pirinenc i els seus sistemes biofísics. Els canvis en la disponibilitat hídrica i en la coberta vegetal han estat particularment significatius, així com els de la dinàmica de la criosfera i els processos superficials d'erosió i transport de sediments. A escala mil·lenària, l'Holocè presenta una estructura en tres parts: una fase inicial amb un desenvolupament progressiu del bosc i la intensificació dels processos superficials d'erosió i transport de sediments fins fa uns 8000 anys, segueix una segona amb el desenvolupament màxim del bosc en l'estatge montà, atenuació dels processos erosius i menys disponibilitat hídrica fins fa uns 4500 anys, i la tercera fase final relativament humida fins l'actualitat. L'impacte en el territori de les fases més càlides i seques durant l'Anomalia Climàtica Medieval (900-1300 CE), i les més fredes i humides de la Petita Edat del Gel (1400-1850 CE) van ser fortament modulades per l'activitat antròpica. Els canvis recents mostren les sinèrgies entre l'Escalfament Global i la Gran Acceleració.

Durant l'Holocè (darrers 11700 anys) s'han produït importants oscil·lacions climàtiques que han generat canvis de diferent intensitat i duració en la distribució de la vegetació, els processos d'erosió del sòl i generació d'avingudes, la dinàmica dels ecosistemes de muntanya, els recursos hídrics i, fins i tot, de les activitats humanes en els Pirineus (García-Ruiz et al., 2015). En aquesta secció resumim els principals impactes sobre la hidrosfera, criosfera, biosfera i les societats humanes durant aquest període, basats en l'estudi de dipòsits glacials, fluvials, lacustres i d'espeleotemes.

2.1 El canvi climàtic durant l'Holocè

Paleohidrologia

L'augment de la temperatura i de la humitat a escala global a l'inici de l'Holocè es va reflectir en una pujada del nivell d'aigua dels estanys en les zones més elevades dels Pirineus i amb una influència atlàntica més gran. No obstant això, en les zones a altitud més baixa, més sensibles a la sequera estiuenca, l'augment de temperatures i el màxim de insolació estiuenca donaren lloc a una evaporació més gran, i les condicions àrides de la fase freda del Younger Dryas (12900-11700 anys BP) es perllongaren i intensificaren, tot retardant l'increment d'humitat durant dos mil·lennis més, fins fa uns 9500 anys. A escala mil·lenària, l'evolució paleohidrologica de l'Holocè als Pirineus presenta una estructura "tripartita" (González-Sampériz et al., 2017), amb una fase humida inicial seguida d'una de seca y, finalment, d'una altra de humida. En conjunt, l'Holocè inicial (11700-8000 anys BP) constitueix el període de disponibilitat hídrica més gran en tot el territori pirinenc, amb un descens progressiu de la mateixa durant l'Holocè mitjà (a partir de 5500-4500 anys BP), amb condicions particularment seques al voltant de 3000 – 2500 anys abans del present. Posteriorment, durant els darrers 2000 anys, va tenir lloc una certa recuperació dels nivells dels estanys.

A més d'aquesta variabilitat a escala mil·lenària s'han enregistrat també canvis hidrològics més ràpids (a escala de segles o inferior), amb augments en l'escorrentia superficial atribuïts a esdeveniments de precipitació intensa o alta fusió nival. En general, aquests episodis es correlacionen amb fases fredes en l'Atlàntic Nord i a la Conca Mediterrània. Les dues últimes grans oscil·lacions climàtiques (Anomalia Climàtica Medieval, ACM i Petita Edat de Gel, PEG), enregistrades durant l'últim mil·lenni, varen tenir una repercussió molt significativa en la hidrologia dels Pirineus. L'ACM (900-1300 CE) es va caracteritzar per una davallada generalitzada del nivell dels estanys, amb evaporació i salinitat més altes en els de zones baixes i una gran variabilitat en la intensitat de l'escorrentia superficial. Pel contrari, durant la PEG (1300-1800 CE) es va produir una pujada generalitzada del nivell dels estanys, en el context d'una fase de re-avanç glacial (Morellón et al., 2012). Aquesta successió de condicions àrides i humides ACM-PEG durant el darrer mil·lenni s'ha relacionat amb canvis en l'Oscil·lació de l'Atlàntic Nord (NAO), un mecanisme de variabilitat climàtica que provoca precipitacions d'origen Atlàntic més grans en zones septentrionals d'Europa durant

les fases de NAO+, i en zones meridionals (com els Pirineus) durant les fases de NAO-. Les reconstruccions disponibles indiquen que durant la ACM predominaren condicions de NAO+, amb més precipitacions en l'Atlàntic Nord, mentre que durant la PEG predominaren les fases de NAO-, amb precipitació més gran en als Pirineus. Tanmateix, cal tenir en compte que l'efecte local de la NAO sobre les condicions d'aridesa a les nostres latituds està subjecte a una important variabilitat decennal (Vicente-Serrano i López-Moreno, 2008). El registre laminat de l'estany de Montcortès, suggereix que el començament (1347- 1400 CE) i final (1844-1894 CE) de la PEG varen ser períodes de precipitacions més freqüents i intenses (Corella et al., 2017).

Finalment, durant el segle XX i en el context de l'Escalfament Global actual, hi ha evidències d'una davallada en la disponibilitat hídrica als Pirineus, amb nivells més baixos en els estanys a més baixa altitud i amb una freqüència més baixa d'esdeveniments de precipitació intensa. A més, el cabal dels rius pirinencs ha disminuït en les últimes dècades, però en aquest cas, a més de a raons climàtiques, el descens ha de ser atribuït a l'augment de la superfície arbrada després de l'abandonament rural (Beguería et al., 2003; García-Ruiz et al., 2016).

Erosió i processos superficials

L'estudi de sediments fluvials ha permès reconstruir períodes de més intensitat d'inundacions en els rius de la península ibèrica (Benito et al., 2008). En les conques Atlàntiques les avingudes es corresponen a pluges intenses associades a fronts atlàntics controlats per la NAO. En les Mediterrànies, les precipitacions extremes son induïdes per sistemes convectius durant la tardor. L'increment de la torrencialitat enregistrat en estanys a cota alta durant l'Holocè inicial (Basa de la Mora: Pérez-Sanz et al., 2013; Marboré: Oliva- Urcía et al., 2018) o en altituds mitjanes en períodes més recents (Montcortès: Corella et al., 2016) està associat a una disponibilitat hídrica més gran i de marcada estacionalitat. En concret, els sediments laminats de l'estany de Montcortès proporcionen el primer registre amb resolució anual d'esdeveniments de precipitació intensa (>90 mm) durant els últims 3000 anys i mostren que en les zones dels Pirineus amb influència Mediterrània, les pluges torrencials han sigut més freqüents durant períodes més càlids (ACM) que durant els freds (PEG).

La variabilitat hidro-climàtica més alta es va registrar durant la transició entre l'Anomalia Climàtica Medieval (ACM) i la Petita Edat de Gel (PEG) en el segle XIV. Durant algunes de les fases de la PEG amb hiverns més secs i freds, el cabal dels rius hauria disminuït i les avingudes serien menys freqüents i més irregulars en comparació a la ACM (900-1300 CE).

Los cambios más recientes en la intensidad de los procesos erosivos y el transporte de sedimentos por la red fluvial, están fuertemente determinados por los cambios en el uso del suelo acontecidos en las últimas décadas (abandono rural, reforestación). La tendencia de las últimas décadas hacia un mayor déficit hídrico y menos eventos extremos no es inusual en el contexto del Holoceno tardío en el Mediterráneo Occidental. Sin embargo, las series temporales más largas sugieren que la frecuencia de las lluvias torrenciales puede aumentar en un escenario de calentamiento global (Corella et al., 2016).

Evolució de la criosfera

Probablement la majoria de les glaceres pirinènques varen desaparèixer durant els primers mil·lennis de l'Holocè o varen quedar restringides als circs més elevats (García-Ruiz et al., 2014). Moltes d'aquestes glaceres es van expandir durant el Neoglacial (fa uns 5000 anys) i en diversos circs s'han documentat fluctuacions posteriors com el retrocés glacial durant l'Edat del Bronze i el període humit romà, i una curta expansió durant la Baixa Edat Mitja entre els anys 600 i 800 CE. Durant la PEG moltes glaceres pirinènques varen avançar fins assolir l'extensió màxima de tot l'Holocè. A mitjans del segle XIX finalitzà la PEG i les glaceres pirinènques acusaren molt aviat l'escalfament posterior. Des de 1850 les glaceres han retrocedit de forma quasi continuada, malgrat que han hagut breus períodes d'estabilització o fins i tot de certa recuperació. La degradació de les glaceres ha estat particularment acusada des de 1980. En segle i mig han desaparegut moltes d'elles, altres han passat a ser simples congesteres i, finalment, altres continuen dintre de la categoria de glaceres, però han experimentat notables disminucions en mida i gruix. L'evolució d'algunes glaceres i del mantell de neu en l'estatge subalpí mostra que fins i tot en anys amb innivació elevada les glaceres continuen retrocedint (García-Ruiz et al., 2015; López-Moreno et al., 2016). Petits sectors amb permafrost continuen sent presents per sobre de 2600 m s.n.m.,

(2) Per a les edats Before Present (BP) es considera l'any 1950 com el "present".

(3) Les edats "Common Era" (CE) i "Before Common Era" substitueixen a la notació tradicional en arqueologia d'AD i BC.

(4) (5) La agradació és l'acumulació de sediments en els rius, rierols o llacs. La denudació és l'erosió dels sòls i sediments de les conques de recepció.

on s'han identificat sòls poligonals, i fins a un total de 13 glaceres rocalloses estan encara actives.

Canvis en la vegetació

L'inici de l'Holocè en les zones dels Pirineus amb influència Atlàntica més gran donà pas a un fort desenvolupament del bosc en els estatges montà i subalpí. Les variacions entre el desenvolupament de coníferes i caducifolis en els primers mil·lennis revelen la ràpida resposta de la vegetació a les fluctuacions climàtiques. La marcada estacionalitat del clima durant aquest període i l'elevada evaporació en estiu va provocar que en zones d'influència Mediterrània el paisatge estèpic perdurés fins fa uns 9200 anys. A partir d'aquest moment un augment de les temperatures d'hivern i una disponibilitat hídrica més gran permeteren l'expansió del bosc caducifoli dominat principalment per roures i avellaners (González-Sampéris et al., 2017). Durant l'Holocè Mitjà, fa uns 8200 - 6000 anys, com a resposta a hiverns càlids i condicions més humides amb una distribució de la precipitació més uniforme al llarg de l'any, en els Pirineus centrals i orientals es va desenvolupar un bosc de tipus Mediterrani format per Quercus semi- caducifolis en l'estatge montà i va resultar afavorida la retirada de les coníferes i l'expansió en altitud del bosc de caducifolis, que es va poder establir en l'estatge subalpí (Leunda et al., 2017). El període entre fa 6000 i 4800 anys fou una fase de transició a nivell regional durant la qual l'estacionalitat es va ressaltar amb una intensificació de l'estació seca, que va ser particularment notable a altituds més baixes. Precisament en aquestes zones les comunitats més afectades foren les de caducifolis dels estatges alpí i subalpí, on es va produir una expansió dels pins, ginebrons i savines. L'establiment final d'unes condicions més àrides fa uns 4800 anys va causar la desaparició de masses d'arbres caducifolis importants de l'estatge montà i afavorí l'expansió de Quercus semi-caducifolis (coscolls) i perennifolis (alzines) i de Pinus (pins) a cotes més altes. La vegetació es va adaptar a condicions especialment àrides durant dos períodes: fa 2900 - 2400 anys i durant l'Anomalia Climàtica Medieval, entre 900-1300 CE. Durant les fases més fredes i humides de la Petita Edat de Gel es produïren canvis en l'estructura i composició dels boscos, en els que també va influir la intensitat més feble de les activitats humanes a la muntanya. El límit superior del bosc va experimentar un lleuger descens en les àrees en que es conservava de forma natural (Camarero et al, 2015). Des del final de la PEG, les activitats humanes i les modificacions en els usos del sòl semblen ser el principal motor de canvi de la vegetació en els Pirineus. Tanmateix, el creixement de la pinassa (*Pinus nigra*) per sobre del límit del bosc durant les últimes dècades en algunes zones del Parc Nacional d'Ordesa y Monte

Perdido (PNOMP) suggereix un ascens altitudinal de la vegetació que pot estar en part relacionat amb una pressió antròpica menys intensa, però sobre tot amb temperatures mitjanes més altes en altura que permeten el desenvolupament de la vegetació llenyosa.

Incendis

Els incendis són perturbacions que actuen com a reguladores dels ecosistemes i són modulats al seu torn per la dinàmica interna d'aquests. A la vessant sud dels Pirineus, en cotes entre els 1900 i 2200 m s.n.m, es troben una intensitat i freqüència més altes d'incendis al començament de l'Holocè (entre 10500 i 7700 anys BP) que seria causada per la màxima insolació estival durant l'Holocè inicial que hauria afavorit una aridesa més gran durant l'estiu i augmentat les probabilitats d'incendis. A més, l'expansió del bosc mesofític, proporcionaria la biomassa necessària per a aquesta freqüència més alta d'incendis d'origen natural en la línia de bosc dels Pirineus centrals (Gil-Romera et al., 2014). Durant l'Holocè Mitjà es redueix notablement la freqüència d'incendis en la vessant sud dels Pirineus, amb una activitat del foc moderada que podria haver estat vinculada a un maneig antròpic i a canvis en la composició del bosc. Tanmateix, en la vessant nord la freqüència de focs és més baixa entre 8500 - 5500 cal yr BP, associada a un clima més càlid i sec (Rius et al., 2012). Des del final de l'Edat del Bronze i durant l'Edat de Ferro i el període romà (essencialment entre 2500-1800 anys BP) s'enregistra una presència humana creixent en la muntanya. Els incendis d'origen humà apareixen sobretot a partir de l'Edat del Bronze, i es correlacionen con conreus nòmades, la metal·lúrgia i el pastoreig, especialment entre 2900 i 2650 anys BP i entre 1850 i 1550 anys BP. Des de llavors, l'impacte humà sobre la vegetació i, conseqüentment, sobre la dinàmica dels incendis ha estat sensiblement més gran (Rius et al., 2012; Gil-Romera et al., 2014).

Es pot destacar que la variabilitat temporal en l'activitat del foc durant l'Holocè en la vessant sud dels Pirineus pot estar relacionada amb patrons espacials locals de distribució del combustible i la seva inflamabilitat, així com amb accions antròpiques locals i no necessàriament regionals. Malgrat això, sí que es pot assumir que existeix una diferència altitudinal en l'ocurrència d'incendis, sent més freqüent i precoç en les zones més baixes, on el combustible i la continuïtat de la coberta vegetal no haurien sigut limitants i on els usos humans haurien permès un impacte més gran.

Canvis Ràpids

Els registres paleoambientals i paleoclimàtics mostren que els ecosistemes pirinencs i els processos

superficials són molt sensibles als canvis climàtics i han respost ràpidament a les fluctuacions del clima durant l'Holocè. Durant les fases de canvi climàtic ràpid definides a escala global (Mayewski et al., 2004) la vegetació, la disponibilitat hídrica, la criosfera i els processos superficials es van veure afectats de manera ràpida i el seu impacte en el territori pirinenc està documentat en alguns registres. Un esdeveniment d'aquestes característiques que va succeir fa 8200 anys és un dels més intensos i d'abast global, i va suposar una baixada de les temperatures i un augment de l'aridesa en les nostres latituds. Als Pirineus es va enregistrar una certa davallada en la proporció de caducifolis, més sensibles que les coníferes a l'augment de l'aridesa i la davallada de temperatures, així com un clar descens de la isoterma de 0°C, segons el registre de crisofícies de l'estany Redon (Pla i Catalan, 2011). Durant els últims 2000 anys, les ràpides transicions en precipitacions i temperatura durant l'ACM i la PEG (Giralt et al., 2017; Oliva et al., 2018) han tingut incidència en el territori pirinenc, cosa que demostra la vulnerabilitat dels ecosistemes de muntanya als canvis climàtics ràpids.

Canvi Climàtic i Impacte Humà

Diferents estudis mostren que durant els últims segles l'impacte humà en la vegetació, la hidrologia i l'erosió en els Pirineus són tan intensos que no sempre és fàcil separar-los de les respostes al clima. Les primeres evidències d'impacte humà significatiu en el paisatge pirinenc varen ocórrer durant el Neolític, encara que la interpretació d'alguns canvis en la vegetació pot ser tant que són deguts a la desforestació humana com que són una resposta a canvis climàtics (Galop et al., 2013). Ha estat durant els darrers 2000 anys quan la transformació del paisatge ha estat intensa i continuada, més en les terres baixes que en l'estatge subalpí on, per raons evidents, la pressió humana ha sigut més estacional i lligada al pastoreig. Els primers impactes clars d'activitat antròpica en altituds baixes apareixen fa uns 3100 anys amb una primera fase de desforestació i la presència de pol·len de cereal a Estanya (Morellón et al., 2008). Canvis en la composició de la vegetació en llocs a altitud més elevada s'han interpretat com una resposta a fluctuacions climàtiques o desforestació humana (Pérez-Sanz et al., 2013; Leunda et al., 2017).

Des de l'època medieval, són nombroses les evidències de canvis en el paisatge deguts a desforestació i activitats humanes. Fou durant l'Edat Mitja i en coincidència amb un període climàtic relativament més càlid - l'ACM - quan es van produir els grans canvis en el paisatge dels Pirineus, amb desforestació en els estatges subalpí i montà i augment dels conreus en

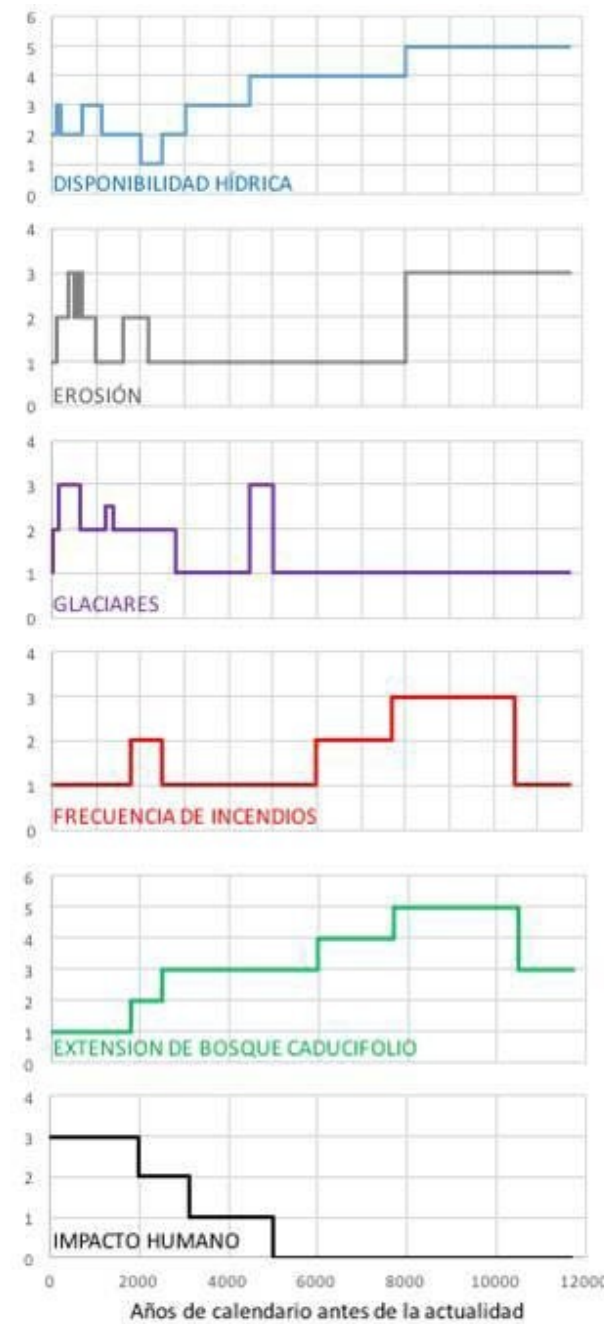


Figura 2.1.1 Resum dels impactes en el territori pirinenc associats al canvi climàtic durant l'Holocè (darrers 11700 anys). Escaleres qualitatives de més petit (0) a més gran. Font: Projecte REPLIM

les zones baixes. Aquesta desforestació transformà profundament el paisatge de l'alta muntanya pirinenca i, al seu torn, canvià el seu funcionament hidrològic i els processos geomorfològics. Durant la Petita Edat de Gel va disminuir la presència i activitats humanes en les zones més altes a causa de les condicions fredes en els cims pirinencs. No obstant això, en les zones de muntanya mitja el final de la PEG (mitjans del segle XIX) es correspon amb l'inici de la fase de màxima ocupació humana, que s'estendria fins a mitjans del segle XX. Des d'aleshores, l'Escalfament Global ha coincidit amb l'èxode rural i el despoblament de la muntanya.

ENQUADRAMENT 2.1.1. ELS PIRINEUS DURANT UN PERÍODE CLIMÀTIC MÉS CÀLID: L'ANOMALIA CLIMÀTICA MEDIEVAL

Durant la Baixa Edat Mitja i en coincidència amb aquest període climàtic relativament més càlid -l'Anomalia Climàtica Medieval (ACM, 900 – 1300 CE) – es varen produir grans canvis en el territori dels Pirineus, encara observables en l'actualitat. Una pressió humana més intensa en la muntanya causada per l'augment de la població fou paral·lela a una fase de temperatures més altes i una gran irregularitat hidrològica, amb una estacionalitat i torrencialitat més marcades i una presència més alta de fases més àrides. Durant aquesta època es detecta en l'estatge subalpí el descens de superfície ocupada pels boscos mesofítics i la presència més gran de pins, ginebrons i herbes de caràcter estèpic com la botja (*Artemisia*). En les terres baixes, té lloc una expansió dels conreus, especialment cereals, olivera, vinya, castanyer i noguera. Els prats alpins que caracteritzen el paisatge actual dels Pirineus en la vessant sud per damunt de 1600 m s.n.m. varen experimentar una notable expansió després de la desforestació de l'estatge subalpí. Aquesta desforestació i els canvis en els usos del sòl en els Pirineus transformaren profundament el paisatge de l'alta muntanya pirinenca i, al seu torn, canviaren el seu funcionament hidrològic i els processos geomorfològics. Ens pot servir l'ACM com un anàleg de la fase actual d'Escalfament Global? Tot i que les primeres fases de l'escalfament global en el segle XX es varen correspondre amb un descens de les activitats en l'alta muntanya a causa de l'abandonament rural, en l'actualitat el Canvi Global als Pirineus està protagonitzat per condicions més càlides i transformacions antròpiques intenses. Encara que les causes dels canvis climàtics no són idèntiques, ambdós períodes comparteixen un augment ràpid de la temperatura, una irregularitat hidrològica i una elevada pressió antròpica.

2.2 Biodiversitat de muntanya: fauna

Coordinadors: Juan Terrádez (CTP-OPCC),

Idoia Arauzo (CTP-OPCC).

Autors: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC)

Coautors: José Antonio Aauri (Oficina Técnica EUROPARC-España), Josep María Ninot (UB, IRBio), Bernat Claramunt (CREAF, Universitat Autònoma de Barcelona) Sofía Morcelle (SEO/BirdLife), Ricardo García-González, (IPE-CSIC), Guillem Masó Ferrerons (IPE-CSIC).

2.2.1 Canvis en la productivitat i abundància de les espècies

El canvi climàtic pot afectar la fisiologia d'un gran nombre d'espècies, ja que influeix en la seva productivitat i, per tant també, en la supervivència a llarg termini. La comunitat científica ha demostrat àmpliament la correlació que existeix entre les variables climàtiques i els paràmetres demogràfics de les espècies d'alta muntanya. En els ecosistemes de la regió biogeogràfica alpina, l'impacte del canvi climàtic en la fisiologia i productivitat de determinades espècies ha estat més evident que en altres regions biogeogràfiques. En aquests ambients, el clima és el principal factor regulador de l'ecosistema, i en conseqüència, les comunitats d'animals i plantes que hi habiten mantenen un delicat equilibri amb les variables climàtiques.

Impactes observats i previstos

La reducció de la magnitud i persistència de les nevades registrada durant les últimes dècades als Pirineus està afectant les diverses espècies que habiten ambients nevosos. Aquesta disminució afecta per exemple els grans mamífers d'altitud, com ara la camussa pirinenca o isard (*Rupicapra pyrenaica*). Diversos estudis han constatat la correlació que existeix entre els canvis demogràfics en la població pirinenca d'aquest animal ungulat i el nombre d'anys amb una coberta de neu inferior a un cert llindar (Jacobson et al., 2004; Willis et al., 2013; Kourky et al., 2015). Així per exemple, s'ha demostrat que els canvis fenològics en les espècies vegetals que serveixen d'aliment als isards, actuen com un senyal d'inici d'etapes importants en el seu cicle de vida, com ara la reproducció, la concepció o la durada de la gestació. Anàlogament, s'ha observat que determinades espècies d'aus característiques de les cotes altes, com per exemple la perdiu blanca, han patit alteracions en la seva fisiologia i abundància com a conseqüència del canvi climàtic. Concretament, García-González et al. (2016) han subratllat que l'augment de la temperatura pot reduir la quantitat de neu o el

RESUM

Les condicions climàtiques tenen un paper decisiu en la composició, estructura i funcionament dels sistemes naturals. Els ecosistemes d'alta muntanya, que es caracteritzen per tenir una gran riquesa d'espècies endèmiques amb un estret rang de distribució, mides poblacionals efectives baixes, necessitats d'hàbitat específiques i una capacitat de dispersió limitada, són especialment vulnerables a les variacions de les condicions climàtiques. De fet, a la muntanya, el clima és un dels principals reguladors del funcionament dels ecosistemes, ja que fins i tot petites variacions de les temperatures poden incidir en la distribució i abundància d'un gran nombre d'espècies. L'impacte del canvi climàtic en la fauna dels Pirineus pot manifestar-se de diferent maneres, com ara en: i. canvis generals en la fisiologia de determinades espècies (per exemple, adaptacions fisiològiques mitjançant processos microevolutius), ii. alteracions en la fenologia de les espècies (com per exemple variacions en el nombre d'esdeveniments reproductius, en la data d'eclosió dels ous o en la data d'inici i fi dels moviments migratoris), iii. variacions en l'abundància, composició i distribució geogràfica de les poblacions (que es manifesten mitjançant canvis latitudinals i altitudinals del rang de distribució de les diferents espècies) i que, juntament amb les alteracions fenològiques, poden produir iv. alteracions ecològiques més profundes com a conseqüència d'un desajust entre els cicles biològics d'espècies interconnectades entre sí (com ara els sistemes depredador-presa o planta -herbívor), que poden alterar el funcionament de tot l'ecosistema. A més a més, el canvi climàtic podria augmentar el risc d'invasió i/o expansió de determinades espècies exòtiques, ja que pot afavorir el transport i el posterior establiment (gràcies a les noves condicions climàtiques favorables i a la reducció de la competència interespecífica amb les espècies natives) d'aquestes espècies. D'altra banda, cal no oblidar que també existeixen diversos factors que actuen en sinergia amb els impactes climàtics directes, la gran majoria de naturalesa antròpica, la magnitud dels quals fa que esdevinguin un repte encara més important per a la conservació de la fauna pirinenca. Entre aquests factors cal destacar la destrucció i fragmentació de l'hàbitat, els canvis en l'ús del sòl, la sobreexplotació dels recursos hídrics, la contaminació atmosfèrica i de les aigües, l'abandonament de les activitats agropastorals i la introducció i difusió d'espècies exòtiques. L'acció combinada dels impactes antròpics i de l'impacte del canvi climàtic per mitjà de les alteracions indicades, pot modificar certs processos ecològics clau en els ecosistemes d'alta muntanya, fet que pot comprometre'n la pervivència, i limitar, a més a més, la seva capacitat per oferir béns i serveis a la societat.

període de temps amb neu, i per tant disminuir també l'extensió de les zones d'alimentació preferides per les perdius blanques. Un menor creixement de vegetació d'altitud incideix directament en la quantitat d'aliment disponible per a la perdiu blanca i, per tant també, en el seu estat fisiològic, èxit reproductiu i capacitat de supervivència. Segons Novoa et al. (2016), les variables que millor expliquen les diferències en l'èxit reproductiu d'aquesta espècie als Pirineus són la data del desglac total i el comportament de les pluges un cop s'ha produït l'eclosió de les postes a la primavera, variables que l'escalfament global està modificant (Buisan et al., 2015; Morán-Tejeda et al., 2017).

Els amfibis es troben entre els grups de vertebrats més vulnerables als canvis fisiològics induïts pel canvi climàtic. Els amfibis tenen una pell permeable, un cicle de vida bifàsic i ponen ous sense closca, cosa que els fa extremadament sensibles a petits canvis de temperatura i humitat (Carey i Alexander, 2003). S'ha demostrat que l'èxit reproductiu, les funcions immunitàries i el grau de sensibilitat a contaminants químics d'aquests animals poden veure's afectats d'una forma directa l'escalfament global (Pound et al., 2006; Araujo et al., 2011; Dastansara et al., 2017). Un dels efectes negatius més importants del canvi climàtic sobre la fisiologia dels amfibis són els canvis que es produeixen en el període de latència metabòlica durant la temporada hivernal. L'augment de la mortalitat i la disminució de la capacitat reproductiva de determinades poblacions de gripau comú (Bufo bufo), n'és un clar exemple: els hiverns cada vegada més suaus provoquen un escurçament del període de latència metabòlica hivernal i un empitjorament general de l'estat corporal d'un gran nombre d'individus (Reading, 2007). A més a més, les temperatures mínimes cada vegada més suaus, fan que aquests animals no entrin en un estat de latència total durant l'hivern, de manera que continuen consumint les seves reserves energètiques i reduint en conseqüència la seva massa corporal. La pèrdua de massa corporal incideix directament en la reducció de les probabilitats de supervivència (Bonardi et al., 2011; Caruso et al., 2014). Esdeveniments climàtics extrems, com ara les sequeres i les onades de calor, també estan generant efectes negatius en les poblacions de determinats amfibis. S'ha demostrat que l'onada de calor de l'any 2003 va generar impactes negatius considerables en la supervivència de la granota comuna (*Pelophylax perezi*) a Europa (Neveu, 2009). Piracés et al. (2015) han constatat descensos poblacionals interanuals significatius de les poblacions

de tritó pirinenc (*Calotriton asper*) en nou barrancs del Parc Nacional d'Ordesa i el Mont Perdut, el quals es troben directament relacionats amb els anys amb una major incidència d'esdeveniments climàtics extrems (principalment avingudes i sequeres).

Finalment, la fisiologia i el comportament dels invertebrats també poden veure's afectats pels canvis en les condicions climàtiques. És el cas, per exemple, de la processonària del pi (*Thaumetopoea pityocampa*). Les poblacions d'aquests animals han augmentat el seu èxit reproductiu durant els darrers anys i han ampliat també la seva àrea de distribució en determinades zones dels Pirineus gràcies a l'augment de les temperatures mínimes i de la reducció dels dies de pluja (Buffo et al., 2007; Rousselet et al., 2010; Taïgo et al., 2017).

2.2.2 Modificacions del cicle de vida (alteracions fenològiques) i de les interaccions entre espècies

Un dels efectes més evidents del canvi climàtic en la fauna són les alteracions en el cicle de vida (Knudsen et al., 2011). Esdeveniments importants en la vida dels animals, com ara la reproducció, la posta d'ous, la migració i la letargia, estan modificant el seu calendari com a conseqüència de l'augment de les temperatures. El cicle biològic d'un gran nombre d'espècies s'està modificant de forma significativa i el canvi climàtic sembla ser-ne la causa principal. Les respostes fenològiques al canvi climàtic difereixen molt entre les espècies, cosa que pot provocar una dessincronització en determinades interaccions clau entre elles. A més a més, aquests desajustos poden comportar també alteracions considerables en l'estructura de les comunitats d'alta muntanya. Les espècies migratòries i les espècies, tant terrestres com aquàtiques, la temperatura corporal de les quals depèn de la temperatura ambiental, són especialment vulnerables a aquests canvis (Dell et al., 2005; Jiguet et al., 2010; Parmesan, 2006; Dingemanse y Kalkman, 2008; Schlüter et al., 2010; Tryjanowski et al., 2010; Barthès et al., 2014). Els canvis fenològics, a part de ser un bon indicador del canvi climàtic, tenen una importància ecològica crítica, ja que poden influir en la capacitat competitiva de les diferents espècies, i per tant, en l'estructura de les comunitats i el funcionament de l'ecosistema.

Impactes observats i previstos

En el cas de les aus migratòries, la major variabilitat climàtica observada durant les darreres dècades està alterant els patrons migratoris de determinades espècies que resideixen de forma temporal als Pirineus (Walther et al., 2002; Rubolini et al., 2007; Panuccio et al., 2016). Entre els principals canvis que s'han documentat, hi trobem l'avançament de la data d'arribada al continent europeu a la primavera, observat en més de 100 espècies (Bradley et al., 1999; Rubolini et al., 2007), l'endarreriment de la partença a la tardor, i en general, els canvis en els patrons migratoris, especialment intensos en les aus migratòries de curta distància (Møller et al., 2008; Saiano et al., 2011; Panuccio et al., 2017). L'avançament de la data d'arribada a Europa s'ha relacionat amb un augment de les temperatures hivernals a l'Àfrica subsahariana, lloc on hivernen la majoria d'aquestes espècies. D'altra banda, l'endarreriment de la partença a la tardor sembla estar relacionat amb les elevades temperatures registrades als llocs d'arribada. En particular, Saiano et al. (2011) han calculat que l'avançament mitjà de la data d'arribada ha estat del voltant de 0,16 dies per any des del 1959. Determinades espècies presenten un valor màxim de fins a 0,27 dies per any.

D'altra banda, a Europa, el canvi climàtic sembla que afecta de diferent manera els diferents tipus d'aus migratòries. Així per exemple, la proporció d'individus que migren llargues distàncies està augmentant, en detriment del nombre d'individus residents i migradors de curtes distàncies (Møller et al., 2011). Diversos estudis preveuen que aquestes alteracions fenològiques s'intensificaran en el futur, i que fins i tot poden arribar a modificar notablement la proporció d'aus migratòries de llarga i curta distància a Europa (Bloom et al., 2012; Charmantier, 2014).

Els esdeveniments climàtics extrems també semblen estar relacionats amb determinats canvis fenològics observats en les aus. En el cas de l'oreneta vulgar (*Hirundo rustica*), espècie migratòria que hiverna a l'Àfrica i que nia cada any a banda i banda de la serralada, s'ha observat que existeix una relació entre l'augment de la incidència d'onades de calor i de sequeres i la major variabilitat en la data d'arribada d'aquesta espècie a Europa (Saino et al., 2004). Quan els llocs d'hivernació presenten uns condicions més avantatjoses (pocs esdeveniments climàtics extrems i suaus), la qualitat de l'hàbitat és millor

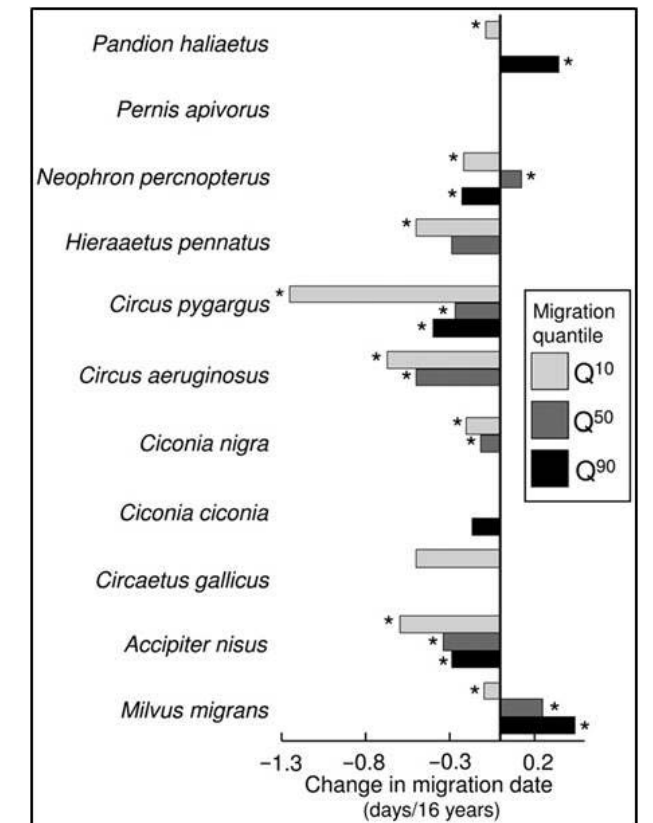


Figura 2.2.1. Estimació de l'avançament de la data d'arribada a la Península Ibèrica d'11 espècies d'aus migratòries entre els anys 1999 i 2011 (dies corresponents a 16 anys). El color gris clar representa el Q10 i correspon al 10 % de les aus comptades. El color gris fosc representa el Q50 i correspon al 50 % de les aus comptades i el color representa el Q90 i representa el 90 % de les aus comptades. Font: Panuccio et al., 2017

i la disponibilitat d'aliments és més elevada. Això permet als adults arribar abans als llocs de cria a Europa, fet que es tradueix en un increment de les oportunitats per posar ous una segona vegada (Saino et al., 2004). Una intensificació dels esdeveniments climàtics extrems als llocs d'hivernació en el futur, podria afectar l'èxit reproductiu de l'espècie, ja que pot provocar una disminució del nombre de parelles que poden dur a terme una segona posta d'ous consecutiva (Walther, 2010).

(6) Cicle de vida que consisteix en dues fases diferents (larva i adult) amb una metamorfosi de transició entre les dues.

ENQUADRAMENT 2.2.1. PROJECTE LINDUS 2: SEGUIMENT D'AUS MIGRATÒRIES, EDUCACIÓ AMBIENTAL I ECOTURISME AL TERRITORI TRANSFRONTERER DELS PIRINEUS

Els Pirineus Occidentals són un lloc privilegiat des d'on observar els milers d'aus que cada any segueixen la ruta migratòria occidental europea. LINDUS-2 és un projecte de cooperació transfronterera dut a terme entre els anys 2010 y 2014 als Pirineus mitjançant el projecte Lindus. L'objectiu principal d'aquest projecte consisteix en observar i registrar els passos migratoris de les aus pels ports de muntanya d'aquesta serralada. Com a novetat, el programa científic s'amplia també a l'estudi de ratpenats, ja que un gran nombre d'aquests animals utilitzen aquesta ruta migratòria i fins i tot hivernen a Navarra. A part de d'identificar i comptar les aus observades en quatre punts estratègics (Lindus, Organbidexka, Portalet i Somport), el projecte Lindus-2 se centra també en la sensibilització social mitjançant la participació d'ecovoluntaris i en el desenvolupament de moltes altres iniciatives. El projecte també s'ha fixat com a objectiu promoure l'ecoturisme lligat a l'albirament d'aus al territori Lindus i posar en valor el patrimoni natural i cultural de la zona. Lindus-2 es desenvoluparà durant els anys 2016 i 2018, fet que permetrà dur a terme un seguiment de les aus durant tres temporades de migració i obtenir valuoses dades d'observació que aportaran informació sobre els canvis en la fenologia de les aus migratòries que creuen els Pirineus anualment. Des del projecte Lindus 2 es promouen també iniciatives de ciència ciutadana com la iniciativa "compte ocells", en la qual es convida els ciutadans a participar activament en els censos d'avifauna mitjançant una aplicació mòbil anomenada "eBIRD". El projecte forma part del Programa Operatiu de Cooperació Territorial Espanya-França-Andorra (POCTEFA 2014-2020) i està finançat en un 65 % pel Fons Europeu de Desenvolupament Regional (FEDER). És un treball de cooperació transfronterera entre el Govern de Navarra, la seva empresa pública GAN-NIK (Gestió Ambiental de Navarra, S.A.), l'Ajuntament de Burguete, SEO/BirdLife i la Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO-Aquitània), de manera que cobreix un ampli territori de Navarra, Aragó i Aquitània.

Els canvis fenològics també afecten els animals invertebrats. En el cas dels insectes, en els estudis duts a terme sobre els lepidòpters i les principals espècies d'insectes pol·linitzadors, s'ha observat que aquests animals són especialment sensibles als canvis de temperatura (Herrera et al., 2014). Pel que fa als lepidòpters, s'ha observat que en les últimes dècades s'ha produït un avançament en la data dels primers albiraments de la majoria de les espècies estudiades, el qual sembla estar relacionat amb un augment de les

temperatures mitjanes (Diamond et al., 2011). Una altra evidència clara de l'efecte del canvi climàtic en la fenologia dels animals s'observa en els amfibis. En els darrers trenta anys s'ha registrat un avançament d'entre una i tres setmanes per dècada de la data d'inici de l'activitat reproductiva i de la posta d'ous d'un gran nombre d'amfibis (Scott et al., 2008; Phillimore et al., 2010; Green et al., 2017). Durant aquest mateix període de temps els rèptils també semblen haver experimentat un avançament considerable de la seva fenologia. Tret dels anys més freds, la data d'aparició de més de 15 espècies de rèptils presents als Pirineus s'ha avançat progressivament cada any (Prodon et al., 2017).

És molt probable que la tendència actual observada en els canvis fenològics d'un gran nombre d'espècies animals es mantingui i, fins i tot s'accentui en el futur, a mesura que augmentin les temperatures i hi hagi una major variabilitat climàtica com a conseqüència de l'escalfament global (Vitasse et al., 2018). A part de modificar els calendaris fenològics de determinades espècies, l'efecte acumulat podria acabar alterant greument les interaccions entre les diferents espècies i afectar tots els nivells de la cadena tròfica, així com la dinàmica d'un gran nombre d'espècies i ecosistemes d'alta muntanya (Gordo et al., 2005; García et al., 2014; MacCarty et al., 2017).

2.2.3 Modificacions en la distribució geogràfica

Una altra de les respostes més habituals de la fauna al canvi climàtic consisteix en desplaçar-se cap a latituds i/o altituds superiors i cercar àrees on les condicions climàtiques encara els resultin idònies, fet que comporta una modificació de la seva distribució geogràfica original. La majoria dels estudis duts a terme amb diferents models i enfocaments preveuen que es produirà un desplaçament general cap al nord de les actuals àrees de distribució, una contracció de les àrees de distribució més meridionals, i un desplaçament cap a altituds més elevades de les espècies de muntanya (Parmesan et al., 2006; Dirnböck et al., 2011). Els efectes d'aquests desplaçaments poden tenir un efecte especialment negatiu per a les espècies que es troben als extrems o marges de la seva àrea de distribució actual, com és per exemple el cas d'un gran nombre d'espècies de muntanya. En conjunt, les variacions en la distribució actual de les espècies poden provocar canvis en les actuals comunitats de muntanya, que en general poden caracteritzar-se per un augment de certes espècies generalistes, en detriment de determinades espècies més especialistes (Singer y Parmesan, 2010). S'ha establert per consens que la intensitat d'aquests desplaçaments no dependrà només de l'evolució del canvi climàtic i de la capacitat de resposta de cada

espècie, sinó també, i molt probablement en major grau, de l'evolució d'altres factors no climàtics integrats en el concepte de canvi global⁷.

Impactes observats i previstos

En termes generals, s'estima que cada decenni es produirà un desplaçament mitjà de l'àrea de distribució geogràfica de les espècies europees d'aproximadament 17 km cap a latituds més elevades, i/o 11 m cap a altituds superiors (Chen et al., 2011). Un aspecte crític per a les espècies de fauna de muntanya és que els desplaçaments de tipus ascendent sovint es veuen limitats per altres factors associats a l'activitat humana, com ara la fragmentació de l'hàbitat o els canvis en l'ús del sòl. Aquests factors poden alterar la connectivitat entre àrees del territori i obstaculitzar les migracions cap a altituds superiors, i per tant, la capacitat de les diferents espècies per adaptar-se a les noves condicions (Dirnböck et al., 2011). A més a més, els desplaçaments en altura a la muntanya comporten una pèrdua d'hàbitat, ja que l'àrea de distribució es redueix a mesura que s'ascendeix. Així doncs, algunes espècies corren el risc de quedar progressivament aïllades en petites àrees d'hàbitat, fet que augmenta la seva vulnerabilitat i fins i tot les posa en risc d'extinció com a conseqüència de la manca d'aliments i la cada vegada menor variabilitat genètica⁸ de les seves poblacions (Schneider et al., 2002; Maclean y Wilson, 2011; Flousek et al., 2015). Aquest fenomen podria tenir efectes particularment negatius en espècies i poblacions amb una baixa diversitat genètica, com ara la marmota (Marmota marmota). D'acord amb un estudi dut a terme recentment per Bichet et al. (2016), les poblacions actuals d'aquesta espècie presenten una baixa variabilitat genètica. Les marmotes es va extingir als Pirineus fa més de 10.000 anys, on es va tornar a introduir de nou amb èxit a partir de només dues poblacions alpines diferents, que a més a més, ja presentaven un baix índex d'intercanvi genètic entre elles. El baix nombre d'individus fundadors (uns 400 reintroduïts durant 40 anys), juntament amb l'aïllament geogràfic i genètic, són factors que podrien reduir considerablement la capacitat d'adaptació i resiliència de la marmota davant dels efectes del canvi climàtic.

En la majoria d'espècies d'alta muntanya, el límit inferior del rang de distribució es troba restringit per unes condicions climàtiques inadequades, mentre que el límit superior està condicionat per la disponibilitat d'un tipus particular de vegetació, espècie vegetal o hàbitat. Per aquest motiu, els canvis en el rang de distribució de les espècies pirinenques també dependran de la capacitat de la vegetació per desplaçar la seva àrea de distribució amb el pas temps: si la velocitat a la qual es desplacen les comunitats vegetals és menor que la velocitat a la qual varien les condicions climàtiques, les noves àrees de distribució potencial d'un gran nombre d'animals podrien disminuir de forma significativa en comparació amb les originals (Costa et al., 2009; Alexander et al., 2017).

Pel que fa als mamífers, les espècies endèmiques d'alta muntanya amb una baixa capacitat de dispersió semblen presentar una distribució més sensible als efectes del canvi climàtic. Un exemple és el cas de l'almesquera ibèrica. D'acord amb les conclusions d'un estudi dut a terme per Murueta-Holme et al. (2010) sobre l'impacte del canvi climàtic en aquest petit mamífer en els principals massissos del nord de la Península Ibèrica, el rang de distribució de l'almesquera pot podria disminuir de forma molt significativa durant el transcurs d'aquest segle. Els principals factors que determinen la presència i distribució potencial del G. Pyrenaicus semblen ser les temperatures mitjanes estiuenques i el balanç hídric, dos factors que es preveu que variaran significativament al llarg d'aquest segle com a conseqüència de l'escalfament global. Si es confirmen les projeccions d'aquest model, els efectes del canvi climàtic, en sinergia amb la pèrdua d'hàbitat, poden posar en risc la supervivència d'aquesta espècie en un futur.

Així mateix, el rang de distribució de determinades espècies d'aus també podria disminuir als Pirineus. Si bé el fet de poder volar augmenta considerablement la capacitat de dispersió d'aquests animals, la reducció del rang de distribució de les comunitats vegetals de les quals depenen un gran nombre d'espècies podria resultar determinant en certs casos, com per exemple, la perdiu blanca (*Lagopus muta pyrenaica*) (García-González et al., 2016; Novoa et al., 2016).

(7) S'anomena canvi global al conjunt de canvis ambientals derivats de les activitats humanes sobre el planeta, tot posant un especial èmfasi en els canvis en els processos que determinen el funcionament del sistema Terra (Wikipedia.org)

(8) La variabilitat genètica fa referència a la variació en el material genètic (genoma) d'una població o espècie. Per tal de poder adaptar-se al canvi climàtic és necessari disposar d'una gran diversitat genètica que permeti activar mecanismes genètics adaptatius per contrarestar els efectes ambientals negatius. A mesura que la variabilitat genètica disminueix en les poblacions de determinades espècies d'animals i plantes, aquestes es tornen més vulnerables davant dels canvis que es produeixen en les condicions ambientals. No obstant això, l'adaptació al canvi ambiental pot efectuar-se també mitjançant la "plasticitat fenotípica" (veure, per exemple, Kourkgy et al. 2016, entre d'altres)

ENQUADRAMENT 2.2.2. PROMOURE L'ADAPTACIÓ AL CANVI CLIMÀTIC EN LA GESTIÓ DE LES ÀREES PROTEGIDES.

La Fundació Fernando González Bernáldez i EUROPARC-Espanya estan desenvolupant el projecte "Promoure l'adaptació al canvi climàtic en la gestió de les àrees protegides d'Espanya". Aquesta iniciativa compta amb el suport de la Fundació Biodiversidad mitjançant la convocatòria d'ajudes per a dur a terme projectes en matèria d'adaptació al canvi climàtic.

El projecte s'emmarca dins d'una de les línies prioritàries del Pla Nacional d'Adaptació d'Espanya, que té com a objectiu incorporar l'adaptació en diversos sectors, en aquest cas en la conservació de la biodiversitat. L'objectiu principal del projecte és facilitar la integració de criteris d'adaptació al canvi climàtic en la planificació i gestió de les àrees protegides i promoure així l'intercanvi de coneixements i d'experiències pilot entre els gestors d'àrees protegides i desenvolupar eines pràctiques que permetin incorporar les evidències científiques ja disponibles a la gestió.

Per tal d'assolir aquests objectius, s'ha convocat un premi de bones pràctiques d'adaptació en àrees protegides, que servirà per identificar i difondre accions d'adaptació al conjunt de l'Estat. Paral·lelament s'estan incorporant de forma pilot criteris d'adaptació en el procés d'elaboració del pla de gestió de tres àrees protegides: el Paisatge Protegit de la Serra de Santo Domingo (Saragossa), la Zona d'Espècial Conservació d'Urbasa i Andía (Navarra), i el Parc Nacional del Teide (Tenerife).

S'espera que els resultats d'aquestes experiències pilot, juntament amb les accions recopilades amb motiu del premi, esdevinguin un material d'interès per al conjunt de gestors d'àrees protegides. Per fer-ho possible, es crearà una eina en línia i es reeditarà i distribuirà el Manual 13 "Les àrees protegides en el context del canvi global: incorporació de l'adaptació al canvi climàtic en la planificació i la gestió",.

El rang de distribució potencial de determinades espècies d'amfibis també podria disminuir de forma significativa durant les properes dècades com a conseqüència de l'escalfament global. És molt probable

que les necessitats ambientals específiques d'aquest grup, l'elevada sensibilitat fisiològica que presenten als canvis en les variables abiòtiques i la creixent fragmentació de les ja estretes franges d'hàbitat idoni disponibles, restringeixen encara més les àrees de distribució potencial d'aquests vertebrats en el futur. En conseqüència, certes poblacions podrien quedar cada vegada més aïllades i disminuir la seva resiliència⁹ al canvi climàtic (Araújo et al., 2006; Hickling et al., 2006; Maiorano et al., 2011).

En un estudi sobre l'impacte del canvi climàtic en la distribució potencial i la variació genètica del tritó pirinenc *Calotriton asper*, Pou et al. (2015) han conclòs que, fins i tot considerant els escenaris més optimistes, entre els anys 2020 i el 2080 aquesta espècie endèmica dels Pirineus podria patir una reducció considerable del seu rang de distribució potencial, en part en conseqüència de les poques possibilitats de dispersió. Malgrat la gran pèrdua d'àrees potencialment idònies per a aquest amfibi, els models també revelen l'existència de certes àrees que podrien romandre relativament estables en el temps, sobretot a la zona central de la seva distribució actual (Figura 2.2.2).

Les projeccions a futur per a les poblacions de determinats insectes, com ara les papallones, són especialment alarmants. En general, s'espera que el rang de distribució del 80 % del total de les espècies de papallones a Europa disminueixi en un futur, i s'estima que només el 20 % de les espècies podria beneficiar-se dels possibles efectes positius associats a un augment de les temperatures mitjanes (Settele et al., 2008). És important destacar que els Pirineus és on concentra la major densitat d'espècies de papallona catalogades en els annexos de la Directiva d'Hàbitats, ja que en la bioregió pirinenca hi conflueixen els requisits ecològics i bioclimàtics específics d'un gran nombre d'aquestes espècies (Romo et al., 2015). Si tenim en compte que l'extensió dels rangs de distribució d'aquestes papallones està limitada principalment per les condicions climàtiques, és molt important incloure l'evolució d'aquestes condicions en les polítiques de conservació actuals i futures per tal de preservar-la a mig i llarg termini. Certes espècies de papallona típiques de les zones de muntanya europees han patit una disminució de la seva àrea de distribució potencial en els darrers decennis i es preveu que aquestes àrees continuaran minvant en el futur (Willson et al.,

2015). És el cas, per exemple, de *Parnassius apollo*, una espècie que ha experimentat un fort ascens del seu límit altitudinal inferior de distribució al sud de França i probablement també en un gran nombre de zones de muntanya del sud de la Península Ibèrica (Catalan et al., 2017). Aquesta regressió sembla estar directament relacionada amb una menor durada anual de la capa de neu, fet que empitjora l'aïllament tèrmic dels individus immadurs d'aquesta papallona i incideix negativament en la taxa de supervivència.

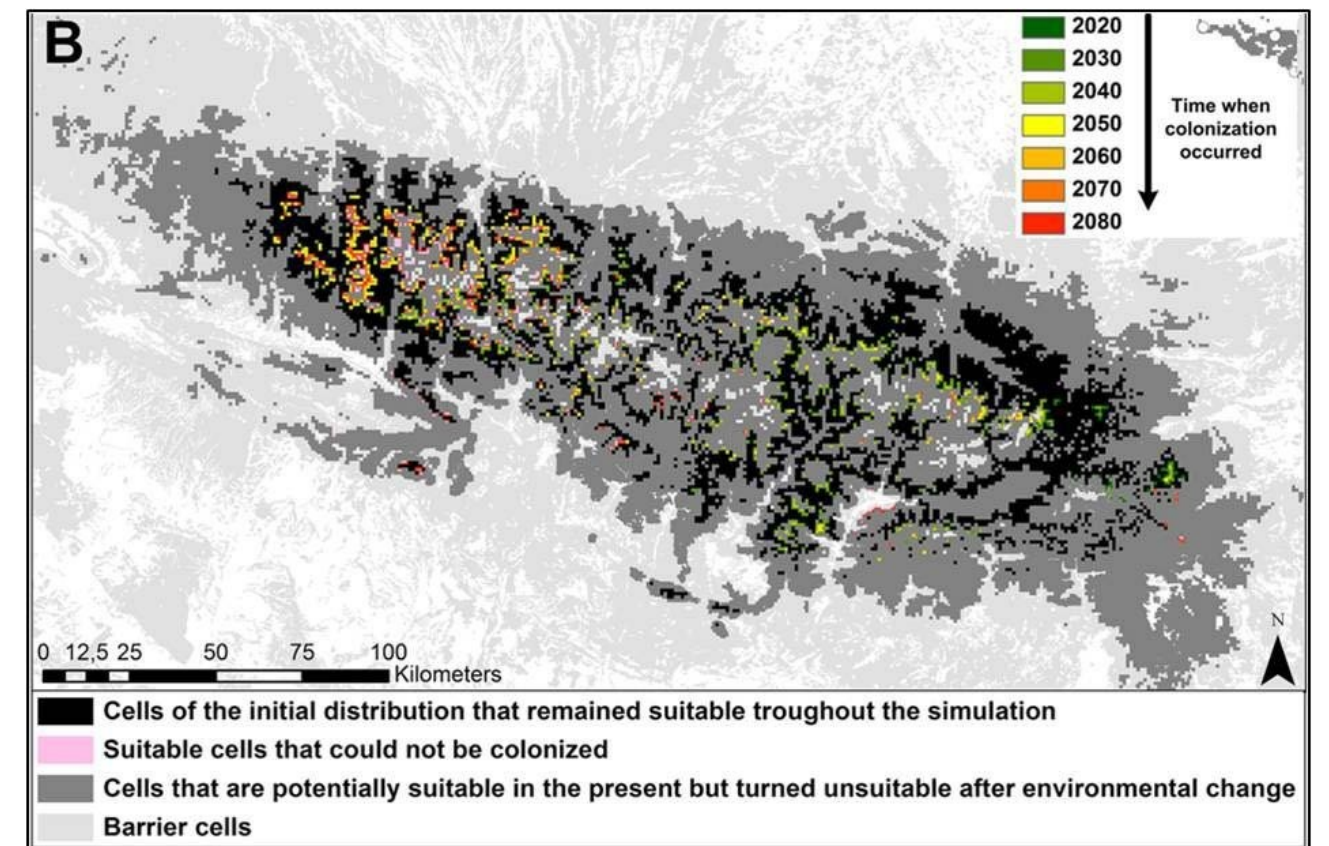


Figura 2.2.2. Evolució estimada de la distribució potencial de *Calotriton asper* de l'any 2080 en comparació amb la distribució actual emprant la mitjana de tres models de circulació global (GCM: CCCMA, HADCM3 i CSIRO) i l'escenari d'emissions SRESA2. Les zones en gris corresponen a les àrees potencialment idònies avui en dia per al *Calotriton asper*, però que probablement no ho seran en un futur. Les zones en negre corresponen a les àrees del territori pirinenc que romandran potencialment idònies, malgrat els canvis i les limitacions en la dispersió de l'espècie. Els diferents colors indiquen el moment estimat de colonització de les noves àrees colonitzades. Font: de Pou et al., 2015

(9) Resiliència és el terme emprat en ecologia de comunitats i ecosistemes per indicar la capacitat d'aquests sistemes d'absorbir pertorbacions, sense alterar significativament les seves característiques d'estructura i funcionalitat, de manera que poden retornar al seu estat original una cop finalitza la pertorbació.

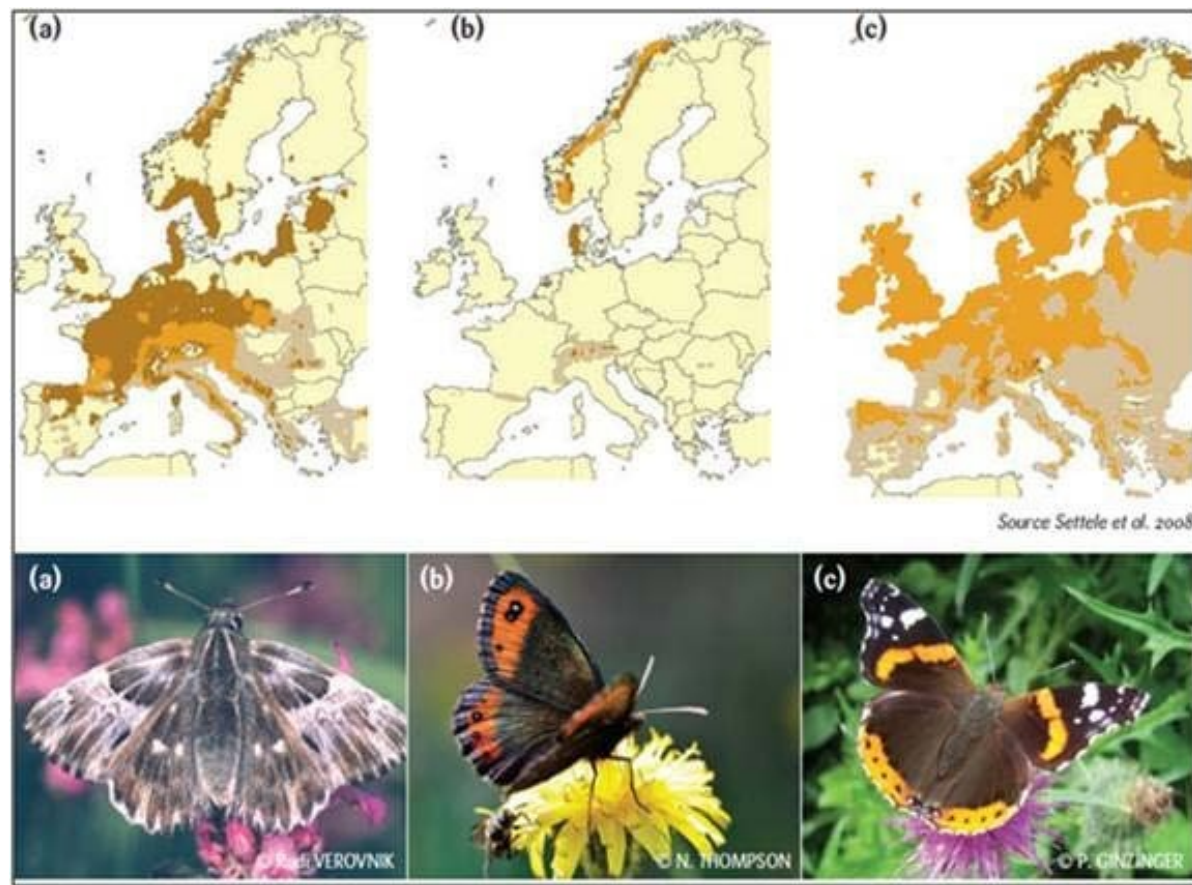


Figura 2.2.3. Canvis esperats l'any 2080 en les àrees climàticament idònies (marró clar: àrees perdudes, marró fosc: àrees guanyades) per a tres espècies de papallones europea (a) *Carcharodus flocciferus*; (b) *Erebia montana* i (c) *Vanessa atalanta* emprant un escenari d'emissions A2. Font: Settele et al., 2008

Les projeccions futures són especialment preocupants per a l'*Erebia montana*, una espècie per a la qual tots els models emprats per Schmitt et al. (2013) prediuen un alt risc de desaparició als Pirineus i al Massís Central com conseqüència, com a mínim en bona part, de l'escalfament global.

La distribució potencial i la diversitat de determinats insectes pol·linitzadors, com ara els borinots i les abelles, també podrien veure's seriosament afectades pel canvi climàtic (Lecocq et al., 2013; Groom et al., 2014; Miller-Struttman et al., 2015). Concretament, els canvis graduals en les condicions climàtiques estan alterant els rangs de distribució i la fenologia

d'aquests insectes clau (Kuhlmann et al., 2012), fet que provoca variacions espacials i/o temporals en els seus nínxols climàtics¹⁰ potencials (MooLlanes et al., 2013). Diversos estudis han demostrat que el declivi actual del borinot a Europa pot atribuir-se en part al canvi climàtic, i especialment, a l'increment en la freqüència i intensitat d'esdeveniments climàtics extrems, com ara les sequeres i les onades de calor (Bartomeus et al., 2013; Groom et al., 2014). Pel que fa als Pirineus, Ornos et al. (2017) han observat un desplaçament progressiu de les principals espècies de borinot cap a altituds més elevades per tal de trobar en aquestes zones unes condicions climàtiques i ambientals idònies. Així mateix, Rasmont et al. (2015) preveuen que les àrees

(10) El nínxol ecològic és un terme que descriu la posició relacional d'una espècie o població en un ecosistema. Quan parlem de nínxol ecològic, ens referim a l'"ocupació" o a la funció que exerceix una determinada espècie dins d'una comunitat. Per exemple, el nínxol ecològic dels esquiroles és viure als arbres i alimentar-se de plantes i fruits secs.

climàticament idònies per a gran part de les espècies de borinot de la serralada minvaran de forma significativa, en especial per a *Bombus barbutellus*, *B. bohemicus*, *B. campestris*, *B. confusus*, *B. cryptarum*, *B. terrestris* i *B. cullumanus* (figura 2.2.4).

És molt probable que en els propers anys, a mesura que s'intensifiqui l'escalfament global, s'accentui el procés de declivi al qual s'enfronten actualment aquests pol·linitzadors. Si la necessitat de desplaçar-se per tal de trobar unes condicions adequades és cada vegada més gran, però les àrees climàticament idònies es contrauen progressivament a causa del canvi climàtic, la capacitat d'adaptar-se d'aquests insectes clau podria veure's reduïda de forma significativa.

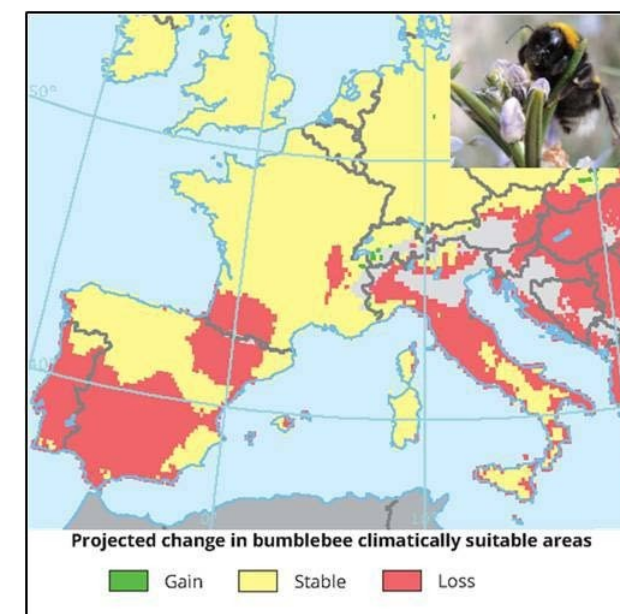


Figura 2.2.4. Canvi projectat en l'àrea climàticament idònica per al borinot *Bombus terrestris* (l'espècie de borinot més gran i una de les més nombroses d'Europa) considerant un escenari combinat de canvi climàtic i de canvis d'usos del sòl segons SEDG (Objectiu de Desenvolupament Europeu Sostenible) i l'escenari d'emissions SRES B1. El color verd representa les zones guanyades, el color groc les zones estables, i el color vermell les zones perdudes. Font: EEA, 2016 de Rasmont et al., 2015

(11) S'anomena nivell tròfic a cadascun dels conjunts d'espècies, o d'organismes d'un ecosistema que coincideixen en la posició o torn que ocupen en el flux d'energia i nutrients, és a dir, als que ocupen un lloc equivalent a la cadena alimentària.

(12) Una relació interespecífica o associació interespecífica és la interacció que es produeix entre dues o més espècies diferents.

2.2.4 Alteracions de les interaccions ecològiques i del funcionament dels ecosistemes.

L'acció combinada dels impactes del canvi climàtic pot provocar una dessincronització entre els cicles de vida de les poblacions que es troben ecològicament interconnectades, com ara les espècies amb relacions presa-depredador o paràsit-hoste. Si aquestes espècies responen de manera diferent a les variacions de les condicions climàtiques (alteracions fenològiques diferents), existeix el risc que les interaccions establertes entre elles es dessincronitzin i s'alteri el funcionament de tot l'ecosistema.

Impactes observats i previstos

Les respostes fenològiques i els canvis en la distribució de les espècies poden tenir una repercussió negativa en les espècies de nivells tròfics¹¹ superiors i en general en aquelles espècies que interactuen entre si establint sinergies de diferent naturalesa (relacions interespecífiques¹²). Alguns exemples d'aquest fet són els casos dels sistemes herbívor-planta, o depredador-presa, ja que els canvis en la presència i/o abundància que afecten una determinada espècie incideixen també en la resta d'espècies relacionades mitjançant desfasaments o desajustos entre els calendaris fenològics. Aquests desfasaments poden alterar la capacitat de determinades espècies d'exercir funcions clau a l'ecosistema (Filadelfia, 2007), i per tant també el funcionament de l'ecosistema.

Un exemple particularment alarmant és la dessincronització entre la fenologia de la floració de les plantes i el cicle de vida de les abelles (relació interespecífica planta-pol·linitzador). S'ha demostrat que el canvi climàtic podria estar influïnt negativament en la capacitat dels insectes pol·linitzadors per a pol·linitzar les plantes (Schweiger et al., 2010). Atesa la vital importància dels pol·linitzadors en l'estabilitat dels ecosistemes i en el manteniment de la biodiversitat tant a escala local com global (Bascompte i Jordano, 2007), les repercussions en l'ecosistema podrien ser molt greus. Malgrat que encara no s'ha constatat de forma àmplia, és previsible que les espècies dels sistemes pol·linitzador-planta més vulnerables a l'escalfament global siguin les més especialitzades, ja que en principi són menys flexibles a l'hora d'escollir les espècies amb les quals interactuen (Benadi et al., 2014).

Un exemple d'alteració de la interacció entre espècies com a conseqüència de l'escalfament global és el cas del cucut comú (*Cuculus canorus*). Aquest migrant de llarga distància i paràsit de niu, està perdent la sincronia amb alguns dels seus principals hostes (Saino et al., 2009; Kolářová et al., 2017). Segons Barret (2014), el canvi climàtic està alterant l'associació entre el cucut comú i els seus clients habituals principals. Aquests últims, majoritàriament aus migratòries de recorregut curt, tendeixen a avançar la seva arribada primaveral en major mesura que el cucut, i en conseqüència també la seva reproducció. Aquest desajust entre les migracions i el temps de niació del cucut i els seus hostes pot tenir greus implicacions en l'èxit reproductiu de l'espècie paràsita. Les papallones també semblen ser vulnerables als problemes de dessincronització entre espècies. Un exemple és el cas de la papallona *Boloria titania*. És d'esperar que en les properes dècades es produeixi una reducció considerable de l'àrea en la qual se superposen la idoneïtat climàtica d'aquesta espècie amb l'àrea climàticament idònia per a la planta que necessita per viure (*Polygonum bistorta*). Això podria reduir significativament el seu nínxol potencial disponible als Pirineus i augmentar en conseqüència el risc d'extinció d'aquesta papallona especialista (Figura 2.2.5).

Discordances tròfiques com les d'aquestes dues espècies representen una pressió afegida sobre determinades espècies especialistes característiques de la bioregió pirinenca (Reid et al., 2005; Schweiger et al., 2008; Palomo, 2017) i podrien provocar un augment futur del seu risc d'extinció.



Figura 2.2.5. Nínxol potencial actual de la papallona *Boloria titania* i de la planta *Polygonum bistorta* (esquerra) i projecció de la possible disminució de l'àrea de superposició entre les dues àrees de distribució potencial per a l'any 2080 (àrees en blau), d'acord amb un escenari d'emissions SRES A1B. Font: Schweiger et al., 2008. El copyright d'aquesta imatge pertany a l'Ecological Society of America.

2.2.5 Risc més elevat d'invasió i/o expansió d'espècies exòtiques

Si bé els ambients freds característics de les zones i altituds elevades s'han considerat menys vulnerables a les invasions biològiques, l'escalfament global podria incrementar el risc d'invasions i l'establiment d'espècies exòtiques també en els ambients d'alta muntanya (Pauchard et al., 2016). El canvi climàtic podria fomentar l'assentament de noves espècies exòtiques als Pirineus, ja que en facilita el transport i el posterior establiment (gràcies a unes condicions climàtiques favorables (Pysek et al., 2013), i/o a una disminució de competència interespecífica amb les espècies natives). Atès que les espècies exòtiques invasores són majoritàriament oportunistes i generalistes, tendeixen a adaptar-se millor a les ràpides variacions climàtiques en comparació amb la majoria de les espècies natives (Hellmann et al., 2008; Cubas et al., 2017). A més a més, l'augment de les temperatures desplaça les barreres climàtiques a una altitud superior i augmenta la probabilitat que es produeixin noves invasions (especialment de plantes) i que s'hi s'estableixin algunes espècies ja presents (Capdevila-Argüelles et al., 2011; Petitpierre et al., 2016).

Impactes observats i previstos

El desplaçament en altitud de l'àrea de distribució de les espècies natives pot comportar un avantatge competitiu que fomenti l'expansió i l'establiment de determinades espècies exòtiques, ja que aquestes

troben nous nínxols climàticament idonis i amb un baix nivell competència pels recursos com a conseqüència del desplaçament les espècies originals. Segons el model emprat per Gallardo et al. (2017), el canvi climàtic podria provocar un augment de les àrees climàticament idònies que facilitaria l'expansió de determinades espècies exòtiques, tant aquàtiques com terrestres, presents a Europa (fins a més d'un 70 % en comparació amb el rang de distribució actual). Pel que fa al territori espanyol, francès i andorrà, els resultats d'aquest estudi preveuen un major nombre d'invasions a les zones de muntanya en comparació amb les zones baixes, tant a mig com a curt termini. Els autors també destaquen el paper clau que fins ara han exercit els espais protegits europeus com a refugi de les espècies natives contra les invasions biològiques, i alerten de com el canvi climàtic podria amenaçar greument aquesta important funció en les properes dècades. Finalment és important destacar que, si bé el canvi climàtic podria ser un factor clau en la potencial expansió i establiment d'espècies exòtiques als Pirineus, el factor determinant segueix i seguirà sent la introducció prèvia d'aquestes espècies per part de l'home. En aquest sentit, les possibles iniciatives d'adaptació en aquest camp passen per augmentar la conscienciació ciutadana sobre la magnitud d'aquesta problemàtica, així com per intensificar les actuals xarxes de vigilància, control i prevenció de la introducció d'espècies exòtiques.

2.2.6 Impacte en la interconnexió entre les xarxes d'espais protegits

El moviment d'animals i plantes cap a àrees del territori on les condicions encara siguin idònies, podria desplaçar les àrees de distribució fora de les zones actualment demarcades com a protegides i augmentar la vulnerabilitat d'aquestes àrees davant de diferents perills i factors d'estrès. De la mateixa manera, és probable que determinades àrees protegides que fins ara es trobaven interconnectades per mitjà de corredors naturals o artificials, quedin aïllades per a certes espècies que no toleren les noves condicions climàtiques dels corredors. Aquest fenomen podria ser especialment significatiu en els espais protegits amb presència d'espècies endèmiques caracteritzades per una capacitat de dispersió reduïda i un alt grau d'especialització ecològica (Araujo et al., 2011). La xarxa d'espais protegits Natura 2000 és un element clau en la gestió actual i futura de la biodiversitat

pirinenca. Per tal d'afrontar els nous reptes climàtics i les conseqüències que se'n deriven, caldrà prendre les mesures pertinents per assegurar que la capacitat de resiliència de les espècies més vulnerables els permet superar els impactes més negatius del canvi climàtic. Per fer-ho possible, és imprescindible adaptar l'actual xarxa Natura 2000 mitjançant el desenvolupament d'iniciatives i accions adreçades a garantir la interconnexió dels diferents espais. En aquest sentit, la restauració d'hàbitats altament vulnerables o amb un equilibri delicat, i la protecció de nous espais que puguin facilitar el desplaçament i difusió de les espècies més amenaçades a mesura que aquestes modifiquin la seva àrea de distribució, són alguns dels principals reptes als quals les polítiques de conservació hauran de donar resposta en les zones de muntanya del territori de la CTP. Iniciatives com l'"Estratègia Europea per a les Infraestructures Verdes" poden ser un exemple inspirador, ja que proposen l'establiment d'una xarxa europea d'ecosistemes saludables mitjançant l'ús d'infraestructures verdes basades en la natura.

2.2.7 Conclusions i recomanacions

Els ecosistemes de muntanya són particularment sensibles i vulnerables al canvi climàtic i, sovint són, a més a més, l'hàbitat d'una fauna molt específica o endèmica. Aquests ecosistemes proporcionen també un gran nombre de béns i serveis de gran valor per a tota la societat. La comunitat científica internacional coincideix a destacar que durant les pròximes dècades l'acció conjunta del canvi climàtic i la pèrdua d'hàbitat associada a canvis en l'ús del sòl seran les causes principals de pèrdua de biodiversitat i d'extinció d'espècies al món. El canvi climàtic influeix en la biodiversitat de les zones de muntanya mitjançant canvis en la fisiologia i fenologia de les plantes i els animals, en la durada de la temporada de creixement i en la distribució de les poblacions. També afavoreix el risc d'invasió, d'establiment i d'expansió d'espècies exòtiques.

Per tal de comprendre les respostes de les espècies pirinenques a l'efecte del canvi climàtic i els seus diferents mecanismes d'adaptació, cal fer un esforç per promoure noves xarxes d'observació de la biodiversitat d'alta muntanya, incentivar-ne la dinamització, i promoure el manteniment a mig i llarg termini de les xarxes d'observació ja existents. L'única manera de poder definir les millors accions d'adaptació i garantir

(13) En ecologia de poblacions, la competència interespecífica és la interacció que es produeix quan individus de diferents espècies es disputen els mateixos recursos en un ecosistema (per exemple l'aliment o l'espai vital).

l'adopció d'estratègies de conservació a llarg termini és conèixer en profunditat aquests sistemes.

En aquesta secció es presenten de manera sintètica i no exhaustiva, els principals reptes per a les polítiques de conservació dels Pirineus des de la perspectiva del canvi climàtic. També es presenta una relació de les principals recomanacions en matèria d'adaptació, les quals es classifiquen en tres tipologies de solucions adaptatives o mesures d'adaptació: mesures verdes, grises i toves.

Reptes principals

- Protegir les àrees pirinenques més representatives en base a la biologia de la conservació, posant un especial èmfasi als hàbitats singulars, especialment sensibles a la variabilitat climàtica o que mantenen un delicat estat d'equilibri amb les condicions del medi;
- Reduir les mancances pel que fa al coneixement i les incerteses en relació amb la potencial introducció, expansió i estratègies de lluita contra plagues, vectors de malalties i espècies exòtiques invasores;
- Incentivar la creació de noves xarxes d'observació dels efectes del canvi climàtic en la biodiversitat, així com promoure la dinamització i manteniment a llarg termini de les xarxes d'observació d'alta muntanya ja existents.
- Promoure la integració de les consideracions sobre l'adaptació al canvi climàtic en els actuals plans, programes i altres eines de planificació i protecció de la biodiversitat als Pirineus;
- Limitar la fragmentació dels hàbitats i garantir tant com sigui possible la connectivitat ecològica progressiva de les àrees protegides dels Pirineus;
- Fomentar el desenvolupament d'estudis que combinin els factors climàtics i els riscos antròpics;
- Promoure la col·laboració i l'intercanvi d'informació entre els organismes competents en la gestió i protecció de la biodiversitat en els diferents territoris i identificar i implicar els interlocutors que intervenen en la planificació territorial, del sector veterinari, ramader, agrícola, forestal, i dels organismes competents en matèria de medi ambient i gestió d'espais protegits;

- Identificar les àrees i espècies que més preocupació generen pel que fa a la vulnerabilitat al canvi climàtic i en general al canvi global, per tal de definir àrees prioritàries per a la conservació, així com oportunitats per a restaurar-les.

Mesures soft o toves ¹⁴

- Afavorir la creació d'un catàleg d'àrees pirinenques especialment sensibles al canvi climàtic per a les zones de la serralada amb ecosistemes emblemàtics i únics, vulnerables o especialment sensibles o amb espècies amenaçades o endèmiques la distribució i característiques de les quals en dificulten el desplaçament;
- Promoure usos del territori pirinenc compatibles amb la conservació i amb capacitat d'esmoreir els efectes del canvi climàtic;
- Harmonitzar les polítiques d'adaptació de la resta de sectors amb l'objectiu de protegir, millorar i restaurar de la biodiversitat per tal de maximitzar les sinergies positives que s'estableixen entre elles (principi de desenvolupament sostenible);
- Enfortir i redirigir els actuals plans de seguiment i control d'espècies pirinenques vulnerables, plans de prevenció, control i gestió d'espècies exòtiques invasores i plagues tenint en compte els efectes potencials induïts pel canvi climàtic;
- Aprofundir en l'estudi del desplaçament dels rangs de distribució de les espècies provocat pel canvi climàtic i el potencial d'adaptació de les diferents espècies en risc;
- Actualitzar les llistes vermelles d'espècies tenint en compte la vulnerabilitat actual i potencial al canvi climàtic;
- Afavorir la creació de bases de dades transfrontereres, com ara els atles pirinencs d'espècies vegetals i animals;
- Promoure la creació de mecanismes, metodologies i fòrums participatius per tal de coordinar mesures d'adaptació intersectorials i transfrontereres adreçades a garantir la protecció de les espècies i hàbitats pirinencs especialment vulnerables al canvi climàtic;

(14) Les mesures soft o mesures no estructurals per reduir o pal·liar els efectes negatius del canvi climàtic. Aquesta categoria de mesura està típicament representada pels estudis d'investigació enfocats a cobrir llacunes de coneixement o per enriquir les bases de coneixement sobre el canvi climàtic, els seus impactes i els sectors més vulnerables. També trobem en aquesta categoria el desenvolupament de metodologies i sistemes específics per reduir riscos derivats del canvi climàtic (p. e. desenvolupament d'un early warning system transfronterer per a la gestió de les onades de calor al massís).

- Ampliar els coneixements i el seguiment de l'estabilitat i resiliència dels diferents ecosistemes pirinencs i definir metodologies transfrontereres per tal d'avaluar quantitativament qualsevol canvi en la capacitat per oferir serveis ecosistèmics (per exemple: definició d'indicadors);

- Sensibilitzar la població sobre la importància i els riscos relacionats amb el problema de les espècies invasores i les seves interaccions amb el canvi climàtic, i informar els grups interessats sobre les "bones pràctiques" per tal d'evitar noves introduccions;

- Fomentar la difusió d'iniciatives de "ciència ciutadana" als Pirineus, concebudes com a iniciatives de col·laboració efectiva entre ciutadans i investigadors per tal d'enriquir les bases de dades sobre els seguiments fenològics d'espècies, les observacions d'ecosistemes sensibles, la recopilació de dades de mostreig i els repositoris;

- Garantir la difusió efectiva de les accions d'adaptació promogudes, així com els avenços i els resultats obtinguts, a tots els actors interessats i a la societat.

Mesures verdes ¹⁵

- Promoure la identificació i posterior protecció de poblacions i subpoblacions d'espècies sensibles al canvi climàtic, amb altes taxes d'intercanvi genètic, així com els hàbitats i ecosistemes especialment sensibles o vulnerables als efectes del canvi climàtic;

- Incentivar el disseny de solucions adaptatives basades en la natura (Natural Based Solutions) per tal de millorar la migració i els canvis de distribució a les àrees protegides dels Pirineus mitjançant la inclusió de corredors biològics entre elles (millorar la connectivitat ecològica);

- Millorar la caracterització dels micro-ajustos climàtics de les diferents poblacions, àrees de refugi i gradients climàtics variables a una escala de detall raonable;

- Valorar i readaptar els límits administratius dels espais protegits, tant actuals com futurs, a la biologia de les espècies, a part dels efectes previsibles del canvi climàtic.

(15) Les mesures verdes o basades en serveis ecosistèmics inclouen totes les mesures, bones pràctiques, estudis o iniciatives que tinguin com a principi l'ús dels serveis ecosistèmics que ofereixen els diferents recursos naturals per pal·liar els efectes negatius del canvi climàtic (p. e. pràctiques silviculturals conservadores per augmentar la capacitat dels boscos dels Pirineus per reduir els riscos hidrogeològics).

IDEES CLAU

- Els ecosistemes muntanyosos són particularment sensibles i vulnerables al canvi climàtic i són hàbitat d'una fauna molt específica o endèmica.

- El canvi climàtic influeix en la biodiversitat de les zones muntanyoses a través de canvis en la fisiologia i fenologia de plantes i animals, canvis en la durada de la temporada de creixement, canvis en la distribució de les poblacions, així com afavorint el risc de invasió, establiment i expansió d'espècies exòtiques.

- Els canvis climàtics observats estan alterant la distribució d'algunes espècies, que es veuen obligades a ascendir en alçada a la recerca de les condicions idònies per al seu desenvolupament. És altament probable que aquesta situació s'accentui en el futur a mesura que s'intensifiqui l'escalfament global.

- El cicle de vida de molts grups d'animals s'ha avançat en les últimes dècades, amb avançaments en la data de posada d'alguns amfibis, aus i en l'arribada d'aus i insectes migratoris. És molt probable que aquesta tendència s'intensifiqui en les pròximes dècades.

- El canvi climàtic està afectant a la interacció entre algunes espècies que depenen les unes de les altres per la seva supervivència.

- És altament probable que l'acció conjunta del canvi climàtic i la pèrdua d'hàbitat per canvis en l'ús del sòl siguin les causes principals de pèrdua de biodiversitat i extinció d'espècies als Pirineus durant aquest segle.

- Fomentar la incorporació de gradients altitudinals en l'actual xarxa d'àrees protegides dels Pirineus per tal de millorar la protecció de les poblacions amb distribucions geogràfiques que s'estan desplaçant geogràficament com a conseqüència del canvi climàtic.

2.3 Biodiversitat de muntanya: flora

Coordinador: Gérard Largier (CBNPMP)

Autors: Gérard Largier (CBNPMP)

Coautors: Gilles Corriol (CBNPMP), Jocelyne Cambecèdes (CBNPMP), Patxi Heras (Bazzania) Marta Infante Sánchez (CBNPMP), Benjamin Komac (IEA-CENMA), Daniel Gomez (IPE-CSIC), Juan Terrádez (CTP-OPCC) Estela Illa Bachs (UB).



Figure 2.3.1 : *Androsace ciliata* DC., planta endèmica dels Pirineus. Photo : CBNPMP/C. Bergès

RESUM

Situats en un creuament d'influències climàtiques molt contrastades, mediterrànies, oceàniques i montanes, i amb una gran varietat de situacions ecològiques associades principalment a la geologia, el relleu, l'exposició i l'altitud, els Pirineus presenten una gran diversitat biològica. La seva situació geogràfica meridional, el seu estatge alpí força ben desenvolupat i els seus elevats massissos calcaris són les causes suplementàries d'una gran riquesa tant de la flora com de la vegetació, i d'una gran originalitat en comparació amb les altres muntanyes europees, amb un elevat nombre d'espècies endèmiques (gairebé 200 tàxons, Villar et al., 1994). Per tant, els Pirineus són un hot spot, un punt calent de la biodiversitat europea. A escala pirinenca, la biodiversitat és un element que es té en compte a l'hora de dissenyar les estratègies de conservació de la natura europees, nacionals i locals, fet que es tradueix en la

presència d'una important xarxa d'espais protegits. Més enllà del seu interès intrínsec pel que fa a la biodiversitat, aquesta riquesa original interactua amb les activitats socio-econòmiques (pastura, gestió forestal, agricultura, turisme, activitats esportives, etc.), algunes de les quals han tingut un paper molt important en l'organització espacial de les formacions vegetals (pastures i boscos) i en condicionar l'evolució.

Les zones de muntanya destaquen per la seva sensibilitat als canvis climàtics (Beniston et al., 1996; Theurillat & Guisan, 2001). No obstant això, l'anàlisi dels efectes d'aquests canvis i de la vulnerabilitat dels ecosistemes és relativament complexa a causa dels diferents factors que hi intervenen, particularment pel que fa als usos del territori i a la seva evolució, a l'efecte d'esdeveniments climàtics extrems, a les possibilitats de compensació entre factors i a la manca d'estudis a mitjà i a llarg termini.

Molts treballs es basen en els escenaris generals d'increment de temperatures i de reducció de precipitacions, si bé per les precipitacions les tendències encara no són massa clares. Les primeres síntesis sobre l'evolució del clima a escala pirinenca [projecte OPCC1, acció clima] destaquen un "increment estadísticament significatiu de +0,2°C per dècada, més accentuat a la primavera i a l'estiu" i "una reducció de la precipitació anual acumulada de l'ordre del 2,5% per dècada, més accentuada al vessant sud dels Pirineus que al vessant nord i difícil de diferenciar a escala estacional". Les tendències apunten a un augment de les temperatures als horitzons de 2030, 2050 i 2090, però la precipitació hivernal podria augmentar al vessant nord a l'horitzó 2030 i disminuir a partir d'aleshores (cf. secció 1.3), amb una gran incertesa pel que fa a les precipitacions. Un altre factor important a tenir en compte és la circulació atmosfèrica (en concret l'efecte foehn¹⁶, tan característic als Pirineus), de la qual es desconeix en gran mesura el seu efecte sobre l'organització de la vegetació a escala local. El model general de distribució de la vegetació a les muntanyes en estatges altitudinals amb variacions en funció de l'exposició emmascara variacions importants a escala local, que encara són més importants als Pirineus a causa de la diversitat de situacions bioclimàtiques i de l'efecte de les compensacions entre factors¹⁷.

En resum, la resposta dels organismes i de les poblacions dependrà de la seva plasticitat fenotípica¹⁸ i de les seves possibilitats d'evolució genètica. Tot i que poden produir-se adaptacions ràpides i microevolucions, avui en dia es té poc coneixement sobre aquests processos i sobre com un canvi climàtic podria actuar en combinació amb d'altres aspectes del canvi global (Peñuelas et al., 2013). Algunes espècies i ecosistemes podrien estar més adaptats a canvis climàtics que el que es pensa, però les referències sobre aquesta temàtica són escasses (Martín-Vide, 2016).

2.3.1 Alteracions fisiològiques i canvis en la productivitat i l'abundància de les espècies

Aquest informe és una meta-anàlisi de cerca bibliogràfica, però no s'hi esmenten moltes evidències científiques ni s'hi mencionen treballs concrets sobre l'alteració de la productivitat i de l'abundància de la flora pirinenca.

El clima és, com a norma general, un factor limitant per a les espècies i els ecosistemes de muntanya, tenint en compte els factors específics que s'hi donen (gradient d'altitud, diversitat topogràfica i d'exposicions). Canvis en diferents paràmetres climàtics (temperatura, radiació, precipitació) en combinació amb l'increment de concentració de CO₂ influeixen en la fotosíntesi, afectant el creixement i el desenvolupament de la vegetació, tal com és ben conegut en les espècies cultivades i els arbres. En aquest sentit, diversos estudis sobre la productivitat dels boscos indiquen un desplaçament altitudinal de l'òptim de creixement (factors limitants: sequera, falta de pressió de vapor a l'aire, temperatures baixes) (Savva. et al., 2006; Jolly et al., 2005), fenomen que s'ha estudiat pel faig als Pirineus occidentals entre els anys 1970 i 2009 (Vitasse et al., 2010). Les pressions ambientals poden afectar el metabolisme de les plantes i induir canvis en la composició química i en la concentració de nutrients de diferents òrgans vegetals. A més, aquests canvis poden tenir efectes sobre els sòls i també sobre l'apetència dels herbívors per les plantes dels prats (veure capítol 2.2.4), amb una possible incidència sobre la xarxa tròfica (Rivas-Ubach et al., 2012).

2.3.2. Canvis del cycle vital (canvis fenològics)

Els treballs de fenologia destaquen un desfasament dels cicles fenològics, que varien en funció dels anys (avançament del cycle les primaveres càlides i endarreriment les primaveres fredes). Diverses fonts reconeixen l'avançament de les dates de brotada i l'allargament del període vegetatiu (Menzel i Fabian, 1999; Menzel et al., 2006; Linderholm, 2006; Vitasse et

al., 2009). Tot i això, les dades de seguiment de vegetació de muntanya sembla que encara són insuficients per permetre predir tendències a llarg termini i poder discernir entre els canvis deguts a l'escalfament global i els derivats de la variabilitat interanual de les temperatures, tal com es desprèn del programa científic i pedagògic Phénoclim, iniciat el 2004 i basat en l'observació participativa de la fenologia d'una desena d'espècies als Alps (CREA, <http://Phénoclim.org/fr>). Els canvis fenològics poden tenir efectes en la precocitat de la floració i de la fructificació o en el cycle de desenvolupament dels insectes (pas més ràpid d'un estadi larvari al següent), amb els consegüents riscos de desincronització de les interaccions entre organismes (plantes/pol·linitzadors, plantes/herbívors, veure punt 2.2.4). Així mateix, convé fer notar que l'escalfament i la sequera tenen efectes contraris sobre la senescència foliar¹⁹ a les espècies caducifòlies i que, en conseqüència, "l'impacte dels canvis climàtics dependrà de la importància relativa de cada factor" per a un territori determinat (Estiarte i Peñuelas, 2015).

2.3.3. Alteracions ecològiques i del funcionament dels ecosistemes

Els ecosistemes pradencs de l'alta muntanya han estat especialment estudiats (Grime 1973; Callaway et al., 2002; Adler et al., 2011). És plenament reconegut que pressions mitjanes de pastura i de sega estan relacionades amb les diversitats específiques més elevades, i que les interaccions entre plantes que sovint es consideren negatives (competència) també poden tenir efectes positius (facilitació) i ser un factor determinant per a una elevada diversitat (Michalet et al., 2006; Grime et al., 2000). Els efectes dels canvis climàtics es manifestaran en combinació amb aquestes pressions, com per exemple la combinació d'un estrès d'origen climàtic amb les perturbacions antròpiques (veure enquadrament 1). En aquest sentit, la majoria de models prediuen que durant les properes dècades l'efecte combinat d'aquests factors podria alterar encara més el funcionament dels ecosistemes ja pertorbats, alterant la seva diversitat fins els límits del col·lapse (Grime et al., 2000; Brooker, 2006).

(16) El vent foehn o föhn es produeix en relleus muntanyencs quan una massa d'aire càlid i humit és forçada a ascendir per salvar aquest obstacle.

(17) L'efecte de compensació entre factors es dona en sistemes on conflueixen diversos factors simultàniament, quan els efectes combinats poden contrarestar l'efecte individual de cada un d'ells.

(18) Capacitat que té un organisme de modificar l'expressió de les seves característiques com a resposta a factors ambientals.

(19) "El fotoperíode i la temperatura són els principals factors que controlen la senescència de les fulles en les espècies caducifòlies d'hivern, afegint-hi la influència addicional imposada per l'estrès hídric. El fotoperíode exerceix un control estricte sobre la senescència foliar en latituds on els hiverns són severos, i la temperatura pren més importància en la regulació a mesura que els hiverns es tornen menys severos. De mitjana, la senescència foliar s'endarrerirà amb l'escalfament climàtic i s'avançarà amb la sequera, amb diferent intensitat en funció de les espècies." (Estiarte i Peñuelas, 2015)

En el cas dels boscos podem preguntar-nos quins són els possibles efectes amplificadors de les variacions i canvis climàtics en les masses forestals on la composició específica de l'estrat arbori i/o la seva diversitat genètica poden haver estat empobrides per una gestió simplificadora que només s'interessa per un número reduït d'espècies-objectiu i per certes decisions silvícoles, particularment en boscos amb nínxols ecològics molt diversificats. Avui en dia es coneixen els efectes de les intervencions silviculturals en la diversitat genètica dels arbres forestals, tot i que no estan suficientment documentats (Valadon, 2004). El procés d'adaptació, que inclou les fases de creació i d'erosió de la diversitat genètica, interactua en efecte amb les condicions ambientals i el canvi climàtic, però també amb la gestió (Lefèvre i Collin, 2009).

2.3.4 Canvis en la composició i en les interaccions entre espècies a la comunitat ecològica

Un dels efectes que s'esperen dels canvis climàtics és la modificació de les àrees de distribució de les espècies, ja sigui per reducció, desplaçament o extensió de les àrees, que depèn de les característiques pròpies de cada espècie i dels ambients que ocupa. La reducció

ENQUADRAMENT 2.3.1. PROVES PILOT PER ESTUDIAR L'IMPACTE DEL CANVI CLIMÀTIC A LES ESTIVES DELS PIRINEUS.

Una experiència duta a terme els anys 2010 i 2011 a les estives de Pierre-Saint-Martin (Pirineus Atlàntics) mitjançant un dispositiu que permet modular les precipitacions, simular la seca i testar diferents situacions de competència ha permès analitzar les interaccions entre d'una banda la sequera, que seria causada per l'efecte combinat d'un canvi climàtic i de les pertorbacions antròpiques, i de l'altra el paper moderador de les interaccions biòtiques. Els resultats mostren que les interaccions entre espècies són el factor preponderant sobre la diversitat. Aquestes interaccions poden inhibir-se a causa de nivells elevats d'estress hidric i de pertorbacions (Le Bagousse-Pinguet et al., 2014). Tot i això, la disminució de la precipitació al vessant nord no és evident i, tal com comenten Le Treut (2013: 230), la majoria dels treballs científics es centren "només en els efectes de l'augment de temperatura o eventualment d'una reducció de les precipitacions", fets que no es corresponen necessàriament amb les tendències observades fins ara en determinats sectors de la serralada.

i/o el desplaçament de les àrees de distribució poden portar a l'extinció local d'algunes espècies a totes les altituds, especialment a través de la desaparició de nínxols ecològics en estatges altitudinals més elevats (Bergamini et al., 2009; Colwell et al., 2008; McCain i Colwell, 2011; Thomas, 2010). Aquests fenòmens són, d'altra banda, els que probablement van modelar la composició florística actual com a resposta a variacions climàtiques del passat. La complexitat dels factors ecològics en zones de muntanya fa que els fenòmens de compensació puguin dificultar aquestes projeccions (cf, per exemple, l'efecte de les inversions tèrmiques a les valls més encaixades). A més, les aproximacions centrades en les "espècies" són sovint simplistes i reduccionistes ja que no prenen en consideració altres factors determinants com ara les interaccions entre espècies, el funcionament i les possibles dinàmiques de les seves comunitats, o el paper clau que hi té la diversitat genètica. En aquest sentit, molts estudis alerten sobre les possibles respostes, com ara canvis en la competència entre espècies que podrien permetre que algunes d'elles es mantinguessin estables tot i el canvi climàtic o bé que migressin cap a zones de més baixa altitud, mentre que d'altres migrarien cap a altituds més elevades (Lenoir et al., 2010). Als massissos on s'han dut a terme estudis sobre els efectes dels canvis climàtics en la flora i la vegetació s'observa que la tendència general és que augmenten les espècies amb necessitats tèrmiques més elevades en detriment del número d'espècies amb necessitats tèrmiques més baixes (fenomen anomenat termofilització, Holzapfel i Vinebrooke, 2005), tot i que hi ha una gran variabilitat en la resposta tant entre massissos com a nivell local dins un mateix massís (Gottfried et al., 2102).

Les comunitats vegetals de congesteres, formades per una flora molt específica com el salze nan (*Salix herbacea* L.), són particularment sensibles a causa de les condicions edàfiques i microclimàtiques altament selectives que s'hi donen (Grabherr, 2003). Les congesteres són sens dubte l'hàbitat natural alpí on les condicions microclimàtiques poden canviar més ràpidament (Grabherr, 2003; Heegaard i Vandvik, 2004). Les conseqüències d'un escenari d'escalfament amb unes dates de fosa de neu més primerenques serien un allargament del període vegetatiu, un augment de l'evaporació i de l'activitat biològica dels sòls, i una exposició de la vegetació a temperatures més baixes (Baudière i Gauquelin, 2005). Aquests efectes contribuirien a l'evolució del medi, que podria ser ocupat per altres espècies menys especialistes i més oportunistes (o, al contrari, més resistents al fred). En canvi, un augment de la durada mitjana de la coberta de neu o de gelades comportaria una reducció del

període vegetatiu, que ja és molt limitat, i l'alteració de la composició o estructura de la vegetació (Braun-Blanquet, 1948; Eynard, 1978; Corriol i Mikolajczak, 2014). La vegetació de les congesteres alpines, fonamentalment perenne i adaptada al seu ambient, és tot i així capaç de desenvolupar-se amb variacions climàtiques interanuals molt importants i de reaccionar a tendències a llarg termini. El rendiment reproductiu d'algunes espècies podria veure's més afectat que el seu cicle fenològic (Lluent et al., 2013). El dispositiu de seguiment de les congesteres, implementat en el marc del programa OPCC-1, continua amb el programa FLORAPYR (14 localitats en tres països: Espanya, França i Andorra, Komac i Olicard, 2014). Els resultats actuals de l'estudi sobre vegetació i els informes anuals sobre la fenologia i la temperatura, elaborats des del període 2011-12, encara no permeten visualitzar tendències clares. El dispositiu es consolidarà amb treballs complementaris, concretament amb la implantació d'unitats de simulació d'escalfament (instal·lació d'Open Top Chamber a 4 parcel·les).

Les comunitats vegetals de congesteres, formades per una flora molt específica com el salze nan (*Salix herbacea* L.), són particularment sensibles a causa de les condicions edàfiques i microclimàtiques altament selectives que s'hi donen (Grabherr, 2003). Les congesteres són sens dubte l'hàbitat natural alpí on les condicions microclimàtiques poden canviar més ràpidament (Grabherr, 2003; Heegaard i Vandvik, 2004). Les conseqüències d'un escenari d'escalfament amb unes dates de fosa de neu més primerenques serien un allargament del període vegetatiu, un augment de l'evaporació i de l'activitat biològica dels sòls, i una exposició de la vegetació a temperatures més baixes (Baudière i Gauquelin, 2005). Aquests efectes contribuirien a l'evolució del medi, que podria ser ocupat per altres espècies menys especialistes i més oportunistes (o, al contrari, més resistents al fred). En canvi, un augment de la durada mitjana de la coberta de neu o de gelades comportaria una reducció del període vegetatiu, que ja és molt limitat, i l'alteració de la composició o estructura de la vegetació (Braun-Blanquet, 1948; Eynard, 1978; Corriol i Mikolajczak, 2014). La vegetació de les congesteres alpines, fonamentalment perenne i adaptada al seu ambient, és tot i així capaç de desenvolupar-se amb variacions climàtiques interanuals molt importants i de reaccionar a tendències a llarg termini. El rendiment reproductiu d'algunes espècies podria veure's més afectat que el seu cicle fenològic (Lluent et al., 2013). El dispositiu de seguiment de les congesteres, implementat en el marc del programa OPCC-1, continua amb el programa FLORAPYR (14 localitats en tres països: Espanya, França

ENQUADRAMENT 2.3.2. EL DISPOSITIU INTERNACIONAL GLÒRIA DE SEGUIMENT DE LA FLORA ALPINA.

Fins a l'actualitat s'ha constatat que hi ha un número més elevat d'estudis centrats en diferents grups faunístics (ocells, papallones, libèl·lules, insectes pol·linitzadors) que en flora i vegetació (Le Treut, 2013) (més informació al capítol 2.2.3). La vegetació alpina és especialment sensible als canvis ambientals i pot reaccionar a les variacions climàtiques. El dispositiu internacional GLORIA té com a objectiu estudiar l'evolució de la flora alpina a través d'un protocol implementat sobre el conjunt de muntanyes alpines del món. Aquest dispositiu compta amb sis localitats de seguiment florístic a la Península Ibèrica, dues de les quals es troben als Pirineus aragonesos (Pauli et al., 2004). Les primeres anàlisis entre l'estat inicial (2001) i el primer seguiment (2008) indiquen un ascens mitjà de la flora alpina europea de 2,7 m durant el període considerat, amb diferències importants entre les muntanyes d'influència mediterrània, que perden espècies (-1,4 espècies de mitjana), i els massissos del nord d'Europa, que en general en guanyen (+3,9 de mitjana) (Pauli et al., 2012). Aquests resultats no semblen contradictoris amb la possibilitat de termofilització. Simplement, les muntanyes meridionals perdran espècies a causa dels efectes de la sequera estival (Moncorps, 2015). GLORIA té l'avantatge de ser un dispositiu de seguiment a llarg termini, fet que permetrà confirmar o desmentir tendències. Tot i això, aquest dispositiu no permet analitzar separatament els diferents massissos pel fet que els esforços de mostreig són insuficients per a aquesta finalitat. Als Pirineus es completarà aquest dispositiu amb l'establiment de dues noves localitats en el marc del programa FLORAPYR. En darrer lloc, el seguiment de la temperatura de les parcel·les GLORIA dona informació sobre la durada del període vegetatiu a l'estatge alpí, informació que pot ser molt interessant de comparar amb les dades recollides a les localitats de seguiment de geleres.

i Andorra, Komac i Olicard, 2014). Els resultats actuals de l'estudi sobre vegetació i els informes anuals sobre la fenologia i la temperatura, elaborats des del període 2011-12, encara no permeten visualitzar tendències clares. El dispositiu es consolidarà amb treballs complementaris, concretament amb la implantació d'unitats de simulació d'escalfament (instal·lació d'Open Top Chamber a 4 parcel·les).

Actualment, a escala pirinenca, Le Treut et al. (2013) assenyalen que “aparentment no hi ha cap anàlisi que permeti fer estimacions quantitatives del risc d’extinció de les espècies que s’enfronten al canvi climàtic”, i considera que “aquestes estimacions segueixen estant fora del nostre abast, tenint en compte la capacitat actual de modelització i la naturalesa de les dades disponibles o que es puguin recopilar”. En el marc de l’apartat Biodiversitat del projecte OPCC1, es va fer un primer intent d’identificar les espècies sensibles al canvi climàtic als Pirineus, elaborant una primera llista d’unes 80 plantes (Informe executiu OPCC1), però és una aproximació que encara no està completament desenvolupada. L’elaboració de la llista vermella de la flora dels Pirineus en el marc del programa FLORAPYR hauria d’incloure un criteri de sensibilitat al canvi climàtic (s’elaborarà durant el 2018/19, metodologia: (UICN, 2012, criteris A3, A4 o B2 (b)), tot i que un criteri d’aquestes característiques és difícil de definir tenint en compte les incerteses sobre els escenaris climàtics. Sovint es considera que el límit superior del bosc probablement ascendirà de resultes del canvi climàtic, i que això suposarà una amenaça per la pastura a causa de la formació de boscos a les pastures d’estiu. No es té en compte que en el passat els boscos arribaven a altituds més elevades als Pirineus, com demostren els vestigis d’explotació de boscos a l’Ariège fins a 2200 m d’altitud (Bonhote et al., 1988) a l’Edat Mitjana. L’abandonament de les pastures és per tant un factor preponderant en l’increment dels arbres en altitud i del límit superior del bosc (Bodin, 2010). A més, la possible evolució interna de la composició dels boscos a altituds mitjanes encara està poc estudiada (per exemple, la recolonització de l’abet en fagedes montanes als sectors on havia retrocedit a causa de l’activitat humana [Galop i Jalut, 1994]). Alguns treballs centrats als Alps demostren que la dinàmica forestal produeix un desplaçament aparent d’espècies cap a altituds superiors a causa de l’efecte de densificació i de maduració dels boscos d’altituds mitjanes (Bodin et al, 2013).

A baixa altitud, estudis centrats en el faig demostren un ascens altitudinal del seu òptim de creixement (Vitasse et al., 2010), i suggereixen extincions locals a baixes altituds al peu de mont dels Pirineus nord-occidentals en el futur, tal com ja s’ha constatat a Catalunya (Grime, 1973; Jump et al., 2006). Tot i això, l’ascensió de l’òptim de creixement no implica necessàriament l’extinció de les poblacions. És conegut el cas de fajos que no arriben a formar part de l’estrat dominant en els boscos mixtos en situacions d’estrès edafoclimàtic²⁰, sense que per

aquest motiu arribin a extingir-se quan la silvicultura és suficientment extensiva. Al peu de mont dels Pirineus centrals francesos els estudis paleoecològics i històrics testimonien la presència abundant d’avets a Volvestre durant el neolític i la seva regressió posterior a causa dels usos del territori (tala de boscos, pressió agropastoral, explotació intensiva), tot i que és una espècie que té una gran capacitat de colonització (Gonin et al., 2014).

El desenvolupament de plantes exòtiques invasores a la muntanya és un fet palès des de fa dècades, tant a causa d’activitats de construcció, de reforestacions i de desplaçaments (de persones i de maquinària de construcció), com de l’abandonament de plantacions (cas de la pícea), amb incidències possibles sobre el paisatge, el funcionament dels ecosistemes i determinats serveis ecosistèmics (pastures, dominis esquiables, on una espècie com *Picea abies* tanca el paisatge dels Pirineus centrals francesos). S’ha demostrat que els ambients freds sofreixen menys invasions biològiques que els càlids, de manera que els canvis climàtics podrien amplificar aquests fenòmens en funció dels paràmetres implicats (Pauchard et al., 2016; Gallien et al., 2016). El CENMA ha estudiat l’evolució dels nínxols ecològics potencials de *Buddleja davidii* i de *Senecio inaequidens* a Andorra tenint en compte el canvi climàtic durant el segle passat. Els resultats mostren que en funció dels escenaris climàtics, entre un 10 i un 70% del territori és susceptible de ser climàticament viable per les dues plantes (entre un 10 i un 40% per la *Buddleja*, i entre un 30 i un 70% pel *Senecio*, segons l’estudi en qüestió).

(20) Estrès fisiològic relacionat amb les condicions edàfiques i climàtiques, atenuat per la cobertura d’altres espècies.

2.3.5 Vulnerabilitats i serveis ecosistèmics

Els ecosistemes tenen funcions ecològiques de suport, regulació, provisió i serveis culturals. A continuació detallarem els serveis aportats per la flora i la vegetació que podrien veure’s afectats pels canvis climàtics (Moncorps, 2014), remarcant alguns elements de vulnerabilitat (Moncorps, 2015). El paper que té la vegetació en els serveis de suport es materialitza en el cicle de l’aigua, la producció de biomassa i el cicle dels elements nutritius, la formació i el manteniment dels sòls i la creació d’un hàbitat per a la biodiversitat.

Els serveis de regulació inclouen:

- La regulació del cicle de l’aigua, l’erosió i els riscos naturals, així com el manteniment del mantell de neu mitjançant una coberta vegetal contínua i adaptada al context bioclimàtic. Les pressions de l’ús relacionades amb els canvis d’usos del sòl, les pressions climàtiques o fins i tot l’elecció de determinades espècies o fins i tot les restauracions del medi poden afectar considerablement la capacitat dels ecosistemes de muntanya per proveir aquests.
- La regulació de la qualitat de l’aigua.
- La regulació de la qualitat de l’aire.
- La regulació del clima i de l’emmagatzematge de carboni: a part de la funció clàssica que es reconeix als boscos (amb una capacitat d’emmagatzematge tres vegades més important als boscos de muntanya que als de plana), els prats de la muntanya mitjana i les torberes constitueixen també embornals de carboni.
- La pol·linització, ja que els insectes pol·linitzadors es veuen afavorits amb la diversitat paisatgística (mosaic d’ambients²¹).

Els serveis de provisió corresponen als béns comercialitzats, font d’ingressos i de llocs de treball: la producció de fusta (que s’ha de relativitzar als Pirineus tenint en compte les dificultats d’explotació relacionades amb les limitacions naturals), la valorització de la pastura en ambients herbacis, la valorització dels espais d’oci per a certes activitats d’oci (àrees d’esquí), la valorització de la recol·lecció de plantes silvestres (farmacologia, cosmètica, herboristeria, licoreria, etc.).

(21) El mosaic de mitjans o paisatgístic es refereix a la barreja de retalls naturals i manejats per l’home que varien en grandària, forma i ordenació espacial

ENQUADRAMENT 2.3.2. EL PROGRAMA ECOVARS I LA RESTAURACIÓ DE PRADES D’ALTA MONTA

Als Pirineus francesos, el programa Ecovars de restauració ecològica en ambients herbacis d’altitud (Malaval, 2015) (àrees d’esquí i marges de carreteres) preveu mantenir o restaurar aquests serveis gràcies a millores en les tècniques d’intervenció i a l’elecció de material vegetal d’origen local, recolzada per una marca comercial (Pyrégraine de Néou). A Andorra i Aragó s’estan duent a terme experiències similars.



Producció de camp de *Achillea millefolium* L., d’origen pirinenc per al seu ús en restauració ecològica als Pirineus. Photo CBNPMP/Gérard Largier

Els serveis culturals inclouen:

- L’oci i el turisme: la identitat i l’atractiu turístic dels Pirineus es basen en els paisatges i en el seu aspecte salvatge, on la vegetació és un element important (fet que és paradoxal quan se sap com l’han modelat les activitats humanes) així com les espècies emblemàtiques (flora endèmica en particular); a part del públic en general, els Pirineus i la seva biodiversitat han atret des de fa temps un turisme científic.
- Els valors educatius i el coneixement científic; això implica en particular les característiques i especificitats florístiques del massís.
- La dimensió identitària, patrimonial i artística (estètica), on els elements florístics també hi tenen un paper important.

Pel que fa a l'oferta d'hàbitat per a la biodiversitat, hi ha una pregunta que es repeteix regularment: "en què i com els espais protegits poden ajudar a conservar la biodiversitat i els espais de muntanya en un context de canvi climàtic?" (Le Treut, 2013). Per respondre aquesta pregunta cal saber si les espècies i els ecosistemes sensibles es podran mantenir en zones que se solen considerar refugis climàtics, encara que no estiguin especialment definides sobre la base d'aquest criteri i que seran igualment sotmeses a canvis si aquests es produeixen. Una qüestió important és la de la continuïtat i la interconnectivitat ecològica entre aquestes àrees que permetin el manteniment de fluxos genètics i de vies de migració. També en relació a aquest aspecte, els treballs solen basar-se en models d'espècies animals, i els experts no estan necessàriament d'acord amb la seva bona representativitat pels territoris considerats (falten estudis de referència en zones de muntanya). Alguns gestors d'espais protegits han iniciat programes sobre la continuïtat ecològica en el marc dels "plans climàtics" (per exemple a França: Parc National des Pyrénées, Parc naturel régional des Pyrénées ariégeoises, Réserve naturelle régionale du massif de Pibeste- Aoulhet...).

2.3.6 Conclusions i recomanacions

Le Treut (2013) al capítol "Muntanya" de l'informe "Els impactes del canvi climàtic a Aquitània – l'estat científic de la qüestió" proposa algunes pistes generals possibles, que cal ajustar als diferents nivells d'operativitat i de realisme ètic, d'adaptació o de mitigació adaptades als ecosistemes i espècies de muntanya davant el canvi climàtic " que poden aplicar-se al conjunt dels Pirineus i que nosaltres completem en certs aspectes:

" - Reavaluar els objectius de gestió davant del desafiament que suposa el canvi climàtic i reduir tant com sigui possible l'estrès antròpic local que representen els factors susceptibles d'alterar la capacitat de resistència de la biodiversitat per a adaptar-se als canvis globals (fragmentació, contaminació...). Utilitzar la diversitat dels recursos genètics forestals locals per reforçar la capacitat d'adaptació dels boscos al canvi climàtic. "Es vol remarcar tot i això que la reavaluació dels objectius de gestió és complexa tenint en compte les incerteses relatives als escenaris climàtics, sobretot pel que fa a l'evolució de les precipitacions i de la innivació. Pel que fa a la qüestió dels recursos genètics,

també relacionada amb els ambients oberts no forestals, recomanem un enfocament a escala local.

" - Mantenir els usos tradicionals del sòl als indrets on hagi estat el tipus principal de gestió, garantint les missions originals en concordança amb el manteniment de les cultures i tradicions locals històriques. Protegir les tradicions i l'herència cultural associades als territoris, que són les més adients per garantir el manteniment de la diversitat específica local i els ecosistemes sensibles (pastura...)"

" - Promoure les iniciatives originals que reuneixin una "baixa pressió en termes de gestió" i una "creació d'heterogeneïtat espacial". Per exemple, igual com es fa als països del nord d'Europa, sembla crucial seguir segant o pasturant els prats mesòfils amb l'objectiu d'evitar la invasió d'espècies competidores que amenacen greument la diversitat de les comunitats i dels paisatges". Tot i això, "baixa pressió" i "creació d'heterogeneïtat espacial" són oposades i, a més, la creació d'heterogeneïtat no és un fi en sí mateix si pensem en la immensitat i l'elevat grau d'homogeneïtat del sistema forestal boreal.

" - Mantenir com a prioritat les característiques ecosistèmiques essencials (aquelles que determinen l'estructura i el funcionament intrínsecs) i protegir les espècies (concretament les espècies clau) que siguin alhora capaces d'adaptar-se i de ser font d'una eventual recuperació²². Preservar les espècies identificades com a redundants ("duplicacions"), de manera que en cas de pertorbació local en subsisteixi com a mínim una. Protegir les variables (recursos, espècies) que puguin actuar com a tampó, amb un ritme de persistència adaptat al canvi climàtic (Baron et al., 2009)".

" - Reconèixer i millorar les funcions dels espais protegits. Preservar les zones identificades com "refugis", per exemple, les localitats on es desenvolupen poblacions d'espècies rares o amenaçades, o les localitats menys susceptibles de veure's afectades pel canvi climàtic. Aquestes zones es podrien fer servir com a àrees font per a la repoblació, o com a zones- objectiu per establir poblacions trasplantades". En aquestes zones caldria fer un estudi de l'estat de la qüestió previ a les introduccions de material vegetal (sobretot forestal) dutes a terme en el passat, amb la finalitat d'identificar els sectors exempts de fonts genètiques al·lòctones on la diversitat genètica i la seva evolució no es veuen

afectades per contribucions exògenes. La preservació d'aquestes zones refugi ha de contemplar mesures de cara a les espècies exòtiques invasores.

" - En els casos més extrems, per a les espècies més afectades, es recomanen certes estratègies de mitigació 1) el manteniment i la reproducció en captivitat²³ d'espècies amb un elevat risc d'extinció i/o 2) la translocació (migració assistida) de poblacions, el desplaçament d'organismes d'una zona a una altra separades per una barrera (zona urbana, acondicionada...)"

" - Tot i els efectes positius que s'esperen sobre la biodiversitat en termes de mitigació del canvi climàtic derivats directament de la reducció de l'emissió de gasos d'efecte hivernacle (GEH), alguns autors (Araújo et al., 2011) apel·len a un canvi de paradigma de les polítiques actuals de conservació i al desplegament d'aproximacions més eficaces que les que s'apliquen actualment: requalificació d'àrees de conservació existents, creació de noves àrees i desenvolupament de mecanismes de gestió integrada més operatius que facilitin la connectivitat entre àrees de conservació en la seva dimensió vertical (altitudinal) però també horitzontal." Això suposa una reflexió i una organització a escala panpirinenca.

Les conclusions del capítol "Muntanya" de l'informe de Le Treut (2013) convergeixen amb les del "3r informe sobre el canvi climàtic a Catalunya" (Martín-Vide, 2016). Resultats de diferents treballs científics que identifiquen impactes atribuïts a canvis climàtics coincideixen pel fet de presentar el mateix tipus de reserves (falta d'escenaris fiables o incerteses sobre els impactes relacionats amb la imprecisió dels escenaris, investigacions sovint preliminars, variabilitat local elevada) i destaquen la necessitat de dur a terme més estudis i seguiments sobre la temàtica. Le Treut (2013), destacant també l'interès dels models, recomana sobretot "evitar generalitzar amb massa rapidesa observacions o experimentacions realitzades en contextos específics" i "ponderar els treballs basats realment en mesures i treballs de camp, i aquells (sovint més nombrosos, i a escales més grans) que es basen únicament en models". Recordem l'exemple clàssic de l'ascensió altitudinal d'espècies forestals, on semblava evident que es devia a una causa climàtica mentre que realment existeixen altres factors de naturalesa no climàtica que actuen en primer lloc.

Pel que fa a estudis i seguiments de la biodiversitat i de la flora, els treballs de l'OPCC en general, i els del programa FLORAPYR en particular, s'han d'abordar a llarg termini, més enllà de la durada de projectes específics: dispositius com el seguiment de congesteres, GLORIA o el programa de ciència ciutadana Phénoclim necessiten una durada prolongada per produir sèries dades analitzables en relació amb les dades climàtiques observades. La consolidació i l'actualització continuada de l'Atlas de la Flora dels Pirineus, creat igualment en el marc de l'OPCC, permetrà disposar d'un estat de la qüestió actualitzat i disponible per dur a terme anàlisis creuades.

Per altra banda, seria interessant potenciar la creació d'altres dispositius amb l'objectiu de fer un seguiment de l'evolució genètica de les poblacions vegetals en els sectors preservats d'aportacions exògenes o, al contrari, en sectors on el material vegetal al·lòcton porta temps introduït i es desenvolupa interaccionant amb la flora local (com és el cas de la introducció d'altres espècies d'avets mediterranis [complex d'espècies] a la vall de Bagnères-de-Luchon, a les avetoses pirinenques [introducció amb *Abies alba*])). Dispositius d'aquest tipus serien útils per qüestionar certes decisions que sovint porten a la introducció d'espècies al·lòctones sense tenir en compte que la flora local i els ecosistemes naturals poden oferir solucions per sí mateixos en un context en evolució.

(22) resiliència

(23) o en banc de germoplasma

2.4 Boscos

Coordinadors: Sébastien Chauvin (FORESPIR), Julia Gladiné Martín (FORESPIR)

Autors: Sébastien Chauvin (FORESPIR), Julia Gladiné Martín (FORESPIR), Emmanuel Rouyer (CRPF Occitanie), Jean-Baptiste Daubrée (DSF), Christophe Drénou (CNPF-IDF), José Ramón González-Olabarria (CTFC), Pere Casals Tortras (CTFC), Raphaël Delpi (FORESPIR).

Coautors: Alejandro Cantero (Fundación HAZI Fundazioa), Jesus Julio Camarero (IPE), Lluís Coll (CTFC), Thomas Villiers (ONF).

2.4.1 Impactes potencials del canvi climàtic sobre la diversitat de les comunitats vegetals i sobre el repartiment de les espècies forestals.

Els recents canvis socioeconòmics de les àrees rurals, que han donat lloc a un canvi d'ús dels sòls sense precedents per la seva rapidesa, així com la constatació d'un canvi climàtic real, constitueixen els principals motors del canvi global als Pirineus (García et al., 2016). Tanmateix, la incertesa creixent al voltant del medi climàtic, biològic i social és àmpliament reconeguda, incertesa en què es desenvoluparan els boscos del futur, incloent-hi al territori de la cadena pirinenca.

Canvis de la diversitat de les comunitats vegetals

Tot i que a la major part de les muntanyes europees les pastures abandonades hagin evolucionat cap a repoblacions forestals, la interacció entre el procés d'abandonament de les terres agrícoles i pastorals, les seves transformacions en paisatges forestals o "llenyosos" (matolls) i el canvi climàtic (Ameztegui et al., 2016) o els serveis ecosistèmics com la biodiversitat o la seqüestració del CO₂ (Montané et al., 2007; García-Pausas et al., 2017) roman desconeguda.

Un estudi recent sobre les modificacions de la coberta vegetal als Pirineus aragonesos entre 1957 i 2007 mostra un important procés de revegetalització mitjançant l'avançada dels estrats de matolls i després del bosc (Lasanta i Vicente-Serrano, 2007). Aquests autors conclouen que els canvis de vegetació que es van produir en el decurs dels darrers 20 anys van contribuir en alguns casos a l'homogeneïtzació de la coberta vegetal i en d'altres a la seva heterogeneïtzació. L'homogeneïtzació es va produir principalment als boscos ja existents que es densifiquen quan no hi ha explotació forestal, mentre el procés d'heterogeneïtzació es concentra en terres abandonades que presenten cobertes vegetals molt

RESUM

El bosc cobreix el 59 % de la superfície de la cadena pirinenca i representa alhora un recurs natural renovable, ecosistemes rics en biodiversitat, espais turístics i d'acolliment del públic particularment preuats, una protecció contra els fenòmens naturals (allaus, desprendiment de terres, riuades...) i un important estoc natural de CO₂. El relleu, les exposicions diverses, les influències climàtiques atlàntiques i mediterrànies i la diversitat dels substrats geològics provoquen condicions de fertilitat molt variades (FORESPIR, 2007). Des de fa unes quantes dècades, els boscos de muntanya són sotmesos a importants canvis a causa d'interaccions de factors socioeconòmics i ambientals (Ameztegui et al., 2010), però els factors climàtics, biològics i socials en què els boscos hauran de desenvolupar-se encara són molt incerts. Els models climàtics a escala local preveuen una pujada de les temperatures i força poca evolució de les precipitacions mitges acumulades anuals.

Tanmateix, els principals models preveuen un augment important de les variacions estacionals de les precipitacions amb, d'una manera general, un procés de sequera cada vegada més marcat, en particular l'hivern i l'estiu. Fora de tota intervenció humana, aquestes evolucions climàtiques poden tenir un impacte en els boscos pirinencs, en particular per l'augment de la sequera edàfica estiuenca (Aussenac i Guehl, 2000; Bréda et al., 2006) però també per una modificació del règim de certes perturbacions (plagues d'insectes, incendis, tempestes). Paral·lelament, el nou context climàtic també pot suposar un augment de l'índex de creixement dels arbres a causa de la prolongació de l'estació de vegetació i de l'accentuació de l'activitat fotosintètica. Més enllà dels impactes potencials de les modificacions climàtiques en els arbres i els boscos mateixos, és important tenir en compte les conseqüències previsibles en les nombroses funcions i serveis ecosistèmics que presten els boscos muntanyencs. En efecte, el canvi climàtic pot obstaculitzar de manera important, entre d'altres, la multifuncionalitat dels boscos pirinencs provocant degradacions als boscos de producció o de protecció, destruccions d'espècies o hàbitats remarcables, i una deterioració del marc paisatgístic forestal.

variades en funció del període en el decurs del qual aquestes terres van deixar de ser explotades, de la gestió implementada i de les condicions naturals.

Tanmateix, els canvis d'hàbitats naturals i la biodiversitat depenen de les dinàmiques naturals de les espècies que els componen (García et al., 2016). Un estudi comparatiu de les comunitats de l'ecotò entre les pastures alpines i el límit superior del bosc entre 1998 i 2009 va revelar que un augment significatiu de la cobertura arbrada del 20% al 35% no va ser suficient a mig termini per originar un canvi significatiu de la riquesa i la composició de les espècies de plantes alpines i subalpines (Pardo et al., 2013 a García et al., 2016). Les pastures supraforestals tampoc no semblen afectades ara per ara per fortes transformacions de la seva biodiversitat contràriament als canvis registrats

a algunes pastures de vessants de fort pendent i orientats al Sud que tenen una dinàmica més ràpida. Tanmateix, d'altres estudis, com ara el que es va dur a terme al Parc Nacional d'Ordesa i Mont Perdut, donen una visió preocupant dels canvis de la biodiversitat de les comunitats alpines (Pauli et al., 2012). Segons els resultats d'aquest estudi, les pastures presenten un alt grau de naturalitat i una flora rica però condicionada per les baixes temperatures. Són doncs particularment sensibles a l'escalfament climàtic, donat que les espècies adaptades al fred són substituïdes a poc a poc per d'altres espècies termòfiles (Gottfried et al., 2012). L'avançada mitja del seu repartiment ha estat avaluada a 2,7 m als cims europeus (Pauli et al., 2012 a García et al., 2016).

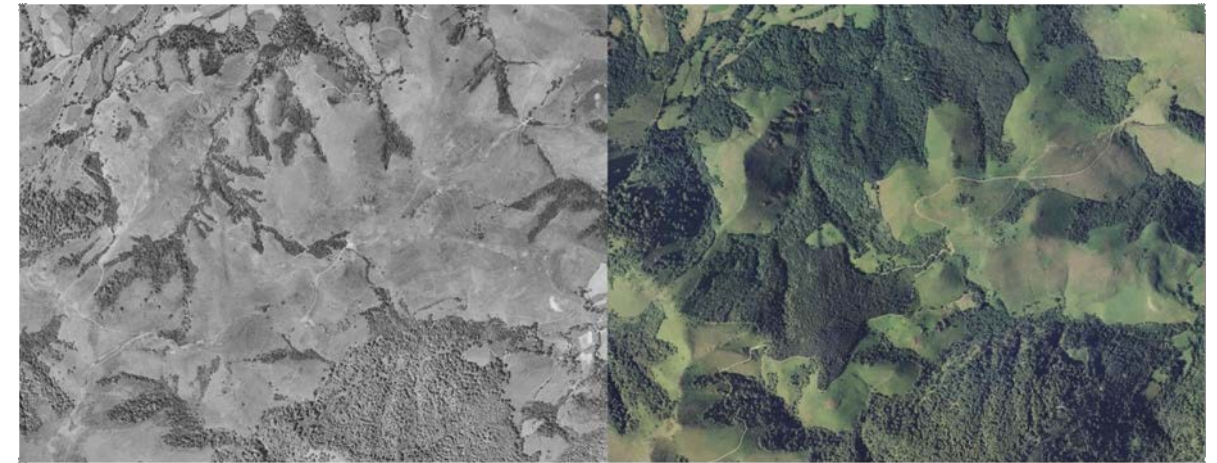


Figura 2.4.1. Exemple de conquesta pel bosc de terres agrícoles i pastorals entre el 1959 i el 2016 als Pirineus Atlàntics francesos (cantó de Montagne Basque). Font: IGN



Figura 2.4.2. Exemple de conquesta pel bosc de terres agrícoles i pastorals entre el 1945 i el 2017 a la Vall de Belagua (Navarra). Font: Sistema de Informació Territorial de Navarra.

Canvis en el repartiment altitudinal de les espècies forestals

Les espècies vegetals no es reparteixen globalment de manera uniforme. Es limiten a determinades zones geogràfiques en què han pogut formar-se o que han pogut colonitzar seguint les evolucions i on les condicions biòtiques i abiòtiques són favorables al seu creixement i a la seva reproducció (Matías, 2012).

Tanmateix, els canvis importants d'ús dels sòls i del clima que s'observen a escala global (IPCC, 2007) alteren aquestes condicions, el qual indueix canvis fenològics, el creixement de les poblacions de diverses espècies o una modificació de la seva dinàmica natural (Matías, 2012). A Europa, el límit superior arbrat i l'estadi alpí estan evolucionant cap a altituds superiors. En el cas dels arbres, els desplaçaments cap a altituds superiors han de ser analitzats amb prudència atès que estan molt vinculats al procés d'abandonament de les pastures d'alta muntanya: l'absència d'activitat pastoral permet així la recolonització per la vegetació forestal d'aquests espais deixats lliures, portant a restaurar el límit superior natural arbrat abans de la intervenció humana. En un estudi recent dut a terme en la vessant sud dels Pirineus, es va observar un desplaçament mig del bosc de 35 m durant els darrers 50 anys (Ameztegui et al., 2016). A més, es va poder demostrar la remuntada longitudinal de la majoria de les espècies vegetals dels medis forestals dels Alps francesos (Lenoir et al., 2008), del faig a Espanya (Penuelas i Boada, 2003) i de set espècies d'arbres a Escandinàvia (Kullman, 2002).

D'altres estudis han considerat que la remuntada altitudinal de determinats estadis de vegetació podria assolir 700 m en l'escenari d'un augment previst de la temperatura mitjana de 4°C (Courbaud et al., 2010). Tanmateix, pocs estudis han tractat de les respostes del canvi climàtic de les comunitats biològiques al llarg del gradient altitudinal de les carenes muntanyenques on pensem que la diversitat ecològica està en declivi (Regato, 2008). La comparació dels inventaris històrics florístics de diferents macissos europeus posa de relleu que aquesta migració en altitud del límit del bosc afecta els prats alpins i en particular les espècies rares o especialitzades (Rixen i Wipf, 2017).

Cal precisar que els estudis ja efectuats a França (Badeau et al., 2005; Piedallu et al., 2009; Cheaib et al., 2012) i a Espanya sobre els efectes possibles del canvi climàtic en el repartiment potencial futur de les essències o sobre la seva vulnerabilitat afecten el més sovint les escales nacionals o regionals; els Pirineus queden aleshores en marge dels territoris analitzats que

generen una validesa dels models probablement menys bona que a d'altres zones i resultats menys pertinents i difícilment explotables.

La modelització del repartiment potencial de quadre pinedes de pi negre (*Pinus uncinata*) als Pirineus catalans i andorrans pels anys 2020, 2050 i 2080 segons diferents escenaris del canvi climàtic (A2 i B2) suggereix que aquestes formacions forestals tindran, els anys 2080, àrees bioclimàtiques òptimes situades a altituds superiors a les actuals. Aquestes assolirien doncs 2.472 m d'altitud mitja en el cas de l'escenari A2 (escenari que presenta una evolució probable de les temperatures mundials de +3,4°C per 2090–2099 en relació a 1980–1999) i 2.340 m d'altitud mitjana en el cas de l'escenari B2 (escenari que presenta una evolució probable de les temperatures mundials de +2,4°C per 2090–2099 en relació a 1980–1999). Això suposa fer remuntar en part les zones de matoll i les pastures alpines muntanyenques (Pérez et al., 2011; Martínez et al., 2012).

Per contra, aquests boscos subalpins podrien patir, en general, una reducció menys important de la seva àrea d'ocupació que els herbeis alpins o els matolls alpins i subalpins. En efecte, s'ha considerat que aquests podrien perdre fins el 90% del seu repartiment potencial segons l'escenari A2 i un 70 % segons l'escenari B2. Les poblacions situades en àrees irrigades (com ara els avetars, per exemple), podrien ser amenaçades per degradacions arran d'episodis de sequeres més freqüents, de temperatures més altes i dels efectes induïts de la gestió forestal passada (Camarero et al., 2011).

A l'Aragó, al Parc Nacional d'Ordesa i Mont Perdut, observem un fenomen d'expansió de les bardisses i dels boscos en detriment de les pastures supraforestals. Aquest fenomen es tradueix per una colonització ràpida dels prats de sega d'altituds mitjanes pel Pi roig (*Pinus sylvestris*). A una altitud superior, la dinàmica de colonització no és tan ràpida i s'ha caracteritzat per una "densificació" progressiva en el decurs del segle passat, induïda per l'abandonament de les pastures però també afavorida per l'escalfament climàtic (Camarero i Gutiérrez, 2004).

Conclusions

Els estudis disponibles suggereixen que els dos principals motors del canvi global (clima i ús dels sòls) tenen una gran incidència en la composició i l'estructura dels boscos i en els seus límits altitudinals. També suggereixen una densificació de la vegetació

a causa en particular de la disminució de l'activitat forestal i de l'abandonament de l'activitat agrícola i pastoral a les pastures, els prats de sega dels estadis muntanyencs i subalpins. Això també causa una recolonització pel matoll, i després pel bosc.

Aquests canvis podrien tenir com a conseqüència una alteració de la biodiversitat. Els hàbitats naturals de les espècies florístiques i faunístiques alpines, rares i especialistes, es veuran més afectats per l'avançada d'hàbitats actualment situats a altituds inferiors. L'anàlisi de la bibliografia científica suggereix tanmateix una variabilitat espacial i temporal important en els processos i evidencia que els canvis observats no sempre segueixen els models establerts.

2.4.2 Alteració de la productivitat dels boscos i paper dels boscos com a pou de carboni

La productivitat d'una població forestal és definida per l'augment del volum de biomassa per hectàrea. Per créixer i desenvolupar-se, un arbre necessita llum, diòxid de carboni i oxigen, aigua i nutrients presents al sòl. Aquesta productivitat també està condicionada per un cert nombre de factors endògens propis de la població (estructura, densitat, composició...) i a les estacions forestals (profunditat del sòl, orientació, altitud). En el cicle natural de l'arbre, la productivitat augmentarà ràpidament durant els primers anys de desenvolupament fins assolir un pic per després disminuir progressivament durant la fase de senescència (Ryan et al., 1997). En el decurs del segle XX, i en particular a la seva segona meitat, hem pogut observar un augment considerable i generalitzat de la productivitat dels boscos europeus (Spiecker et al., 1996) a causa de factors favorables com ara la pujada de les temperatures, l'augment de la concentració en diòxid de carboni i la fertilització nitrogenada procedent entre d'altres de contaminacions d'origen antròpic (Nellemann et al., 2001; Kahle et al., 2008 i Solberg et al., 2009; Bontemps et al., 2011; Bontemps et al., 2012). L'arribada més precoç de temperatures suaus i la mitigació de les estacions de tardor i hivern modifiquen el cicle anual de desenvolupament dels arbres tot augmentant el període de la seva vegetació. Tanmateix, l'augment excessiu de les temperatures en un context de disponibilitat hídrica limitada, combinada amb episodis de sequera més severs i més freqüents, pot tenir un impacte negatiu en el creixement dels arbres. Durant aquests episodis, certes essències adopten estratègies d'evitació regulant la seva fotosíntesi de manera a disminuir la seva evapotranspiració (tancament dels estomes). Així,

Soubeyrou et al. (2012) van analitzar l'impacte del canvi climàtic en l'ocurrència dels períodes de sequera a França i van evidenciar que "fins i tot sense evolució de les sequeres meteorològiques, cal esperar des de la primera meitat del segle XXI un agreujament de la freqüència i de la intensitat dels episodis extrems vinculats a un dèficit d'humiditat del sòl".

Alguns estudis ja demostren que l'ocurrència d'aquests fenòmens extrems associats a desregulacions del clima pot tenir un fort impacte en la productivitat forestal (temperatures, sequeres importants, incendis, atacs de patògens o malalties) (Bréda et Badeau, 2008). A les zones on determinades espècies ja es troben en límit de l'àrea de repartiment (el faig, el pi silvestre i l'avet en regió mediterrània, per exemple), ja s'han pogut constatar disminucions de creixement i degradacions degudes en part al dèficit hídric i a les altes temperatures estiuenques (Jump et al., 2006; Charru, 2012; Camarero et al., 2015).

Davant d'aquest escenari, cal comptar amb la capacitat d'adaptació de les poblacions forestals. Així doncs, si l'esdeveniment perturbador no supera un cert llindar, la població forestal en el seu conjunt pot "absorbir una forta perturbació sense canviar d'estat" (concepte de resistència; Gunderson, 2000 a Charru, 2012) o, arran de l'esdeveniment, recuperar a curt o mig termini l'estat en què es trobava abans de la perturbació (concepte de resiliència; Dobbertin, 2005). Aquesta capacitat de resiliència depèn de la durada i la freqüència de la perturbació, així com de l'espècie afectada (Manion, 1981; Dobbertin, 2005 a Charru, 2012).

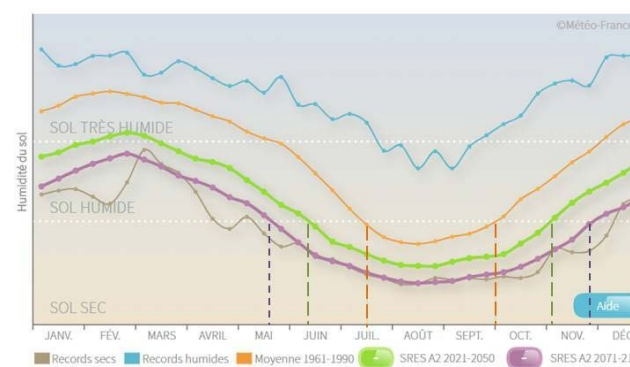


Figura 2.4.3. Cicle anual d'humiditat del sòl; Mitjana 1961, rècords i estimació climàtica per a dos horitzons temporals. Font: Météo France.

Per tant, amb una disponibilitat de CO₂ atmosfèric equivalent a la que tenim actualment, podem anticipar diverses grans tendències pel que fa a la productivitat forestal:

- A les zones afectades per un augment de les temperatures però sense limitacions hídriques particulars (donat que l'evolució de les precipitacions és particularment incerta), podem esperar un possible augment de la productivitat forestal,
- A les zones afectades per un augment de les temperatures i per una disminució de les precipitacions (o, si més no, una modificació del règim de pluges en termes de freqüència), podem esperar una disminució de la productivitat forestal; tanmateix, aquesta possibilitat ha de ser ponderada per la reserva útil màxima (RUM₂₄) del sòl.
- En tots els casos, l'ocurrència repetida de fenòmens extrems podrà afeblir les poblacions, el qual podrà provocar, si se superen els llindars de tolerància, degradacions que poden reduir el volum de bosc en peu.

A més del clima, la productivitat dels boscos està estretament vinculada a la capacitat dels arbres de captar i emmagatzemar diòxid de carboni (CO₂). Donat que és captat pels estomes de les fulles, el CO₂ de l'atmosfera, amb les aportacions d'aigua i gràcies a l'energia de la llum, permetrà la fabricació de cel·lulosa, dels sucres i d'altres components necessaris a la formació de la fusta, de l'escorça, de les arrels i de les fulles. Així doncs, com més es desenvolupa l'arbre, més carboni emmagatzema (es considera que 1 m³ de fusta consumeix 1 tona de CO₂). L'emmagatzematge de carboni en l'ecosistema forestal francès –foliosos, resinosa, llenya seca, sòls – representava, el 2013, 80 milions de tones anuals de diòxid de carboni, és a dir prop d'una cinquena part de les emissions nacionals de gasos amb efecte hivernacle. A més, els sòls forestals són particularment importants atès que representen, ells sols, el 57% del CO₂ de l'ecosistema forestal (Dupouey et al., 2002).

La captació i el segrest del diòxid de carboni pel bosc i al sòl són per tant primordials en les accions de

mitigació del canvi climàtic. Tanmateix, les incerteses sobre els fenòmens derivats del canvi climàtic i que poden tenir un impacte en el bosc i la seva capacitat de captar i segrestar el CO₂ (tempesta, sequeres, incendis, atacs sanitaris...) són nombroses.

A més, la gestió forestal i el sector fusta tenen un paper important en la mitigació dels efectes del canvi climàtic atès que acompanyen els boscos en el seu procés d'adaptació i continuen emmagatzemant CO₂ als ecosistemes forestals, tot subministrant un material sostenible que permet segrestar de manera duradora aquest diòxid de carboni en els productes del bosc. Aquesta fusta podrà per fi substituir d'altres materials i fonts d'energia que emeten més gasos amb efecte hivernacle.

Recentment s'han dut a terme varis projectes que pretenen copsar millor i optimitzar el paper del sector bosc-fusta en la mitigació del canvi climàtic per l'emmagatzematge del CO₂.

Un estudi recent dut a terme per l'IGN (Institut Géographique National) i l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) (Roux et al., 2017) va analitzar en particular l'impacte de 3 escenaris de política d'extracció forestal en el volum de CO₂ emmagatzemat pel bosc francès, segons que es tracti de l'emmagatzematge a l'ecosistema forestal o de l'emmagatzematge derivat de la substitució d'energia i materials i el segrest dels productes de fusta. Els tres escenaris il·lustren el paper important que té el sector bosc-fusta en la mitigació de les emissions de gasos amb efecte hivernacle en l'horitzó 2050, paper que també podria augmentar. Així, als tres escenaris, es constata un lleuger augment de les capacitats de emmagatzematge de carboni; el que difereix és el repartiment de l'emmagatzematge als compartiments del carboni forestal. Aquest estudi també té en compte tres tipus de perturbacions vinculades al canvi climàtic que poden tenir un impacte en el bosc (augment de les temperatures, tempestes, invasions biològiques) i per tant la seva capacitat d'emmagatzemar carboni. Sigui quina sigui la perturbació, l'estudi conclou que *"la capacitat d'emmagatzematge de carboni del sector bosc-fusta a l'horitzó 2050 roman positiva [...] és una gestió activa del recurs que permet amortir la caiguda de la capacitat de mitigació del sector"*.

2.4.3 Impacte del canvi climàtic en el paper dels boscos en la mitigació dels riscos naturals

En zona muntanyenca, la probabilitat que es produeixi un fenomen natural (influenciat per la meteorologia específica d'aquest medi) és més important que a qualsevol altre medi natural. Els fenòmens naturals propis de la muntanya es desencadenen tradicionalment sota l'efecte d'esdeveniments climàtics (precipitacions de pluja o de neu, cicles de glaç/desglac, fortes calors, etc.) i s'originen en els vessants que poden controlar els desafiaments socioeconòmics (hàbitats, infraestructures, vies de comunicació...). La coincidència del fenomen natural (tipus, intensitat, període de retorn) i dels reptes amenaçats determinarà aleshores el nivell de risc natural. Com ja hem vist, el bosc i els medis naturals són fortament representats als Pirineus donat que ocupen una part important de la seva superfície. Així doncs, en el conjunt del massís, els boscos dominen entre 600 i 2.000 metres (Villiers et al., 2016).

El bosc pirinenc té un paper important de protecció contra els fenòmens naturals que es troben al massís (allaus de neu, aixaragallaments, riudes torrencials, laves torrencials, caigudes de roques i corriments de terres). És capaç de limitar els desencadenaments (fixació dels sòls mitjançant el sistema radicular i fixació del mantell de neu a la zona d'inici de l'allau, limitació dels rajos de superfície) i de reduir-ne els impactes (frenada, canalització o aturada de blocs rocosos o d'allaus en pendent mitjà).



Figura 2.4.4. Aturada d'un bloc de pedra per un faig. Font: S. Chauvin, FORESPIR

L'anàlisi de l'impacte del canvi climàtic en el paper de protecció dels boscos comprèn dos enfocaments: la dinàmica natural dels medis forestals i els riscos biòtics i abiòtics que poden afectar els medis forestals. En efecte, totes les formacions vegetals i totes les essències forestals no "protegeixen" de la mateixa manera contra els riscos naturals. Tanmateix, el canvi climàtic pot influenciar com evolucionarà la coberta vegetal però també pot donar lloc a un seguit de factors que no depenen de la dinàmica natural de la vegetació i que produeixen una alteració del paper de protecció dels boscos. En efecte, el tipus de gestió de les poblacions forestals és un element clau per evitar el desencadenament de fenòmens naturals i limitar la intensitat dels seus impactes en els reptes socioeconòmics del Massís. Les característiques de la cobertura vegetal d'una zona potencialment exposada a un fenomen natural tenen una forta incidència en la seva capacitat de dominar un risc. A aquest nivell, els dos paràmetres importants que cal tenir aquí en compte són el canvi del tipus de vegetació i el canvi de l'essència dominant d'una població forestal (Villiers et al., 2016).

En efecte, una dinàmica forestal estable permet a la població forestal adaptar-se progressivament als canvis, tot conservant les mateixes essències (a causa en particular de la diversitat genotípica²⁵ i de la selecció natural). En aquest cas, si la població forestal ja té un paper de protecció demostrat (i sense modificació dels fenòmens naturals i dels reptes socioeconòmics), es podrà mantenir el seu control del fenomen natural. Inversament, una dinàmica forestal regressiva, acompanyada per una dinàmica herbàcia regressiva cap a terrenys poc vegetatitzats, modificarà profundament la capacitat de la vegetació per dominar un risc natural. Tanmateix, diverses dinàmiques intermèdies intervenen i la presumpta evolució dels entorns també ha de tenir en compte les intervencions humanes, les poblacions animals domèstiques i silvestres, en particular dels grans ungulats, de la pressió pastoral, i dels seus impactes...

Pel que fa als canvis possibles d'essències dominants sota l'efecte dels canvis climàtics, podem plantejar globalment una successió de tipus:

(24) La reserva útil màxima dels sòls (RUM) representa la quantitat màxima d'aigua que un sòl pot contenir i està condicionada per nombrosos paràmetres com ara la textura, la profunditat de prospecció de les arrels, la càrrega de pedres o fins i tot la densitat aparent. Aquest paràmetre és un component d'entrada al càlcul de reserva d'aigua al sòl (RU) que representa l'aigua realment disponible al sòl. Font: <http://silvae.agroparistech.fr>

(25) La diversitat genotípica designa la varietat d'informació que porta el genoma d'un organisme, contingut a cada cèl·lula.

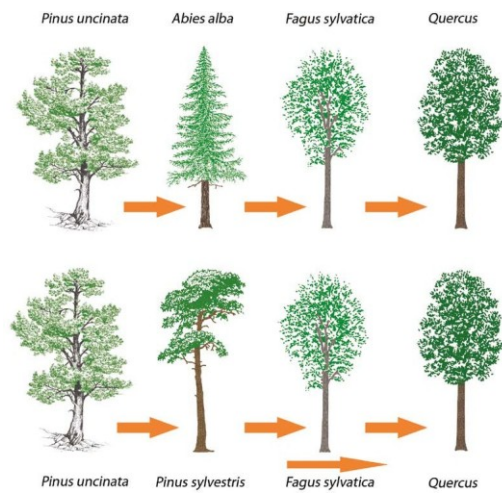


Figura 2.4.5. Tipus de successió possible d'essències sota l'efecte dels canvis climàtics en zona muntanyenca pirinenca. Font: FORESPIR segons Villiers et al., 2016.

exemple, els troncs dels fullosos són més resistents als xocs, la progressió en detriment de les coníferes a les àrees muntanyenques podria millorar la protecció contra les caigudes de blocs, mentre la remuntada de l'àrea de presència dels resinosos més enllà de l'estadi subalpí, permetria limitar les formacions d'allaus contribuint a estabilitzar millor el mantell de neu tot limitant les esllavissades (INTERREG CLIMCHALP, 2008).

En tots els casos, la dinàmica natural de les poblacions forestals muntanyenques és difícilment previsible (perquè depèn d'una multitud de factors que intervenen a molt llarg termini). Aquestes evolucions necessiten doncs una vigilància per part dels gestors forestals que poden millorar el paper de protecció del bosc si intervenen a temps en les poblacions, el paper de protecció de les quals disminueix. En un context en què la demanda social envers els boscos no deixa d'augmentar, aquest paper de protecció ha d'anar acompanyat d'un mètode de diagnòstic i de preiconitzacions d'intervencions silvícoles adaptades.

Tanmateix, aquestes successions potencials en la dinàmica forestal suposen una desaparició total de l'essència precedent, però, tant a l'escala dels individus a "curt termini" mitjançant l'aclimatació o la plasticitat fenotípica com a l'escala de la població a més llarg termini amb l'adaptació genètica, el bosc disposa de mecanismes d'adaptació (Rozenberg, 2015). Així, l'augment del risc a causa de canvis de vegetació, dependrà en part de la rapidesa dels canvis climàtics i del temps d'adaptació i de la regeneració disponible de què disposaran els arbres per omplir els eventuals nínxols alliberats (Villiers et al., 2016). Més enllà de les evolucions naturals de la cobertura vegetal, cal també considerar un segon element si volem entendre millor els impactes del canvi climàtic en els boscos de protecció: els riscos biòtics i abiòtics que poden afectar els medis forestals. La seva ocurrencia o la seva intensitat poden estar vinculades a les modificacions climàtiques (tempestes, incendis, sequeres, glaçades, onades de calor), o biològiques (plagues d'insectes, patògens, grans ungulats...) i són capaços de modificar la capacitat del bosc de dominar els fenòmens naturals (independentment de la manera com evolucionaran aquests fenòmens enfront del canvi climàtic). Fora de tota intervenció humana, aquests dos elements (dinàmica natural i riscos biòtics i abiòtics), íntimament lligats a les evolucions climàtiques, condicionen molt el paper dels boscos en la mitigació dels riscos naturals.

Amb una coberta forestal suficient, la composició i l'estructura de les poblacions tenen una influència en l'ocurrencia i la intensitat d'un fenomen natural: per

ENQUADRAMENT 2.4.1. LA GUIA DE GESTIÓ DELS BOSCOS DE PROTECCIÓ DELS PIRINEUS

El projecte INTERREG POCTEFA 2007-2013 "OPCC" va permetre dissenyar la "guia de gestió dels boscos pirinencs amb paper de protecció". Aquest document tècnic té l'objectiu de permetre als gestors identificar els itineraris silvícoles que cal posar en pràctica quan es donen dues condicions: la presència d'un risc natural demostrat i una regressió del domini de les incerteses per la vegetació. Aquesta guia s'aplica al conjunt dels Pirineus andorrans, espanyols i francesos i tracta de la gestió dels boscos amb paper de protecció contra les incerteses naturals, però sense paper de producció. La seva estructura permet al lector:

- 1) disposar d'un corpus d'informació sobre els fenòmens naturals i el paper de la vegetació,
- 2) avaluar el nivell de riscos naturals a una àrea creuant els nivells d'incerteses i de reptes,
- 3) avaluar l'índex de control de les incerteses de les poblacions forestals existents i
- 4) segons el nivell de control de les incerteses, identificar quines accions cal implantar per tal de mantenir un nivell de control de les incerteses suficient per les poblacions forestals.

2.4.4 Alteració de les condicions de salut dels boscos i possible desequilibri amb les comunitats d'agents patògens

Des de fa temps, l'Home s'ha preocupat per l'estat sanitari dels arbres i, de manera més àmplia, dels boscos, atès que la fusta i els productes forestals són recursos essencials per a la seva subsistència (alimentació, calefacció) i després per al seu desenvolupament (construcció, química verda). Més tard, a principis dels anys 1980, diferents fenòmens biòtics (atacs d'agents patògens) o abiòtics (en particular, climàtics) van provocar una deterioració progressiva de l'estat de salut de determinats boscos a Europa. Aquests fenòmens van provocar una preocupació general de la societat i d'aquesta manera van fer que els forestals proposessin mètodes de seguiment dels ecosistemes forestals.

La xarxa europea de seguiment sistemàtic dels ecosistemes

Malgrat el desenvolupament de varis mètodes els anys 1980, s'ha imposat progressivament la idea d'una xarxa estructurada de seguiment de l'estat sanitari dels boscos. Uns quants països europeus s'han dotat simultàniament d'una xarxa de tal manera que, mitjançant una circular europea del 1986, els dispositius nacionals similars de cada país s'han estructurat en una xarxa europea de seguiment sistemàtic dels ecosistemes forestals (Nageleisen i Taillardat, 2016).

En efecte, des de fa ara uns vint anys, s'avalua anualment l'estat sanitari dels arbres de més de 5.000 parcel·les a Europa.

Aquesta xarxa disposa de dos nivells en funció de la complexitat i l'exhaustivitat de dos nivells segons la complexitat dels paràmetres següents:

- Nivell I: seguiment estadístic sistemàtic de de parcel·les implantades en els nusos d'una xarxa quadrada de 16 km de costat;
- Nivell II: seguiment més precís en centenars de parcel·les experimentals d'un conjunt de paràmetres dendromètrics²⁶, sanitaris, ecològics, estacionals, meteorològics... per tal de comprendre la influència d'uns paràmetres sobre els altres.

Focus en el massís pirinenc

En el conjunt del massís pirinenc, existeixen 168 parcel·les de la xarxa europea amb dades mobilitzables (Rouyer et al., 2014). Aquestes parcel·les permetent, cada any, fer el balanç de l'estat sanitari dels arbres en parcel·les fixes i evidenciar tendències regionalitzades o per essència. D'aquesta manera, s'estudien varis paràmetres: el dèficit foliar, la decoloració foliar, la mortalitat de les branques i la mortalitat dels arbres. Arran dels recents canvis en els protocols de recollides sobre la decoloració foliar i la mortalitat de les branques, l'historial de dades comparables comença

	Nivel I	Nivel II	Total
Andorra	11	3	14
España	98	4	102
Francia	45	7	52
Total	154	14	168

Quadre 2.4.1 . Repartiment de les parcel·les de la xarxa europea de seguiment dels ecosistemes forestals al massís dels Pirineus. Font: Rouyer et al., 2014

(26) Els paràmetres dendromètrics designen les característiques físiques mesurables i quantificables dels arbres (com ara el diàmetre, la circumferència, l'altitud, el volum, l'edat) i de les poblacions forestals (com ara la densitat, la altitud mitjana, el volum mitjà, l'àrea basal, el creixement mitjà).

el 2011 i no permet delimitar tendències que afecten l'evolució d'aquests paràmetres.

Així doncs, el paràmetre que pot servir millor d'indicador dels efectes del canvi climàtic en les poblacions forestals és el dèficit foliar. En efecte, en situació d'estrès, els arbres perden una part de les seves ramificacions. Ramificacions que poden recrear (resiliència) pel desenvolupament de gemmes dorments²⁷ a favor de condicions climàtiques més favorables (Drenou, 2012). Aquest paràmetre disposa d'un historial de dades força important, donat que és seguit des del 1997 a la Xarxa europea de seguiment sistemàtic dels ecosistemes forestals. La valorització d'aquestes dades ha permès, per una banda, estudiar

les evolucions temporals relatives a les espècies, però també identificar diferències espacials potencials en la reacció dels ecosistemes forestals (Rouyer et al., 2014). És possible dibuixar diverses tendències resultat del treball d'anàlisi efectuat en el marc del projecte INTERREG POCTEFA "OPCC" sobre les dades mobilitzables de les parcel·les de la xarxa europea (OPCC-CTP, 2013).

Si l'índex de mortalitat dels arbres roman baix (inferior a un 0,5 % anual, excepte el 2004 arran dels atacs de corcs²⁸ després de la canícula del 2003), comencen a ser perceptibles alguns signes de degradació: dèficit foliar i mortalitat de les branques a la part superior de les capçades (Goudet, 2015).

Aquest augment és particularment marcat des de l'inici dels anys 2000 i té tendència a afectar els fullosos anomenats termòfils, tant de fullatge perenne com l'alzina (*Quercus ilex*) i la surera (*Quercus suber*) o de fullatge caduc com el roure martinenc (*Quercus pubescens*), o fins i tot el castanyer (*Castanea sativa*). Aquest mateix informe posa de relleu pel mateix període una constància del dèficit foliar per al roure de fulla gran (*Quercus petraea*) i el roure pèrol (*Quercus robur*) i un lleuger augment per als resinosos: picea (*Picea abies*), avet pectinat (*Abies alba*), douglas (*Pseudotsuga menziesii*) i pi melis (*Pinus pinaster*) (Maaf-IGN, 2016).

Per altra banda, la xarxa dels corresponsals observadors de la salut dels boscos permet registrar l'aparició i l'impacte de les plagues de diferents insectes. D'aquesta manera, hem pogut constatar des del 1989 l'impacte creixent de patògens com ara *Diplodia sapinea* (*Sphaeropsis sapinea*) en els pins després dels episodis de sequera i les calamarses.

El seguiment dels cicles dels insectes defoliadors també demostra que els pics de defoliació s'accentuen de vegades a causa de les condicions climàtiques (processionàries dels pins). Un altre exemple: la presència creixent de la malaltia de les tires vermelles (*Dothistroma septospora*) limita les plantacions de pi larici a la part oest de la cadena pirinenca.

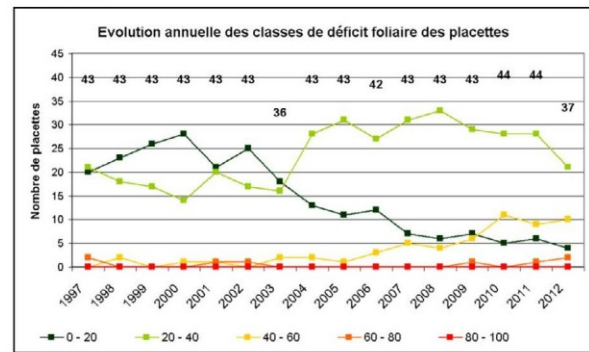
Per últim, es para una atenció particular a l'arribada de les plagues d'insectes exòtics, en particular els nematodes del pi que són objecte d'un pla de seguiment europeu.

Temors i perspectives

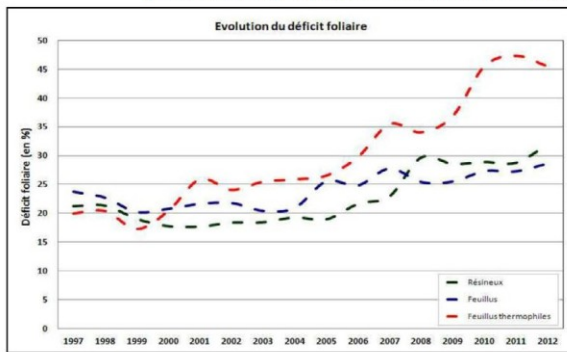
Els principals factors explicatius que es desprenen són les variacions d'alimentació en aigua de l'any en curs, però també dels dos anys anteriors: precipitació i diferència entre precipitació i evapotranspiració (Ferretti et al., 2014 in Maaf-IGN, 2016). La qual cosa confirma el paper preponderant del canvi climàtic i el seu impacte en els ecosistemes forestals a llarg termini si el règim de les precipitacions i de les temperatures tendeix a canviar.

Més enllà de la degradació sanitària dels arbres, una amplificació del fenomen de degradació fa témer mortalitats importants en el si de certes essències menys adaptades i per tant modificacions dels seguicis florístics dels ecosistemes amb "migració" de les àrees de repartiment més al Nord o en altitud (Bertrand et al., 2011). Tanmateix, esmentarem que la variabilitat genètica dels arbres pot ser un avantatge primordial enfront del canvi climàtic i que la gestió pot ajudar a anticipar els trasbalsaments esperats adaptant des d'ara la silvicultura i l'elecció de les essències per a les intervencions forestals dels propers anys.

France



Données du réseau systématique européen (France : DSF, Espagne : SSF, Andorre : DMA)



Espagne

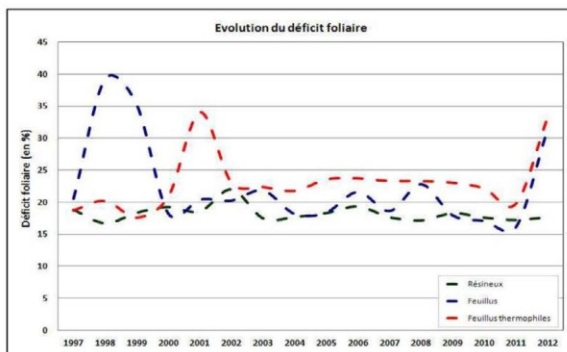
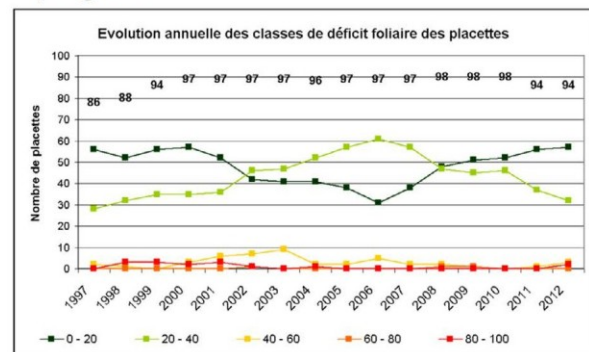


Figura 2.4.5 . Evolució i tendències del dèficit foliar (període 1997-2012) diferenciades per país i per grups d'essències a partir de la base de dades de la Xarxa Europea. Font: Rouyer et al., 2014.

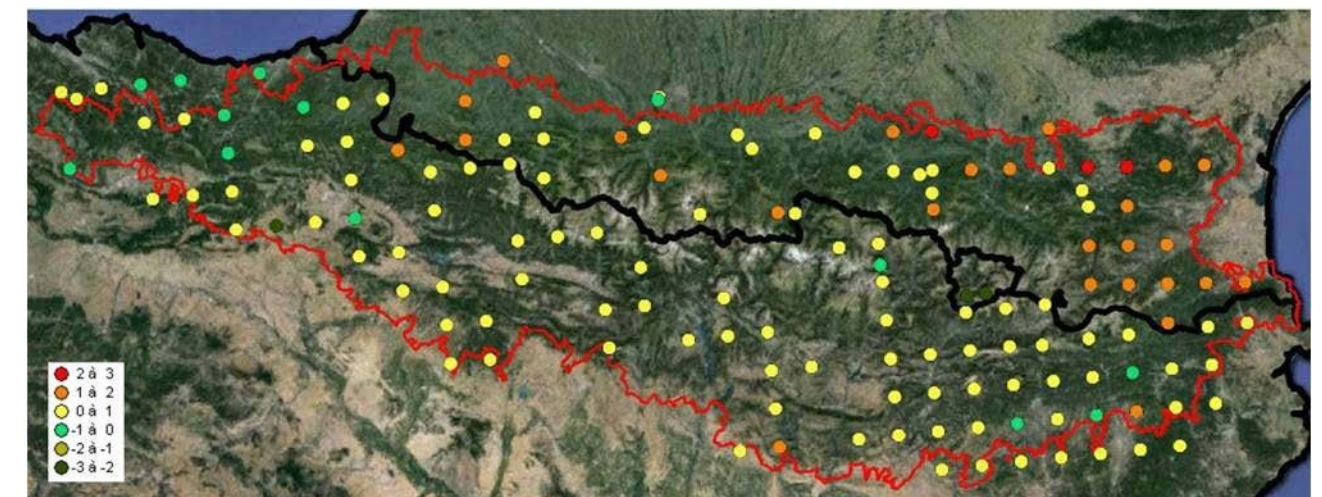


Figura 2.4.6. Coeficient de pendent de la regressió lineal del dèficit foliar (període 1997-2012) a les parcel·les de la xarxa europea. Font: Rouyer et al., 2014.

(27) Gemmal que no es desenvolupa l'any de la seva formació i que pot quedar en estat vegetatiu o desenvolupar-se després d'un esdeveniment.
 (28) Els escoltíds indiquen diverses espècies i gèneres de coleòpters xilòfags que participen en la descomposició de la fusta morta però que poden, igualment atacar diverses espècies d'arbres vius i causar danys importants que poden portar a la mort de l'arbre.

ENQUADRAT 2.4.2. ARCHI, UN NOU MÈTODE DE DIAGNÒSTIC SANITARI BASAT EN L'ANÀLISI DE L'ARQUITECTURA DELS ARBRES.

Les degradacions dels arbres no són totes fatalment irreversibles. Existeixen fenòmens de resiliència. El mètode ARCHI basa el seu diagnòstic en la caracterització d'aquesta dinàmica de retorn a la normalitat i l'observació de les diferents reaccions fisiològiques arquitectòniques. El mètode ARCHI és desenvolupat des de fa uns quants anys per l'Institut pour le Développement Forestal (IDF) en partenariat amb el CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) i el DSF (Département Santé Forêts).

El seu principi rau a dur a terme dues sèries d'observacions. La primera té a veure amb els símptomes de degradació de capçada (ramificació empobrida, mortalitat...); la segona es refereix als processos de restauració de la capçada, en particular el desenvolupament de brots epicòrmics. L'estudi de la relació de forces entre aquests processos antagonistes –degradació i restauració– permet fer un diagnòstic de l'arbre. Simplificant, el nombre de resultats possibles s'ha limitat a cinc: l'arbre sà, l'arbre estressat, l'arbre resilient, l'arbre en baixada del cim i l'arbre en degradació irreversible (Lebourgeois et al., 2015).

El mètode ARCHI es declina essència per essència. Avui, vàries essències ja gaudeixen de claus de determinació ARCHI (*Quercus robur*, *Quercus petraea*, *Quercus pubescens*, *Abies alba*, *Pseudotsuga menziesii*, *Castanea sativa*) i d'altres podran ser desenvolupades i traduïdes al castellà en el marc del projecte INTERREG POCTEFA CANOPEE (*Fagus sylvatica*, *Pinus sylvestris*, *Pinus uncinata*, *Pinus nigra subsp. salzmannii*).

2.4.5 Impacte del canvi climàtic en el risc d'incendis forestals als Pirineus

L'ocurrència i la propagació dels grans incendis depenen de l'existència de fonts d'inflamació, del volum i de la continuïtat del combustible i de la seva humitat.

Històricament, els Pirineus no han estat afectats per grans incendis, a causa en particular de les condicions climàtiques pròpies dels medis muntanyencs i de la humitat dels combustibles vinculada a aquestes condicions. A títol d'exemple, a Catalunya, el límit altitudinal a partir del qual s'observa una disminució important de la probabilitat d'un incendi forestal s'avalua a 700 metres (Gonzalez et al., 2006). En canvi,

el nombre d'incendis en determinades èpoques de l'any, la continuïtat i el volum del combustible en zona pirinenca són similars (fins i tot superiors en alguns casos) a les zones mediterrànies limítrofes, al igual que el nombre d'incendis naturals (provocats pel llamp) (González-Olabarria et al., 2015). Actualment, una gran part dels incendis que tenen lloc als Pirineus generalment és provocada per les activitats relacionades amb la gestió de les pastures (González-Olabarria et al., 2015). L'abandonament de les activitats agropastorals, que es va produir principalment en el decurs del segle XX, ha dut a un emmatollament de les zones pastorals de mitjana i alta muntanya (Ameztegui et al., 2010), augmentant d'aquesta manera la quantitat i la continuïtat del combustible. El factor que determina el desencadenament i la propagació d'un foc és el contingut d'aigua del combustible. D'aquesta manera, un augment de la temperatura i una durada més llarga del període de sequera estiuenca poden augmentar la disponibilitat del combustible i el risc d'incendis, augmentant així la freqüència dels anys "de risc" (Moriondo et al., 2006).

Actualment, una gran part dels incendis en alta muntanya té lloc durant l'hivern, quan els freds hivernals han ressecat l'herba i les zones de matolls. Està doncs previst que una "continentalització" del clima dels Pirineus, amb la disminució del mantell de neu, augmenti el risc d'ocurrència i de propagació de grans incendis. Per conseqüent, si no podem assegurar que el règim d'incendis serà similar a les zones limítrofes (més mediterrànies), no podem tanmateix excloure que en el futur l'ocurrència dels incendis estiuencs sigui més estesa i severa (Figura 2.4.7). 2009).

La vegetació dels Pirineus, comparada amb la vegetació mediterrània, no ha evolucionat alhora que els incendis devastadors. Actualment, la major part dels incendis als Pirineus és relativament poc estesa i es propaga ràpidament, tot afectant poc la reserva de llavors i el sòl. Tot i que els coneixements pel que fa a la resposta de les espècies pirinenques (vegetals i animals) als grans incendis siguin poc abundants, l'augment de la severitat dels incendis tindrà un impacte significatiu sobre l'estructura i la composició de la vegetació, augmentant l'erosió de les conques, el risc d'allaus i de torrents. L'extensió probable dels grans incendis podria donar lloc a una reducció de la superfície forestal i, per conseqüent, a una homogeneïtzació del paisatge. Sense cap dubte això tindrà un efecte negatiu en la biodiversitat, la protecció contra els riscos naturals, la bellesa dels paisatges i, per tant, el turisme als territoris afectats (vegeu capítol 3.1).

Un altre aspecte que cal tenir en compte és la percepció del risc per part dels turistes potencials. Si l'impacte

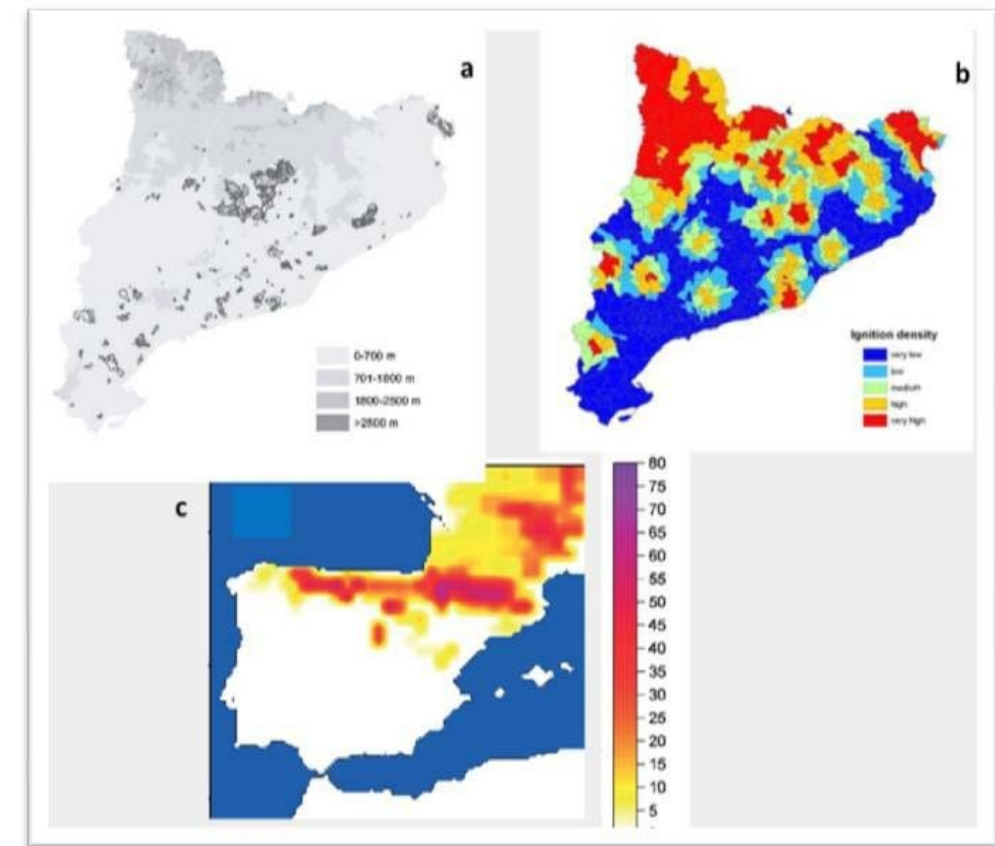


Figura 2.4.7. El règim d'incendis a zones pirinenques (ex. Catalunya) és definit pel règim de precipitacions (a: González et al., 2006), i les activitats agropastorals que determinen el nombre d'incendis hivernals (b: densitat dels incendis causats per artigues, in González-Olabarria et al., 2015. Aquests factors, però, poden ser modificats per una major recurrència dels anys "amb risc d'incendi" (c: percentatge de canvi en el nombre d'anys amb alt risc d'incendi per a un escenari de canvi climàtic B2, segons Moriondo et al., 2006).

del risc d'incendi no ha estat l'objecte d'un estudi aprofundit a Europa, als Estats Units s'ha observat una relació directa entre l'augment dels incendis durant un any, per una banda, i la disminució de l'afluència turística i de les pèrdues econòmiques del sector hotelier, per altra banda (Thapa et al., 2004). La lluita contra els incendis als Pirineus requereix una millora previsió del risc i del comportament d'un eventual incendi així com una gestió activa del combustible a les zones clau (Box 3). La meteorologia a les zones muntanyenques és molt variable i, en general, es disposa de poca informació sobre la seva variabilitat especial. Per conseqüent, la fiabilitat de la predicció meteorològica és molt feble a fina escala. L'ús tradicional del foc és des de sempre als Pirineus una eina per millorar les pastures i modificar el repartiment i la composició de la vegetació (Montané et al., 2009). L'activitat agrícola passada i el pastoralisme fins avui

han dut a crear un paisatge en mosaic, característica de nombroses valls i de l'alta muntanya pirinenca. La conservació del paisatge i, per tant, la disminució del risc d'incendi, passen per una valorització econòmica més forta de les activitats agrícoles, pastorals i forestals existents a les àrees muntanyenques, principalment amb un millor reconeixement i valoració de la qualitat dels seus productes. A més, la lluita contra els incendis requereix una gestió activa de les zones clau per evitar la propagació i disminuir la severitat dels grans incendis forestals (Casals et al, 2009).

2.4.6. Conclusions i recomanacions

A causa de la seva orientació Est-Oest, el massís dels Pirineus complica la migració que les espècies muntanyenques podrien operar per respondre al canvi climàtic (limitant les remuntades de les espècies del Sud cap al Nord). Malgrat això, existeixen pocs estudis globals sobre els impactes del canvi climàtic en els boscos pirinencs que integrin el conjunt del seu gradient Est-Oest i Nord-Sud. Actualment, s'està duent a terme un treball important en el marc de l'Observatori Pirinenc del Canvi Climàtic per compensar aquestes mancances.

El bosc pirinenc té un vincle estret amb l'evolució de la societat rural. Nombrosos reptes socioeconòmics estan directament lligats a l'evolució dels medis naturals i dels factors que els condicionen. El canvi climàtic, en modificar les temperatures i la pluviometria, altera el règim de les pertorbacions, tant si són biòtiques (patògens, malalties...) com abiòtiques (incendis, tempestes...) i per tant impacta amb força la dinàmica i el funcionament dels ecosistemes forestals. Tanmateix, no cal oblidar d'altres factors que tenen un impacte a més curt termini, tant si es tracta de la pressió cinegètica (veritable repte per a la regeneració), la disminució de l'activitat pastoral tradicional, o més senzillament la gestió forestal per a la producció de fusta. Canvi d'estructura, de composició, d'estat sanitari, d'àrees de repartiment geogràfic, vulnerabilitat envers fenòmens exteriors (patògens, fenòmens climàtics...) són tots efectes (positius o negatius) que cal anticipar i acompanyar donat que condicionaran l'evolució de la coberta vegetal pirinenc i podran induir una modificació important de tots els components de la multifuncionalitat del nostre bosc de muntanya. Predir la resposta dels boscos al canvi climàtic és un exercici complicat i incert que requereix un volum important de coneixements, sobretot quan sabem que les respostes no són tan ràpides i lineals com havíem pensat inicialment.

Principals reptes

El bosc i la seva gestió han de ser concebuts a llarg termini. Les decisions que es prenen avui condicionaran els nostres boscos de demà. Per tant, per augmentar la resiliència dels boscos pirinencs enfront dels efectes negatius del canvi climàtic, convé:

- Millorar els coneixements a escala pirinenc dels efectes i impactes del canvi climàtic en els boscos (en particular, els més vulnerables a curt i mig termini) i el processos d'adaptació (naturals o antròpics),

- Mantenir i desenvolupar les activitats agrícoles, pastorals i silvícoles a les zones muntanyenques; activitats que garanteixen una gestió sostenible dels medis amb efectes múltiples: disminució del volum i de la continuïtat dels combustibles, mosaic d'hàbitats més resilents, limitació dels riscos i augment de la resiliència dels boscos en cas d'accidents sanitaris o climàtics...

- Afavorir la transmissió dels avenços tècnics i científics destinats a públics no especialistes.

Els actors pirinencs, i en primer lloc els propietaris, científics, gestors i poders públics, han d'actuar des d'avui i amb urgència per tal que el bosc pugui evolucionar en les millors condicions possibles i adaptar-se així als canvis.

Recomanacions

Mesures suaus²⁹

- Experimentar i fer conèixer diferents models de gestió forestal adaptativa per augmentar la capacitat de resiliència dels boscos enfront d'esdeveniments climàtics desfavorables repetits i/o extrems.
- Perpetuar i desplegar la xarxa d'observació de l'evolució fenològica dels boscos pirinencs (períodes de desbarrament).
- Promoure les sinèrgies entre els diferents processos d'observació i de seguiment (teledetecció, ciències participatives...).
- Aprofundir els coneixements i les experimentacions sobre la variabilitat genètica dels arbres per tal de permetre anticipar les alteracions potencials tot adaptant des d'ara la silvicultura i l'elecció de les espècies per a les intervencions forestals dels propers anys.

- Identificar i posar de relleu les possibles pèrdues d'espècies i d'hàbitats forestals vulnerables al canvi climàtic per tal d'avaluar l'empobriment genètic a les àrees muntanyenques.

- Promoure el desenvolupament d'un dispositiu de vigilància, d'alerta i de resposta operativa enfront de les plagues forestals i de les patologies que poden afectar els boscos pirinencs.

- Millorar els coneixements sobre als impactes del canvi climàtic en els ecosistemes forestals en el seu conjunt.

- Comunicar al gran públic i als polítics electes locals les interaccions entre bosc i canvi climàtic (impactes potencials, utilitat, adaptació...) i el paper que tenen els gestors.

- Millorar les capacitats de previsió del risc d'incendi desenvolupant un índex adaptat a les especificitats del Massís (vegetació, meteorologia, topografia...).

- Millorar els coneixements sobre les zones de compatibilitat climàtica i sobre les àrees de repartiment potencial dels boscos dels Pirineus per identificar les zones més vulnerables i guiar així els propietaris i gestors en les seves eleccions silvícoles.

- Acompanyar els propietaris forestals per afavorir les essències adaptades a les estacions que compleixen les seves exigències de disponibilitat d'elements nutritius, oxigen i aigua.

Mesures verdes³⁰

- Enfortir i donar suport a la gestió forestal sostenible per disminuir la vulnerabilitat dels boscos enfront de les pertorbacions naturals: afavorir una silvicultura dinàmica per tal de minimitzar els riscos d'accidents i optimitzar la resiliència de les poblacions.

- Promoure l'ús de la fusta local (transformada localment) com a material: això garanteix un segrest "segur" del CO₂ i permet limitar l'ús d'altres materials amb més impacte en gasos amb efecte hivernacle.

IDEES CLAU

- Els boscos pirinencs aporten múltiples béns i serveis: producció de fusta i d'altres productes forestals no llenyosos, captació i emmagatzematge del CO₂, protecció contra els riscos naturals, un reservori de biodiversitat, l'acolliment del públic...

- El canvi climàtic tindrà forts impactes en el funcionament dels boscos dels Pirineus a causa en particular de l'augment de les temperatures i de les modificacions del règim de precipitacions (augment del període de vegetació, modificació de la productivitat, canvi en el repartiment de les espècies...). El canvi climàtic també pot tenir conseqüències els efectes de les quals poden impactar els boscos pirinencs (incendis, plagues, patògens, tempestes...).

- A més dels efectes del canvi climàtic, d'altres factors del canvi global (ús dels sòls, pràctiques...) impacten profundament la dinàmica i el funcionament dels boscos pirinencs. La gestió forestal és una palanca fonamental de l'adaptació dels boscos al canvi climàtic: "amb la seva acció d'avui, el forestal prepara el bosc de demà". cambio climático: "Mediante la acción de hoy el forestal prepara el bosque de mañana".

- Promoure l'ús de la fusta energia local per substituir energies que emeten més gasos amb efecte hivernacle (l'impacte carboni de la combustió de la fusta és zero perquè allibera el CO₂ que ha estat emmagatzemat per l'arbre en el decurs del seu desenvolupament).

- Optimitzar la gestió dels medis naturals de les zones recentment exposades al risc d'incendi promovent una gestió activa (en particular, silvícola i agropastoral) per tal de limitar el volum i la continuïtat de combustibles a les zones de risc.

(29) Les mesures soft o mesures no estructurals per reduir o pal·liar els efectes negatius del canvi climàtic. Aquesta categoria de mesura està típicament representada pels estudis d'investigació enfocats a cobrir llacunes de coneixement o per enriquir les bases de coneixement sobre el canvi climàtic, els seus impactes i els sectors més vulnerables. També trobem en aquesta categoria el desenvolupament de metodologies i sistemes específics per reduir riscos derivats del canvi climàtic (p. e. desenvolupament d'un early warning system transfronterer per a la gestió de les onades de calor al massís).

(30) Les mesures verdes o basades en serveis ecosistèmics inclouen totes les mesures, bones pràctiques, estudis o iniciatives que tinguin com a principi l'ús dels serveis ecosistèmics que ofereixen els diferents recursos naturals per pal·liar els efectes negatius del canvi climàtic (p. e. pràctiques silviculturals conservadores per augmentar la capacitat dels boscos dels Pirineus per reduir els riscos hidrogeològics).

2.5. Ecosistemes sensibles d'alta muntanya: estanys i torberes

Coordinadors: Blas Valero Garcés (IPE-CSIC)

Autors i Coautors: David Amouroux (U. Pau- Pays de L'Adour), Laure Gandois (EcoLab, CNRS, UPS, INPT), Didier Galop (EcoLab, CNRS, UPS, INPT), Gaël Le Roux (EcoLab, CNRS, UPS, INPT), Lluís Camarero (CEAB-CSIC), Jordi Catalán (CSIC-UAB), Jesús Miguel Santamaría (UNAV), David Elustondo (UNAV), Sheila Izquieta-Rojano (UNAV) Alberto de Diego (UPV-EHU), Ana Moreno (IPE-CSIC) Fernando Barreiro-Lostres (IPE-CSIC), Pilar Mata-Campo, (IGME), Pablo Corella (IFQSH-CSIC) Penélope González-Sampériz (IPE-CSIC), Anna Avila Castells (CREAF-UAB), Olaia Liñero, (UPV-EHU), Marisol Felip (CREAF-UB).

2.5.1. Característiques dels estanys i torberes pirinencs

Els estanys i torberes d'alta muntanya del Pirineu són elements icònics del paisatge pirinenc, vulnerables als recents canvis climàtics i a la creixent pressió antròpica. Més de mil estanys d'alta muntanya (> 0.5 ha) s'han inventariat al Pirineu, la majoria situats entre 2000 i 2500 m d'altitud en els pisos alpí i montà, en funció de diferents criteris d'extensió i altitud (Castillo-Jurado, 1992). Els 17 estanys més grans (amb una àrea superior a 0.3 km²) sumen una superfície de 7.87 km². D'acord amb l'inventari de Castillo-Jurado (1992), el 75% dels estanys tenen una superfície de menys de 0.04 km² i una àrea de la conca de drenatge que varia entre 0.1 km² (Gentianes, Gave de Pau) i 32.6 km² (Baños de Panticosa, Gállego), amb una mitjana de 1.67 km². Pel que fa a la profunditat, es distingeixen dos tipus d'estanys, els relativament somers (<10-15 m de profunditat màxima) i els profunds (> 15 m). En total hi ha 90 estanys amb profunditats majors de 25 m, dels quals 47 superen els 40 m.

Les torberes són ecosistemes que es caracteritzen per l'acumulació de matèria orgànica derivada de la vegetació en unes condicions de saturació d'aigua. Al Pirineu, la majoria són de tipus "fen", alimentades per la precipitació, aigües superficials i/o subterrànies. La seva formació depèn de la topografia i les condicions climàtiques i hidrològiques. La majoria de les torberes pirinencs es van generar després de la deglaciació i han continuat acumulant matèria orgànica fins a l'actualitat. No existeix un inventari complet de les torberes del Pirineu, tot i que són menys nombroses que en altres muntanyes de clima més atlàntic (Heras et al., 2017). En particular, hi ha poca informació sobre

RESUM

Els estanys i torberes d'alta muntanya són elements icònics del paisatge del Pirineu molt vulnerables al canvi climàtic i a la creixent pressió antròpica. Durant mil·lennis han sostingut una complexa biodiversitat i han tingut una funció d'emmagatzematge de carboni, a més de proporcionar recursos hídrics, hàbitats per al pasturatge i, més recentment, recursos per al turisme. La seva conservació en el marc d'un desenvolupament sostenible de la muntanya és un repte i una oportunitat per conscienciar dels efectes del canvi global en territoris considerats prístins.

les molles petites (<1 ha) tot i ser més abundants, especialment a majors altures, on es troben associades a petits estanys alpins. Les torberes més ben desenvolupades es localitzen als Pirineus navarresos (Atxuri, Belate, Gesaleta i Baltsagorrieta) i en el vessant francès (Bernadouze i Col d'Ech). Les dades existents sobre el gruix de torba acumulada en els últims milers d'anys en aquests ecosistemes es limiten a uns pocs llocs, de manera que no es disposa d'estimacions fiables del reservori de carboni que representen.

La dinàmica d'aquests ecosistemes originats pels processos glaciars del Quaternari està fortament condicionada pels processos criosfèrics a les conques de drenatge (innivació i fusió de la neu, dinàmica associada de les geleres i del permafrost). Les característiques d'aquests estanys i torberes (elevada altitud i radiació solar amb elevades dosis d'UV, ultraoligotrofia a causa de l'escassetat de nutrients, aigües molt diluïdes, baixes temperatures, presència d'una capa de gel durant diversos mesos, etc.) els fan molt sensibles a factors climàtics (règim de temperatures i precipitacions, vents, etc) (Figura 2.5.1). D'una banda són "sentinelles" dels canvis que estan succeint en el territori pirinenc, donada la seva gran sensibilitat a les fluctuacions climàtiques i ambientals i a les alteracions de les seves conques de recepció. D'altra banda, els seus sediments arxiven les complexes senyals del paisatge, del sistema aquàtic i dels processos biològics i abiòtics, i de com han evolucionat en els últims segles o mil·lennis.

Els estanys i torberes proporcionen serveis al territori pirinenc més enllà del seu caràcter d'indicadors del canvi global. Durant les últimes dècades, l'economia de moltes zones de muntanya s'ha tornat cada vegada més dependent de les activitats turístiques relacionades amb els esports d'hivern i amb l'excursionisme d'estiu. Alguns dels elements singulars de l'alta muntanya

com glaceres, estanys, torberes i ecosistemes de tundra alpina són elements dinamitzadors de les economies locals, i gaudeixen de diverses figures de protecció i mesures de conservació en els diferents territoris pirinencs. Donada la gran importància dels recursos hídrics d'alta muntanya i d'aquests elements singulars del paisatge per a múltiples sectors (turisme, agricultura, generació d'energia, medi ambient, subministrament d'aigua, etc.), la qualitat dels serveis proporcionats per estanys i torberes en el futur depèn directament de les respostes de la criosfera-hidrosfera-biosfera al canvi climàtic en el territori pirinenc. L'alta muntanya és el graner d'aigua, la fàbrica d'energia i el pati d'esbarjo de tots els territoris pirinencs, una regió amb creixents necessitats d'aigua i recursos energètics per a consums agrícoles i humans.

2.5.2. Processos en estanys i torberes d'alta muntanya en un context de canvi climàtic

Los processos biogeoquímics en els llacs i torberes d'alt muntanya estan determinats pel caràcter extrem d'aquests hàbitats (Catalan et al., 2006). Agències territorials, confederacions hidrogràfiques y ministeris d'Espanya, França i Andorra mantenen programes d'anàlisi per comprovar el

estat ecològic d'alguns llacs als Pirineus (ver CHE31 y ACA32:) Les aigües d'alta són en general molt diluïdes, amb un baix contingut en sals dissoltes oligotròfiques i amb una elevada transparència.

El tipus de conca i el substrat geològic són determinants de la composició química de les aigües (formacions carbonatades versus silícies) i del cicle del carboni (presència de carboni orgànic dissolt associat a l'abundància de sòls a la conca). Els cicles biogeoquímics estan fortament controlats pel substrat (alcalinitat, cicle del carboni), la micro- i macrobiota (nutrients) i per la deposició atmosfèrica (nutrients, contaminants). En particular, el pH de les aigües és un dels paràmetres que controla la presència d'algunes microalgues i macròfits. El pH depèn de l'alcalinitat i està relacionat amb el substrat de la conca (Catalan et al., 2006). D'acord amb un estudi de l'estiu de l'any 2000 (Catalan et al., 2006), el 70% dels estanys són ultraoligotròfics (TP < 4.7 µg L⁻¹), el 22% oligotròfics (4.7 < TP < 9.3 µg L⁻¹) i el 6% són mesotròfics (9.3 < TP < 31 µg L⁻¹). Durant l'estació sense gel, la penetració de la llum arriba fins al fons en més del 75% dels estanys, el que permet el desenvolupament de biota autòtrofa. La radiació ultraviolada pot ser molt elevada en aquests sistemes, encara que els seus efectes en

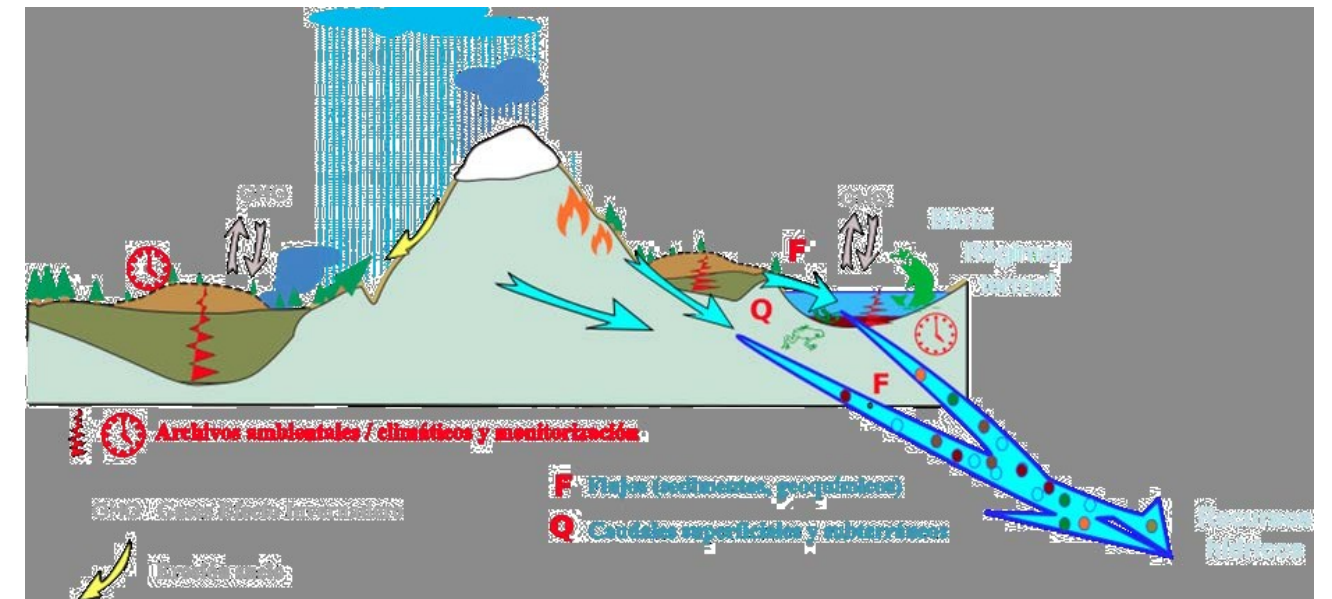


Figura 2.5.1. Cicles biogeoquímics en els estanys i torberes d'alta muntanya. Font: Projecte REPLIM

(31) <http://www.chebro.es/>

(32) <http://aca-web.gencat.cat/>

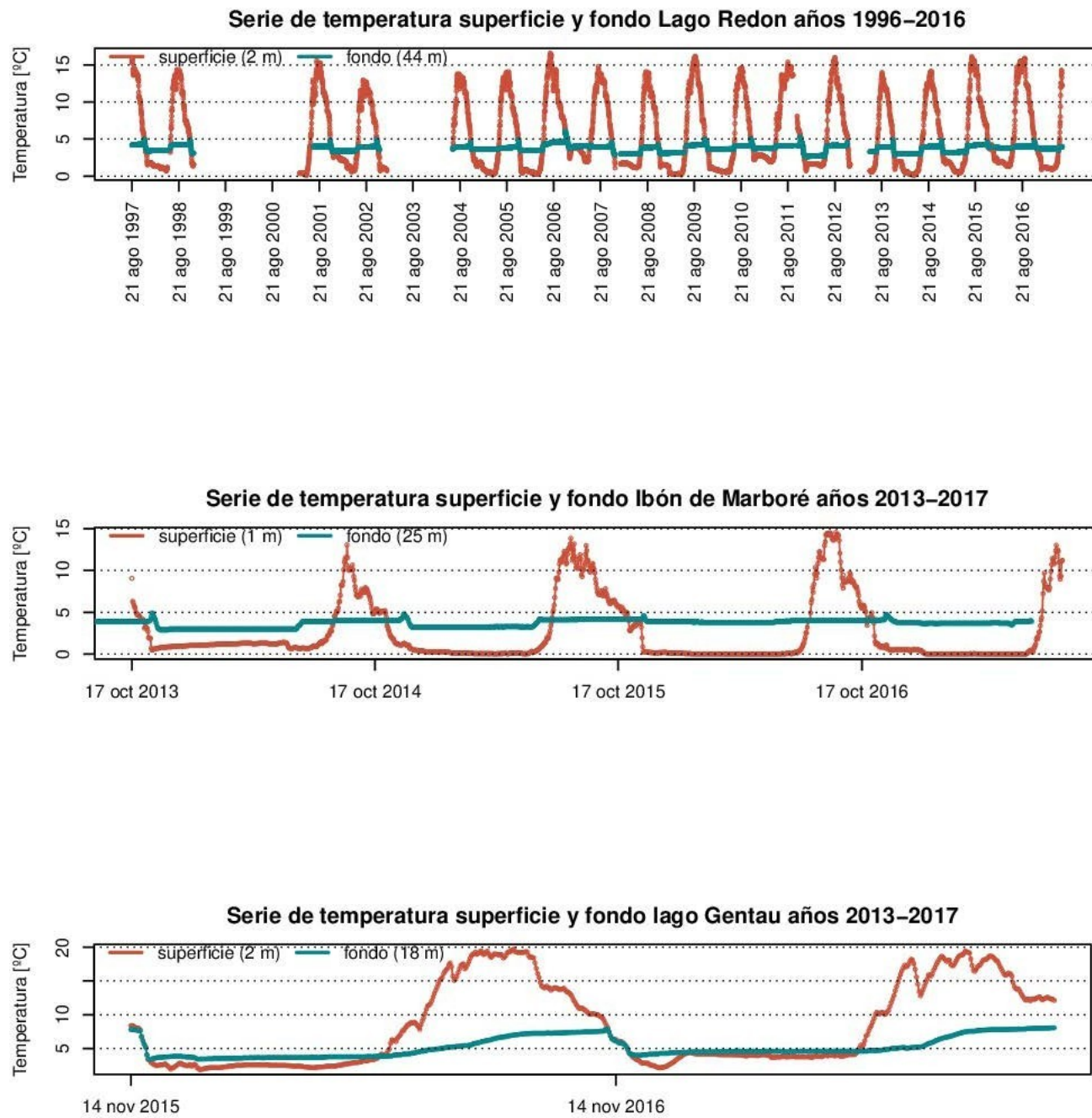


Figura 2.5.2. Perfil de temperatura i de fons en el Llac Redon (1969-2016), Marboré (2013-2017) i Llac Gentau (2013-2017). Font: a partir de dades del projecte CLAM-IGME i REPLIM.

els microorganismes apunten tendències diverses. Els estanys i torberes actuen com a acumuladors en els seus sediments de contaminants orgànics i inorgànics (metalls pesants) (Catalan et al. 1993; Camarero, 2003; Le Roux et al., 2016). Més del 75% dels estanys estudiats (Camarero, 2003) mostren factors d'enriquiment per a metalls per sobre del 1.5, demostrant l'efecte de la contaminació atmosfèrica a l'alta muntanya, major als Pirineus centrals i orientals que en els occidentals (Fig. 2.5.3A).

Els sediments acumulats en diversos estanys mostren que la deposició atmosfèrica de metalls pesants ha estat important en l'època romana, medieval i contemporània associada a l'activitat minera i metal·lúrgica i ha disminuït des de finals del segle XX amb la reducció de l'ús de benzina amb Pb (Camarero et al., 1998). Altres contaminants orgànics, per contra, han augmentat en les últimes dècades (Arellano et al., 2015). Els estanys pirinencs han patit una acidificació moderada a causa de la pluja àcida produïda durant la segona meitat del segle XX (Camarero, 2017). Els cicles físics anuals en els estanys i torberes d'alçada mostren una gran variabilitat estacional, depenent de la disponibilitat hídrica, règim tèrmic estacional i períodes de coberta de gel. Els cicles biològics segueixen el mateix patró estacional, amb diferents fases de màxima productivitat de les comunitats del fitoplàncton (Camarero et al., 1999; Felip i Catalan, 2000; Ventura

et al., 2000). Només en alguns estanys es disposa de sèries de mesures limnològiques plurianuals (Redon, des de 1996; Fig. 2.5.2; Marboré des de 2013; Sánchez et al., 2017).

Les torberes són ecosistemes essencials en la hidrologia i en el cicle del carboni en zones de muntanya (Parish et al., 2008). En elles s'emmagatzema carboni per l'acumulació de matèria orgànica i actuen com a filtres de l'aigua (contaminants, matèria orgànica, partícules de sòl), fet que assegura la qualitat de l'aigua a les capçaleres de les conques hidrogràfiques. Malgrat la seva relativa reduïda extensió, apareixen en nombroses conques i mantenen una biodiversitat única. Les torberes de Sphagnum del Pirineu estan al límit meridional de la seva distribució geogràfica i són, per tant, molt sensibles als canvis climàtics i antròpics. El cicle del carboni en les torberes d'alta muntanya és complex i no està ben quantificat. Les torberes són els ecosistemes terrestres més efectius en quant a magatzems de carboni. Les torberes de zones temperades contenen set vegades més carboni per hectàrea que qualsevol altre ecosistema. Les torberes han acumulat carboni al llarg de mil·lennis, però desconeixem les taxes d'acumulació natural al llarg de l'Holocè (últims 11700 anys), de l'Antropocè i les possibles variacions en el segle XX degudes a l'escalfament global. A escales temporals menors i per processos ambientals (inundacions, sequeres, focs), les torberes poden potencialment actuar com

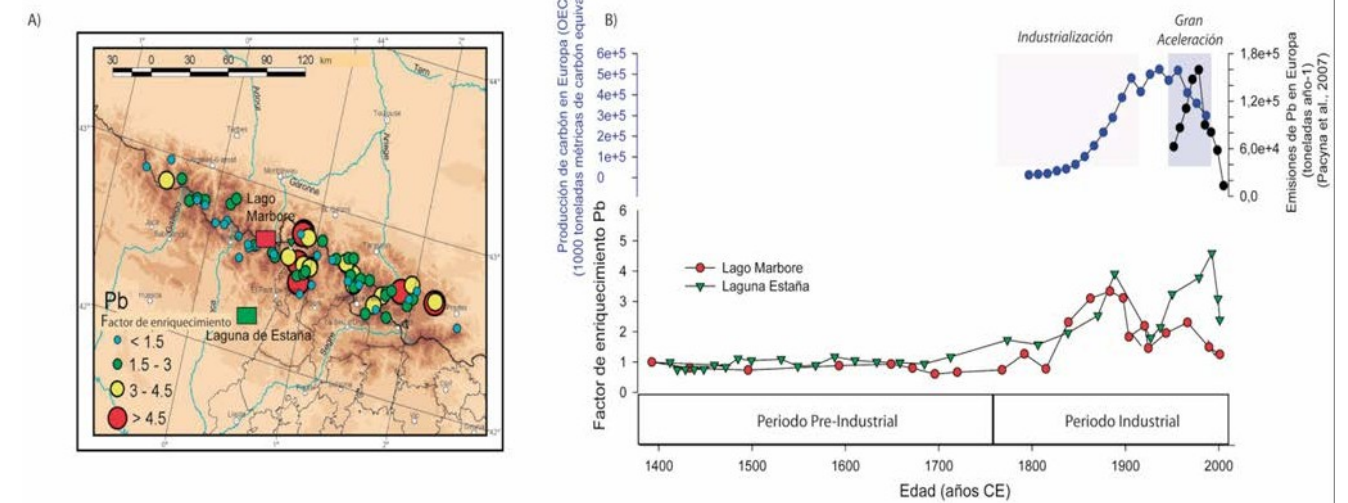


Figura 2.5.3. Distribució geogràfica del factor d'enriquiment de Pb en sediments superficials d'estanys del Pirineu (Camarero, 2003). B. Factors d'enriquiment de metalls pesants a l'ibón de Marboré durant els darrers 600 anys. Font: Camarero, 2003.

a emissores de CH₄ i CO₂ a l'atmosfera o a les conques hidrogràfiques (en forma de carboni orgànic dissolt o particulat). Finalment,

2.5.3. Impactes previstos

Les zones de major altitud de totes les muntanyes del món són àrees on la incidència del canvi climàtic és especialment elevada. Els principals impactes previstos en els estanys i torberes d'alta muntanya i les seves conques de recepció estan relacionats amb l'alteració de les seves característiques fisicoquímiques i biològiques com a resposta a la variació de la disponibilitat hídrica i l'augment de les temperatures. A aquestes altituds és important no només l'escalfament directe de l'aigua de l'estany, sinó també la durada de la coberta de gel de l'estany i del mantell nival en la seva conca. Entre d'altres processos són esperables canvis en el cicle de gel i desgel, en el tipus i abundància de determinades comunitats i en la composició química de les aigües (alcalinitat). A les conques de recepció, la degradació de les geleres i la desaparició de les àrees amb sòls congelats estacionalment (permafrost) portarà a canvis en la hidrologia superficial i a la pèrdua de comunitats vegetals relictas. Associades a estanys i torberes, hi trobem les comunitats vegetals d'aiguamolls i congestes i moltes espècies boreoalpines al límit de la seva distribució, per això resulten especialment vulnerables a qualsevol canvi tèrmic o del patró de precipitacions. Alguns dels serveis ecosistèmics (qualitat i quantitat d'aigua; turisme) es poden veure igualment afectats.

A la majoria de muntanyes del món s'han detectat canvis en l'estat tròfic dels llacs (Elser et al., 2009; Camarero i Catalan, 2012) i les causes s'han atribuït tant a canvis en el règim tèrmic i de vents causats pel canvi climàtic, com a canvis en la deposició atmosfèrica de nitrogen i fòsfor relacionats amb els canvis en la circulació sinòptica de les masses d'aire. El previsible augment en la radiació UV en zones de muntanya pot tenir un efecte important en les comunitats planctòniques dels llacs com s'ha demostrat en estudis a l'Himàlaia i els Alps (Sommaruga et al., 1999). Estudis als Alps austríacs han demostrat que l'efecte combinat d'aquests factors fa que els llacs a la franja d'altitud entre 1500 i 2000 m siguin ultrasensibles als canvis de temperatura i precipitació, ja que és en aquest rang d'altitud on els canvis en la coberta de gel i el mantell nival són més pronunciats. En general, els llacs més profunds tenen una major inèrcia tèrmica i els costa més escalfar-se i refredar-se que els somers, de manera que es pot esperar que responguin més lentament als canvis físics (gradient de temperatura i densitat), químics (salinitat, alcalinitat, pH, nutrients) i biològics (productivitat primària, composició de les comunitats biològiques).

Els impactes previstos en els estanys i torberes del Pirineu deguts a la variabilitat climàtica es superposen als causats per les activitats antròpiques. Des d'un punt de vista històric, els estanys del Pirineu, malgrat la seva localització remota, han sofert importants impactes antròpics en els últims mil·lennis. La deposició de metalls pesants es remunta fins a l'època romana. Els situats a menor altura, han vist les seves conques de recepció desforestades des de l'època medieval i sotmeses a una forta pressió ramadera (González-Sampériz et al., 2016). La introducció de peixos també és una pràctica antiga (primeres referències al segle XV, Miró i Ventura, 2013). Durant el segle XX els impactes principals van ser la construcció de preses hidroelèctriques i l'augment del turisme i les infraestructures relacionades amb els esports d'hivern i estiu.

Els impactes del canvi climàtic en aquests ecosistemes pirinencs van associats principalment als canvis en els règims de temperatures. La tendència general cap a un augment de la temperatura mitjana al Pirineu (uns 2°C des del final de la Petita Edat del Gel i amb una taxa de 0,2 °C / dècada des de 1950) i la disminució del període amb coberta de gel suposa un canvi essencial en el règim tèrmic estacional dels estanys. La major part dels estudis indiquen que l'escalfament tèrmic ha causat una menor acumulació i una menor durada del mantell de neu a la major part de les muntanyes del món, sent molt probable que aquest efecte s'acceleri de forma molt marcada en el futur. Alguns models (Schneider et al., 2010) prediuen que la temperatura de l'aigua superficial dels llacs (epilimnion) augmentarà en més de 10°C durant el segle XXI, d'acord amb observacions disponibles. Aquestes projeccions de canvi en la hidrologia, coberta de gel i temperatura de l'aigua excedeixen les variacions experimentades en aquests llacs durant els darrers 11700 anys (Holocè). En diversos estanys pirinencs estudiats durant els últims segles (Arreo, Basa de la Mora, Marboré, Montcortès, Redon) s'han documentat canvis importants en el flux de sediments, en la flora (associacions d'algues diatomees) i fauna (micro i macroinvertebrats) al final de la Petita Edat del Gel (finals del segle XIX) i en les últimes dècades. Les causes d'aquests canvis són complexes i poden incloure factors climàtics (augment de temperatura) i antròpics (major deposició atmosfèrica de nutrients). Al Pirineu, l'estany Redon és un dels més ben estudiats i mostra una tendència clara a l'augment de la temperatura (accelerada en les últimes dècades) al llarg del segle XX (Catalan et al., 2002; III informe CCC, 2016). Aquests canvis de temperatura, majors a l'estiu i particularment a la tardor, han afavorit espècies de diatomees planctòniques de vida curta que floreixen a la tardor (*Fragilaria nanana* i *Cyclotella pseudostelligera*) i també d'alguns crisòfits que formen els cists a la primavera. La durada de la

coberta de gel controla també directament el tipus de comunitats de crustacis planctònics (Catalan et al., 2009). La manca de sèries temporals llargues que registrin la dinàmica en el passat recent d'aquests ecosistemes dificulta assignar els canvis observats en els últims anys a les fluctuacions climàtiques, a l'impacte antròpic o a les esperables sinergies entre tots dos factors.

Hi ha altres efectes indirectes del canvi climàtic derivats de la fusió de glaceres i de sòls permanentment gelats (permafrost), en particular, l'alliberament de metalls traça o contaminants orgànics persistents i l'augment de la mobilització de la matèria orgànica i contaminants associats (Bacardit i Camarero, 2010). A més de la contaminació heretada i del continuat impacte d'alguns metalls traça, els efectes del canvi climàtic poden amplificar tant la seva remobilització en els reservoris d'aquests ecosistemes com augmentar les seves taxes de deposició (Le Roux et al., 2016).

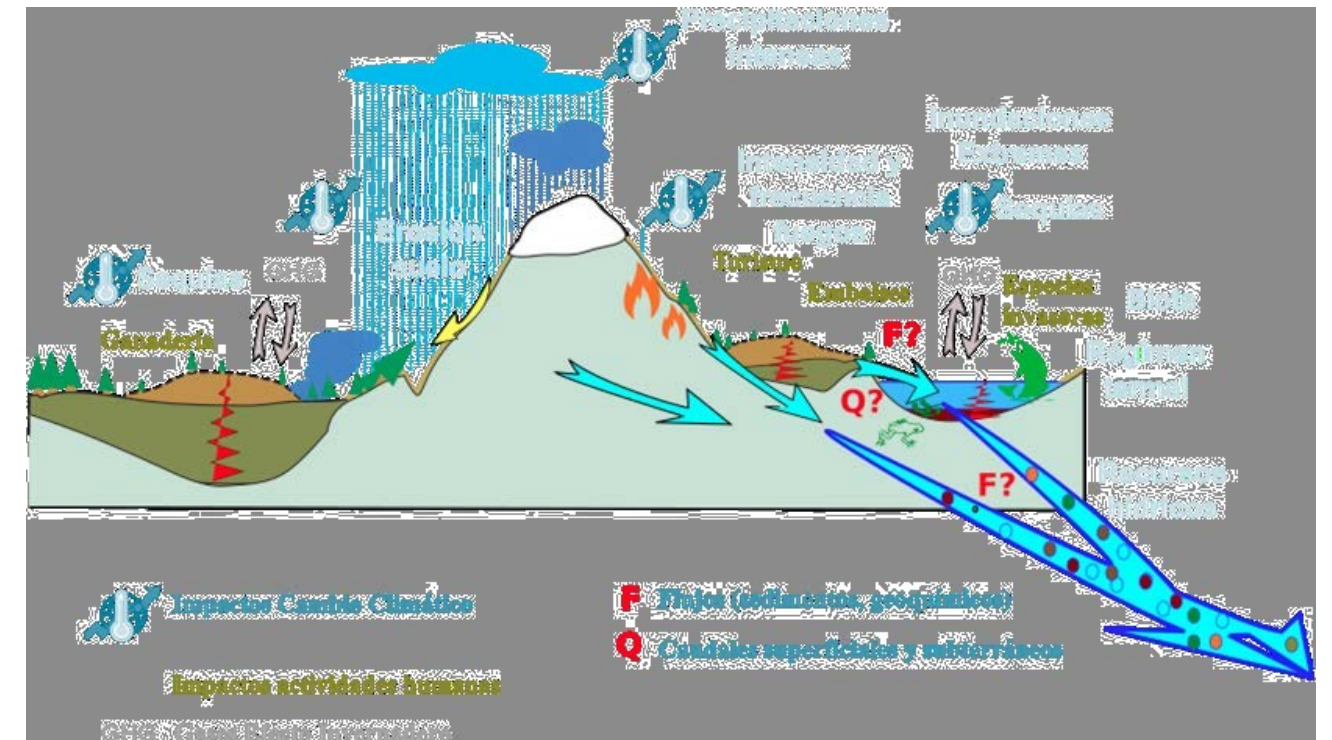


Figura 2.5.4. Impactes previsibles en estanys i torberes de muntanya a causa del canvi climàtic i de l'impacte antròpic. Font: Projecte REPLIM

A les torberes els principals impactes esperables del CC són: degradació de les torberes, pèrdua de superfície inundada, inversió de l'efecte embornal de carboni, i pèrdua de serveis eco-sistèmics.

Aquests canvis afectaran la capacitat d'aquests ecosistemes per ser magatzems de carboni, reguladors de la quantitat i qualitat de les aigües i per salvaguardar la biodiversitat. L'augment de la variabilitat en les precipitacions en l'alta muntanya incrementarà la freqüència i intensitat de les sequeres i inundacions, amb possibles canvis en les àrees inundades de les torberes. L'augment de la temperatura prolongarà la productivitat en augmentar la durada de l'estació de creixement. Les taxes de descomposició de la torba també augmentaran, potencialment incrementant les emissions de CH₄ i CO₂. La fusió del permafrost probablement també incrementarà les emissions de CH₄ i comportarà un descens de la concentració de carboni orgànic dissolt en els rius. Els canvis en la hidrologia també afectaran tant a l'acumulació com a la descomposició de la torba i a l'emissió de gasos d'efecte hivernacle, ja que les superfícies seques emeten menys CH₄, i més N₂O i CO₂, al contrari que les inundades. L'ascens altitudinal del límit del bosc com a conseqüència de temperatures estivals més elevades pot portar a una expansió del bosc en les zones obertes on ara hi ha torberes, amb el resultat d'una reducció de l'albedo i un reforç positiu en l'escalfament global. Un aumento en la torrencialidad podría incidir en un aumento de la tasa de erosión de las turberas, que además podría verse amplificado por el drenaje de las mismas y el efecto del sobrepastoreo. Periodos de sequías más intensos podrían conllevar un aumento en la frecuencia de los incendios y en su intensidad (ver capítulo 2.4), aunque muy probablemente las actividades humanas sigan siendo la principal causa de los incendios también en futuro.

Un augment de la torrencialitat pot incrementar l'erosió de les torberes, que a més pot ser amplificat pel drenatge de les mateixes i la sobrepastura. Períodes de sequeres més intenses poden comportar un augment en la freqüència dels incendis i en la seva intensitat, encara que les activitats humanes seguiran sent la principal causa dels incendis.

Els efectes combinats dels canvis climàtics amb els canvis locals en la hidrologia tindran conseqüències importants en la distribució i l'ecologia de les plantes i animals que habiten les torberes o les utilitzen. Les

activitats humanes augmenten la vulnerabilitat de les torberes al canvi climàtic. En particular, el drenatge, la crema o la sobrepastura amplificarà les emissions de carboni.

2.5.4. Principals desafiaments

Els principals desafiaments per entendre i avaluar els efectes del canvi climàtic en els estanys i torberes d'alta muntanya del Pirineu estan relacionats amb la complexitat dels processos biòtics i abiòtics en aquests ecosistemes, les incerteses dels nostres models, la manca de sèries temporals llargues que enregistren la variabilitat natural d'aquests ecosistemes i la nostra capacitat per posar en pràctica mesures de gestió. Un dels principals reptes és identificar i avaluar els impactes associats al canvi climàtic i la creixent pressió antròpica en aquests ecosistemes. D'altra banda, cal reduir les incerteses sobre els riscos més grans, els possibles efectes negatius i les futures pressions sobre els ecosistemes d'alta muntanya dels Pirineus. La manca d'informació detallada de les característiques d'aquests ecosistemes (des d'inventaris detallats fins a la quantificació dels processos biogeoquímics) impedeix conèixer la resiliència d'aquests sistemes de muntanya enfront de les pressions del canvi climàtic i antròpic. Finalment, aquests ecosistemes s'han d'incloure en la gestió integral del territori per garantir la seva conservació i l'ús sostenible dels recursos de muntanya.

2.5.5. Conclusions i Recomanacions

Malgrat la llunyania dels principals focus de l'activitat humana, l'impacte del canvi climàtic en els sistemes lacustres i torberes d'alta muntanya és difícil de distingir dels efectes de les activitats antròpiques (turisme, deposició de nutrients, ús de recursos hídrics, etc ...). Encara que l'impacte humà pugui ser determinant en alguns casos, l'augment de la temperatura pot posar a aquests sistemes d'alta muntanya en una situació de major risc, en sotmetre les comunitats biològiques a un major nivell d'estrès. Des del punt de vista de la biota, la plasticitat fenotípica de les comunitats lacustres i de les torberes els pot permetre adaptar-se millor a les fluctuacions climàtiques i ambientals. És important analitzar els possibles impactes des d'un punt de vista holístic que inclogui tant els factors climàtics com els antròpics, a escala global (deposició de nutrients, contaminació) com a local (efectes del turisme específic de cada zona). L'adaptació i mitigació dels efectes del canvi climàtic

en els sistemes lacustres i torberes d'alta muntanya requereix entendre els efectes associats al Canvi Global per poder així reduir-los el màxim possible.

Els estanys i torberes del Pirineu són elements singulars reconeguts i valorats per la ciutadania, fet que pot incentivar la seva participació tant en el seu seguiment i conservació com en la comprensió dels impactes del Canvi Global en àrees de muntanya. Entre les mesures generals per a una gestió sostenible dels estanys i torberes i la seva adaptació als possibles efectes negatius del canvi global destaquem les següents:

Mesures soft ³³

- Desenvolupar grups de treball multidisciplinars, transfronterers i estables a llarg termini, integrats pels representants de tots els grups d'interès (ajuntaments, empreses de turisme, empreses hidroelèctriques, autoritats regionals, científics, associacions ecologistes, ONG, etc.) que orientin el debat sobre els efectes del canvi climàtic - i antròpic - en aquests ecosistemes vulnerables a través de models participatius d'observació.
- Establir i mantenir xarxes d'observació i monitorització detallada d'aquests ecosistemes i promoure en el seu si projectes integrats amb la participació de tots els agents del territori.
- Incloure en els plans d'ordenació dels espais naturals els riscos associats al canvi climàtic.

Mesures verdes ³⁴

- Potenciar un turisme ecològic amb el mínim impacte en espais protegits i la màxima integració de la ciutadania en la seva conservació.
- Desenvolupar programes educatius a nivell local, regional i transfronterer per explicar els serveis ecosistèmics i la seva capacitat d'actuar com a embornal de carboni, la seva capacitat natural de retenció d'aigua, així com les seves funcions de protecció de la biodiversitat de muntanya i la protecció davant els fenòmens erosius.

Mesures grises ³⁵

- Oferir incentius per a l'adequació de les empreses de turisme de muntanya als objectius de conservació i manipulació sostenible d'aquests ecosistemes.

IDEES CLAU

- Els estanys i torberes són ecosistemes icònics del Pirineu, però molt vulnerables. La seva conservació ofereix una oportunitat per a la conscienciació ciutadana sobre els reptes del canvi climàtic i la creixent pressió antròpica.
- Per gestionar els efectes del canvi climàtic en els estanys i torberes d'alta muntanya del Pirineu necessitem estratègies de monitorització que ens permetin conèixer millor els complexos processos que es desenvolupen en aquests ecosistemes i disminuir les incerteses dels models i així poder millorar la nostra capacitat per a dur endavant polítiques consensuades de gestió sostenible.

(33) Les mesures Soft o mesures no estructurals per reduir o pal·liar els efectes negatius del canvi climàtic. Aquesta categoria de mesura està típicament representada pels estudis d'investigació enfocats a cobrir llacunes de coneixement o per enriquir les bases de coneixement sobre el canvi climàtic, els seus impactes i els sectors més vulnerables. També entra en aquesta categoria el desenvolupament de metodologies i sistemes específics per reduir riscos derivats del canvi climàtic (ex. Desenvolupament d'un early warning system transfronterer per a la gestió de les onades de calor al massís).

(34) Les mesures verdes o basades en els serveis ecosistèmics: aquesta tipologia de mesura inclou totes les mesures, bones pràctiques, estudis o iniciatives que tinguin com a principi l'ús dels serveis ecosistèmics procurats pels diferents recursos naturals per pal·liar els efectes negatius del canvi climàtic (ex. pràctiques silviculturals conservatives per incrementar la capacitat dels boscos del pirineu per reduir els riscos hidrogeològics).

(35) Les mesures Grey o infraestructurals, són totes aquelles que basen la seva acció pal·liativa en la construcció o implantació d'elements infraestructurals concrets (ex. construcció de dics a les zones habitades d'alt risc d'inundacions torrencials).

2.6 Cicle hidrològic i recursos hídrics

Coordinadors: Santiago Beguería (EEAD-CSIC)

Autors: Santiago Beguería (EEAD-CSIC), Yvan Caballero (BRGM), Enrique Navarro (IPE- CSIC), Zaragoza, Marilen Haver (EcoLab/UMR5245, CNRS), Anne Zabaleta (UPV/EHU, Leioa), Luis Javier Lambán Jiménez (IGME).

RESUM

Els Pirineus tenen una importància fonamental per als recursos hídrics dels territoris situats a banda i banda de la divisòria hidrològica, ja que en les seves capçaleres es genera una part molt important dels cabals superficials i aigües subterrànies que són utilitzades aigües avall en les conques de l'Ebre, Adour, Garona, etc.

L'anàlisi de les sèries temporals de cabals circulants mostra una tendència general a la disminució dels cabals mitjans anuals al llarg de les últimes dècades. Aquesta disminució només es pot atribuir de forma parcial al canvi climàtic, essent també molt important l'efecte dels canvis en els usos del sòl i en la vegetació, sobretot a la part meridional de la serralada. També s'han observat canvis en el règim mensual, relacionats amb una disminució de la relació neu/pluja a l'hivern, menor acumulació de neu, i una acceleració de la fusió, que s'han traduït en canvis en els règims dels rius, que transiten cap a règims de tipus pluvial amb majors cabals hivernals, avançament i disminució dels cabals de desglaç primaverals, i estiatges més llargs i intensos. No s'han trobat, a l'estudi dels registres de les últimes dècades, senyals clars de canvi en la freqüència de cabals extrems.

La majoria dels models climàtics pronostiquen per a la regió pirinenca augments de les temperatures i una disminució de les precipitacions al llarg del segle XXI. Aquests canvis incrementarien l'estrès sobre la vegetació, resultant en una evapotranspiració més elevada que alhora afectaria als altres components del balanç hidrològic (escorrentia superficial i recàrrega). Amb tot això, el contingut d'aigua en el sòl disminuiria, les condicions de saturació serien cada vegada més escasses i es limitarien a certs períodes a l'hivern i primavera. A més dels canvis en el forçament climàtic, el balanç hidrològic dels Pirineus es veurà afectat per canvis en la coberta vegetal, que es caracteritzaran per una continuació dels processos de revegetació ja existents

Com molts altres sistemes muntanyosos, els Pirineus són una autèntica torre d'aigua per als territoris que l'envolten, ja que en ells tenen el seu origen una part molt important dels recursos hídrics superficials i subterrànies que s'utilitzen aigües avall en les conques dels rius Ebre, Bidasoa, Adour, Garona, conques internes catalanes (sistemes Nord i Centre) i Aude. Per exemple, els rius pirinencs suposen el 70% de les aportacions totals al riu Ebre (Confederació Hidrogràfica de l'Ebre). Els recursos hídrics generats als Pirineus són, doncs, fonamentals per a l'agricultura de regadiu i la producció d'aliments, per a la producció d'energia hidroelèctrica, per a la indústria, i per al proveïment domèstic, no només de les poblacions dels Pirineus, sinó d'un territori molt més ampli que inclou a milions d'habitants i algunes de les concentracions urbanes més importants de la regió. Per tant, qualsevol canvi que afecti al cicle hidrològic dels Pirineus és susceptible de tenir repercussió sobre un territori i una població molt més amplis.

Una planificació adequada dels recursos hídrics dels Pirineus requereix comprendre els detalls del seu balanç hidrològic, és a dir, de com es reparteix l'aigua precipitada entre evapotranspiració (aigua que retorna a l'atmosfera en forma de vapor, ja sigui com evaporació directa o mitjançant la transpiració

a les últimes dècades del segle XX, com a conseqüència de l'abandonament de les activitats agropecuàries i de l'escalfament que comportarà una migració dels pisos altitudinals, mentre que és altament probable que la pressió humana s'incrementi en uns pocs llocs, com estacions d'esquí i urbanitzacions turístiques i de segona residència.

Aquests canvis en els cabals anuals i estacionals poden comportar una disminució en la qualitat de les aigües, ja que impliquen un descens de l'efecte de dilució de les substàncies contaminants. L'escenari que plantegen els diferents estudis analitzats és, per tant, d'una exacerbació de les tendències observades en l'actualitat, conduent a una menor disponibilitat de recursos hídrics. Pel costat de la demanda, si bé es constaten i es preveuen millores en l'eficiència en la distribució i ús de l'aigua, hi ha també previsions d'increment de la demanda agrícola pel desenvolupament de noves zones d'agricultura de regadiu, el que unit a l'anterior pot portar a un augment de les tensions i la competència pels recursos hídrics.

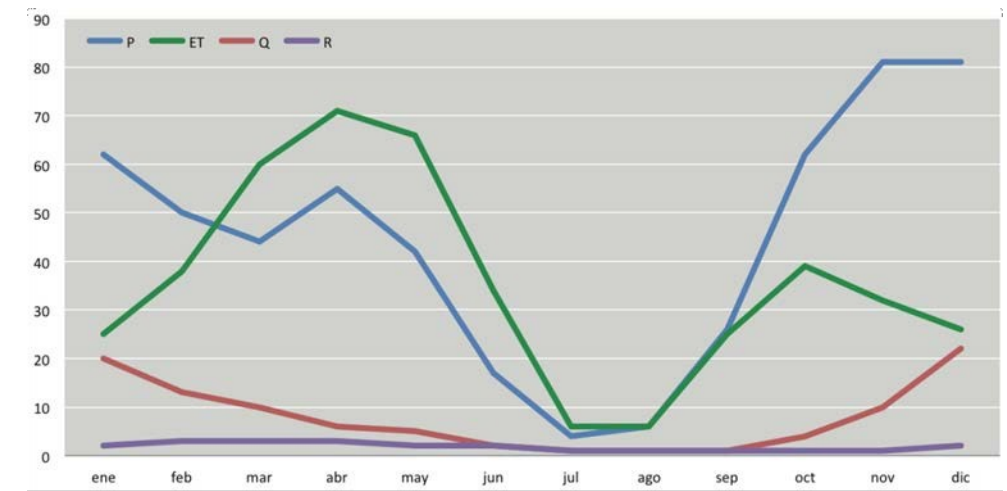


Figura 2.6.1. Balanç hidrològic mensual típic d'una conca de clima mediterrani, amb indicació de les entrades per precipitació (P), les sortides per evapotranspiració (ET), el cabal superficial (Q) i la recàrrega (R). Unitats: l m-2. Font: Beguería et al., 2015.

de les plantes), generació d'escorrentia superficial i recàrrega d'aquífers. Aquests processos, alhora, determinen els volums d'aigua en les diferents masses d'aigua superficials (rius i llacs) i subterrànies, i en altres parts del sistema, com en el mantell glaciari i nival, humitat del sòl, en torberes i altres zones entollades, o en la pròpia vegetació. La Figura 2.6.1. mostra, a tall d'exemple, l'evolució mensual dels diferents components del balanç hidrològic en una conca forestal amb un clima de tipus mediterrani.

En el repartiment de la precipitació entre els diferents fluxos de sortida, destaca per la seva importància l'evapotranspiració, que pot representar des del 40% (Guipúscoa, riu Garona) fins al 80% del total (conques més mediterrànies). L'excés resultant, fins a completar el total d'aigua precipitada, es reparteix entre generació de cabal superficial i recàrrega. El desfàs entre els diferents fluxos (cal destacar per exemple que en alguns mesos l'evapotranspiració arriba a superar en quantitat a la precipitació) es deu a l'existència de reserves internes d'aigua, per exemple en el sòl. A les conques de muntanya, a més, una altra important reserva d'aigua que produeix un desacoblament entre el règim de les precipitacions i el dels cabals és la formació i fusió anual del mantell de neu. La majoria dels models climàtics pronostiquen per als Pirineus un augment de la temperatura i una disminució de les precipitacions al llarg del segle XXI. Aquests canvis comportarien un increment de l'estrès sobre la vegetació en els períodes més secs de l'any o durant èpoques d'escassetat (sequeres), mentre que d'altra banda s'avançarien en l'any i prolongarien el període de creixement. Tot això resultaria en una

evapotranspiració més elevada, que alhora afectaria als altres components del balanç hidrològic (escorrentia superficial i recàrrega subterrània). L'increment de la temperatura també suposaria una disminució en l'aportació en forma de neu, i una acceleració de la fusió. Amb tot això, el contingut d'aigua en el sòl disminuiria, les condicions de saturació serien cada vegada més rares i es limitarien a períodes a l'hivern i primavera. Nombrosos estudis coincideixen en la importància de tots aquests canvis en el balanç hídric per als recursos hídrics (ACA, 2009; García-Ruiz et al., 2011).

A més dels canvis en el forçament climàtic, el balanç hidrològic dels Pirineus es veurà afectat per canvis en la gestió dels usos del sòl, que es caracteritzaran per una continuació de processos ja constatats des de les últimes dècades del segle XX fins a l'actualitat, com l'expansió de boscos i garriga com a conseqüència de l'abandonament de les activitats agropecuàries. A aquesta tendència s'uneix una creixent pressió humana localitzada en uns pocs llocs, com estacions d'esquí i urbanitzacions turístiques i de segona residència. Els escenaris futurs per als recursos hídrics dels Pirineus preveuen disminucions en la quantitat total de recursos disponibles, sobretot en forma de cabal superficial, que poden ser de diferent magnitud segons l'estudi. A més, tots ells coincideixen que hi haurà canvis importants en el règim mensual dels cabals, amb un increment dels cabals hivernals i un descens dels màxims primaverals deguts a la fusió nival més primerenca, així com estiatges més severs i prolongats.

D'altra banda, en les previsions de demanda per a la meitat del segle XXI contrasta l'estabilitat o, fins i

tot, descens d'algunes demandes, com l'abastament urbà o industrial, a causa de la millora de l'eficiència dels sistemes de distribució i consum, amb els plans d'expansió del regadiu agrícola registrats en alguns plans hidrològics de conca, com el de la conca de l'Ebre (465.000 ha més per al període 2016-2021, que s'afegirien a les 900.000 ha actuals; Pla Hidrològic de l'Ebre 2015-2021).

Tots aquests canvis, tant en la disponibilitat de recursos, com en l'evolució de les demandes, comportaran una major incertesa en la disponibilitat de recursos hídrics als Pirineus i aigües avall, el que accentua la necessitat de plantejar mesures d'adaptació. En aquest capítol abordarem les qüestions següents:

- Quines són les tendències de l'evolució dels recursos hídrics superficials i subterranis dels Pirineus observades en les últimes dècades?
- Quines són les previsions d'evolució dels recursos hídrics al llarg d'aquest segle, i quin és el seu grau de confiança?
- Quines conseqüències tindran els canvis en el cicle hidrològic dels Pirineus sobre la qualitat de les aigües, els cicles biològics i els ecosistemes associats a les masses d'aigua?
- Com podem posar remei a aquestes conseqüències? Per respondre a aquestes qüestions comptem, fonamentalment, amb dues aproximacions metodològiques:
- Aproximació estadística. L'anàlisi de sèries temporals prou llargues de les principals variables del balanç hidrològic (precipitacions, temperatures, cabals circulants) permet determinar l'existència de tendències temporals. Aquest mètode, que podríem anomenar retrospectiu, ens ha de permetre també discriminar la causa de les variacions observades, és a dir, la relació amb el forçament climàtic o amb altres causes com els canvis en els usos del sòl.
- Aproximació de modelització. Utilitzant models de simulació numèrica del sistema hidrològic calibrats durant el període d'observació és possible analitzar els efectes de diferents escenaris futurs en els que canviïn les característiques del forçament climàtic, els usos del sòl, la gestió dels recursos hídrics, etc. Per tant, podríem parlar d'un mètode prospectiu, que ens permet estimar quines poden ser les conseqüències de diferents escenaris futurs sobre els diferents components del balanç hidrològic i sobre la disponibilitat de recursos hídrics.

2.6.1 Canvis en les aigües superficials: aportació anual

L'evidència empírica, a través de l'estudi de les sèries instrumentals de la xarxa foronòmica (estacions d'aforament), mostra senyals de canvi en les aportacions mitjanes anuals dels rius dels Pirineus a les últimes dècades. García-Ruiz et al. (2001) van constatar un descens estadísticament significatiu de les aportacions anuals a 28 de 31 estacions d'aforament del Pirineu central espanyol, per al període 1964-1994. Més recentment, Vicente-Serrano et al. (2015) van trobar descensos també significatius en els principals rius del Pirineu oriental espanyol. López-Moreno et al. (2010), analitzant la totalitat de la conca de l'Ebre sobre el període 1950-2010, van trobar descensos significatius de cabal en 55 de 88 estacions d'aforament. Als Pirineus francesos, l'informe Acclimaterra (Le Treut, 2013) assenyalava un descens d'entre el 25 i el 30% per al riu Garona a la seva desembocadura per al període 1959-2010, tot i que a aquesta escala de treball és difícil aïllar la influència dels canvis en els usos consumptius de l'aigua, que també han variat durant el mateix període. Un estudi recent (Zabaleta et al, 2017; IHOBE, 2017) realitzat a ambdós costats dels Pirineus en la seva terminació occidental (Golf de Biscaia) amb cabals diaris de 18 estacions per al període 1955-2015 (60 anys) i de 43 estacions per al 1975-2015 (40 anys) mostra també una tendència a la disminució dels cabals. Per a un període més breu (1995-2015, 20 anys), i utilitzant 117 estacions, el mateix estudi indica una tendència d'increment dels cabals anuals en alguns punts. A l'extrem oriental (sub-conques pirinenques dels rius Têt i Tech), Lespinas et al. (2009; 2014) van detectar també tendències a la disminució dels cabals anuals.

L'atribució d'aquests descensos en les aportacions dels rius, és a dir, la identificació de les seves causes i, sobretot, la discriminació entre causes climàtiques i no climàtiques, han estat abordats en aquests i altres treballs. En general, els autors d'aquests treballs destaquen que l'anàlisi de l'evolució de les principals variables climàtiques (precipitació i temperatura) no justifica completament l'alteració observada en els cabals. És a dir, si s'elimina la influència del clima sobre els cabals, aquests segueixen presentant una tendència negativa (Figura 2.6.2). Excloent la causa climàtica, existeix un consens en atribuir aquesta variació a l'increment en l'evapotranspiració a causa dels canvis en la coberta vegetal com a resposta als canvis en els usos del sòl.

Cal tenir en compte que, canvis petits en l'evapotranspiració, al voltant d'un 2 o 3%, tenen repercussions molt importants sobre el balanç

hídric total, ja que l'evapotranspiració representa un percentatge molt elevat del balanç. Beguería et al. (2003) van xifrar aquest descens dels cabals a causa de la revegetació al voltant d'un 25% per a tot el període 1945-1995 (Figura 2.6.2). Gallart i Llorens (2003 i 2004) van estimar, per a tota la conca de l'Ebre, un descens del cabal anual del 0,63% per any, que van atribuir en un 30% a l'increment de l'evapotranspiració en la conca a causa de la revegetació en les zones de capçalera. A les conques de la Noguera-Pallaresa i Ribera Salada, Buendía et al. (2016) van atribuir el descens observat en els cabals a l'acció conjunta del canvi climàtic i la reforestació. En el vessant francès, l'estudi a escala europea de Stahl et al. (2010) va detectar també tendències decreixents en dues conques per als períodes 1952-2004 i 1962-2004.

La utilització de models de simulació hidrològica permet validar aquesta hipòtesi, així com estimar l'evolució de les aportacions anuals en diferents escenaris de canvi climàtic. Així, López-Moreno et al. (2014) van estimar, per al vessant sud dels Pirineus i l'horitzó de 2050, que els canvis climàtics projectats causarien una disminució dels cabals anuals d'entre el 10 i el 20% respecte al període 1970-2000, depenent de la conca estudiada (La Confederació Hidrogràfica de l'Ebre ha estimat aquest descens en el 5% de mitjana,

per a l'any 2027 i la totalitat de la conca (CHE, 2015). Quintana-Seguí et al. (2010), per als rius pirinencs de la conca de Rhône-Alps, van estimar un descens dels cabals anuals d'entre el 10 i el 20% per al període 2035-2065 respecte al període 1970-2000. Pascual et al. (2014) van estimar reduccions de les aportacions anuals entre el 25 i el 34% a les conques catalanes per a l'últim quart del segle XXI, i Manzano (2009) estima aquesta reducció en un 10% per a 2040. Candela et al. (2012), per a un horitzó de 2050, estimen descensos del 20% en els cabals associats als descensos de precipitació, i estimen també una disminució en la recàrrega dels aqüífers del 18%. Caballero et al. (2007), per al riu Ariège, han estimat un descens del 20% en els cabals anuals i estacionals per al període 2055-2065, respecte al període de referència 1985-1995. Les simulacions realitzades en conques de capçalera dels embassaments del Zadorra al golf de Biscaia indiquen una disminució dels cabals anuals entre 8 i 15% per a l'any 2060, amb relació al període 1961-2000 (IHOBE, 2017; Meaurio, 2017).

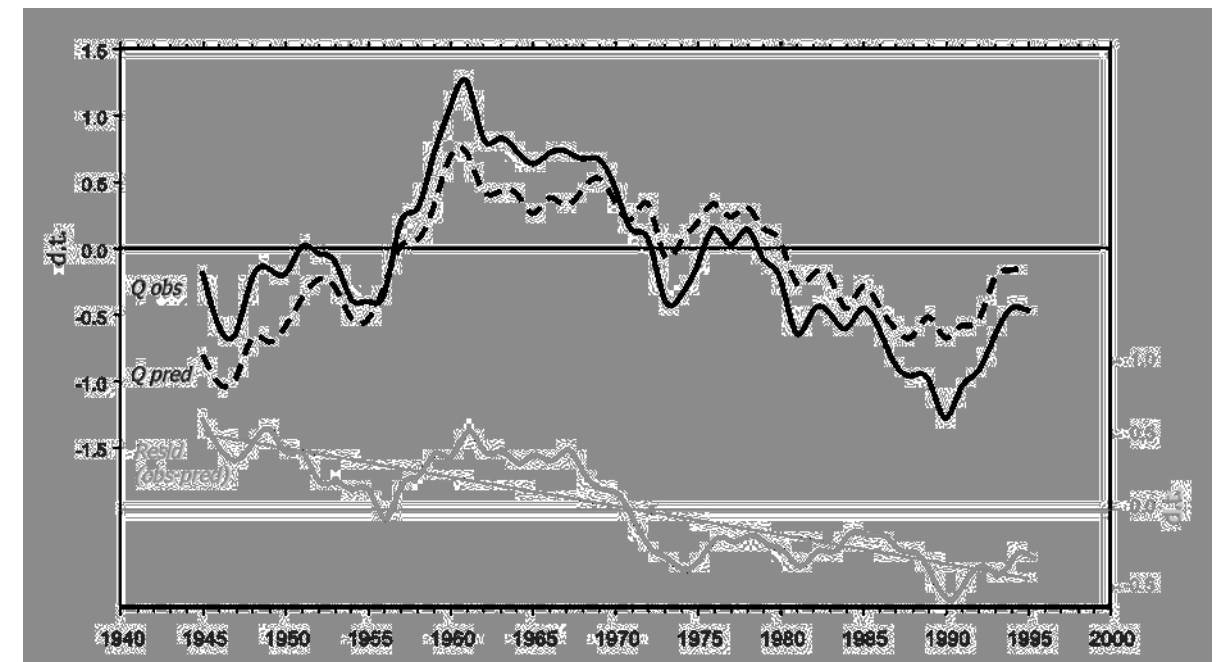


Figura 2.6.2. Evolució de les aportacions anuals dels rius dels Pirineus centrals espanyols (Q obs) i dels cabals teòrics a partir només de les dades climàtiques (Q pred). El residu o diferència entre cabals predits i observats (Resid) mostra una evolució descendent dels cabals que no queda explicada per la variabilitat climàtica, i que s'atribueix a l'increment de l'evapotranspiració a causa dels canvis d'ús i de vegetació. Font: adaptat de Beguería et al., 2003.

2.6.2 Canvis en les aigües superficials: règim mensual

Els canvis en el règim mensual dels cabals han estat també objecte d'estudi. En general, l'increment de les temperatures augura una menor freqüència dels episodis de neu, a favor de les precipitacions plujoses. En conseqüència, majors temperatures comporten un increment de les precipitacions líquides a l'hivern, fet que ja s'ha constatat en alguns estudis. Per exemple, López-Moreno (2005) va documentar un descens en l'acumulació hivernal de neu al Pirineu espanyol en el període 1950-1999. La principal conseqüència per als cabals és un increment dels cabals hivernals, unida a un avançament de l'època de fusió a la primavera. Per contra, els cabals estivals van acusar els descensos més importants. Aquesta tendència es confirma en altres estudis basats en dades observades, com els de García-Ruiz et al. (2001) o Stahl et al. (2010). Per al Golf de Biscaia, Zabaleta et al. (2017) van documentar una tendència a la disminució de cabals a la tardor almenys des de 1955, tractant-se aquesta de l'estació que acusa aquesta tendència amb més claredat, implicant una prolongació del període estival. L'anàlisi de tendències en sèries de cabal al Pirineu francès s'ha centrat en l'estudi dels cabals d'estiatge. L'estudi de Giuntoli i Renard (2010) descriu tendències negatives generalitzades de les aportacions en període d'estiatge per al període 1968-2008, i l'informe Acclimaterra (Le Treut, 2013) identifica també tendències negatives en els cabals d'estiatge en el cas de l'Adour.

Els treballs utilitzant models de simulació i escenaris de clima futur mostren un increment d'aquestes tendències, amb una reducció important de l'acumulació de neu que en l'últim quart del segle XXI podria arribar a ser del 78% per sota dels 1500 m d'alçada (López-Moreno et al., 2009). Les conseqüències sobre el règim dels rius podrien ser especialment acusades a la primavera, on podrien donar-se descensos notables en els cabals i un avançament, en alguns casos, del pic de fusió nival, i també en els estiatges (que s'accentuarien), mentre que els cabals hivernals es mantindrien en valors similars als actuals (Figura 2.6.3). L'efecte combinat del canvi climàtic i dels usos del sòl accentua aquests canvis.

En el vessant francès, Boé et al. (2009) van utilitzar un conjunt d'escenaris climàtics juntament amb un model de simulació hidrològica, i descriuen una evolució similar del règim anual en els rius Ariège i Garonne (Figura 3.1.4). Comparant el període 2046-2065 amb el període de referència 1970-1999, troben reduccions generals del cabal que són més marcades a la primavera i començaments d'estiu a causa de l'efecte combinat de menors precipitacions, major

evapotranspiració i una reducció del mantell nival. Per contra, els cabals d'hivern mostren poca variació respecte al període de referència (Garonne), o fins i tot s'incrementen (Ariège), a causa d'una major freqüència d'episodis de pluja respecte dels episodis de neu. La simulació de Caballero et al. (2007) xifra en prop del 50% la reducció de la precipitació en forma de neu a la conca d'Adour-Garonne per a l'horitzó de 2050-2060, respecte al període de referència 1985-1995. Les conseqüències serien un increment dels cabals hivernals i avançament del pic primaveral, amb reduccions de cabal durant l'estiu a l'entorn del 11%.

2.6.3 Canvis en les aigües subterrànies i en les surgències

Els impactes del canvi climàtic sobre els recursos hídrics subterrànies i la seva evolució futura són més complexos d'avaluar que en el cas de les aigües superficials, a causa de la gran varietat de contextos geològics en els que es troben (Martín-Vide, 2016). En efecte, el comportament de les aigües subterrànies pel que fa als forçaments climàtics depen fortament del tipus de formacions geològiques (aquífers) en les que es troben, del seu grau de confinament (un aquífer en el qual l'aigua flueix lliurement es comportarà de forma molt diferent a un altre aquífer en el qual l'aigua es troba a pressió, captiva sota una formació poc permeable), de les seves interaccions hidràuliques amb els aquífers veïns (com l'aigua marina en el cas dels aquífers costaners), així com de la intensitat de l'explotació per bombament que suporti l'aquífer (Green et al., 2011). Les zones d'alta muntanya són molt sensibles a qualsevol canvi en el balanç hidrològic i, en conseqüència, en la recàrrega i funcionament dels aquífers. Per avaluar adequadament la recàrrega en àrees d'alta muntanya, cal tenir en compte una sèrie de característiques específiques, com l'existència d'efectes associats als relleus abruptes i a les grans altituds o la presència d'importants gradients geogràfics de temperatura i les seves conseqüències en la vegetació, sòls i precipitacions. A més, aquests ambients es caracteritzen per la presència de surgències a diferents altituds. Tant la recàrrega com la descàrrega es troben freqüentment controlades o condicionades per la dinàmica nival. Una altra característica no menys important de les àrees d'alta muntanya és la dificultat d'accés i, per tant, de presa de dades, que dificulten el nostre coneixement sobre el funcionament dels aquífers. La resposta de les àrees d'alta muntanya davant el possible escalfament climàtic i els canvis globals és una qüestió rellevant. Amb l'increment de la temperatura global es preveu que disminueixi la precipitació en forma de neu i que s'avanci en l'any el període de fusió. Amb aquests efectes és previsible que es desplacin els pics d'escorrentia, tant superficial com

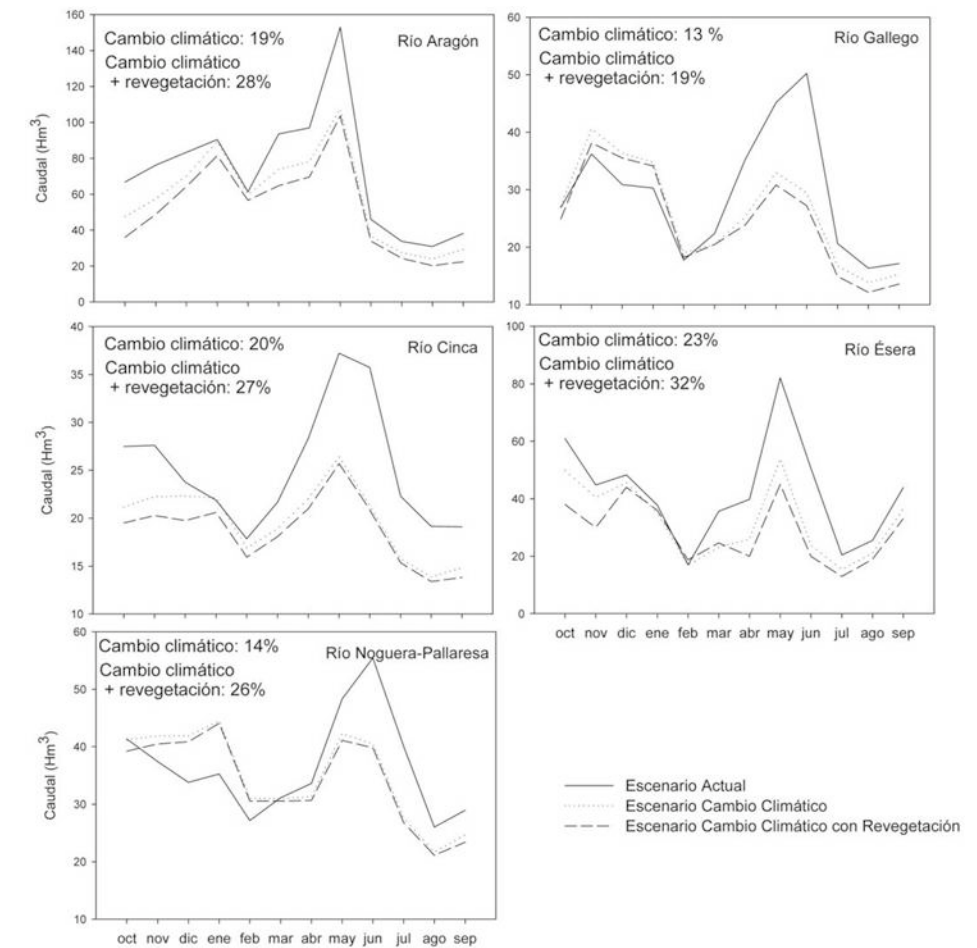


Figura 2.6.3. Variacions en el règim d'alguns rius dels Pirineus per l'any 2050 respecte al règim mitjà del període 1970-2000, per a escenaris de canvi climàtic i de canvi climàtic amb revegetació. (Font: adaptat de López-Moreno et al., 2014.)

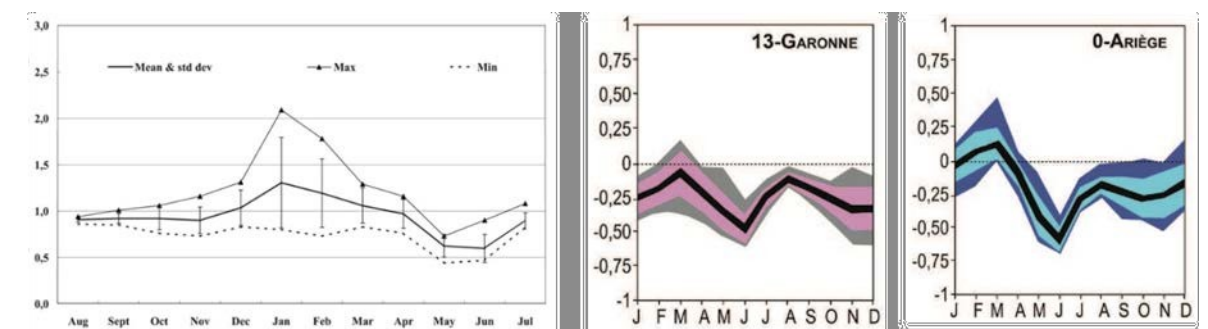


Figura 2.6.4. Variació relativa del règim dels rius Garonne a Foix (2055-2065 respecte a 1985-1995); Garonne a Lamagistère i Ariège a Foix (2046-2065 respecte a 1970-1999). Font: Caballero et al., 2007; Boé et al., 2009.

subterrània, cap als primers mesos de l'any, podent causar escassetat d'aigua a les zones sense suficient capacitat d'embassament (Barnett et al., 2005). A les regions dominades per la neu, la coberta de neu, en general, impedeix la recàrrega d'aigües subterrànies a l'hivern, mentre que el desglaç a la primavera torna a recarregar els aqüífers (Kuusisto, 1984; Rutulis, 1989, Van der Kamp i Maathuis, 1991). A causa del contacte directe entre l'aigua subterrània i la superfície del sòl, els aqüífers, en concret aqüífers superficials i poc profunds, són especialment sensibles als canvis en les condicions climàtiques (Winter, 1999; Healy i Cook, 2002; Sophocleus, 2002; Dingman, 2002; Lee et al., 2006). Es preveu que en les regions dominades per la neu, els futurs hiverns més càlids provoquin canvis en el desglaç i la recàrrega de les aigües subterrànies (Jyrkama i Sykes 2007; Sutinen et al., 2007). A més, l'escorrentia superficial a causa de la fusió de la neu pot ocórrer durant llargs períodes i avançar-se a principis d'any (Veijalainen, 2008). Aquests canvis molt probablement modifiquin el règim de recàrrega i descàrrega, i, per tant, afectin la hidrodinàmica de les aigües subterrànies i la interacció d'aquestes amb les aigües superficials.

En línies generals, l'aigua subterrània continguda en un sistema al·luvial (en forta interacció amb els cursos d'aigua superficials) o en un sistema carbonatat de tipus càrstic (on les escorrenties a través dels conductes càrstics poden ser molt ràpides) respondrà més ràpidament al forçament climàtic que l'aigua continguda en aqüífers sedimentaris (amb alternança de formacions sorrenques més o menys consolidades) o en roques cristal·lines (granits i esquists). La resposta de les aigües subterrànies al canvi climàtic pot a més reforçar-se o, al contrari, moderar-se, per l'efecte dels usos del sòl i pel seu grau d'explotació per bombament. Així, per exemple, Kim i Jackson (2012) van mostrar que la reforestació provoca, en general, una disminució de la taxa de recàrrega dels aqüífers, fenomen que pot incrementar l'efecte negatiu d'un clima més càlid i amb menors precipitacions. Aquesta complexitat explica que sigui generalment difícil quantificar amb precisió la quantitat d'aigua continguda en un aqüífer, i encara més els canvis que aquesta pot experimentar en el futur. Resulta difícil fer una avaluació fiable de l'evolució del contingut d'aigua en els aqüífers pirinencs en les últimes dècades. Això es deu a l'existència d'una xarxa piezomètrica insuficient, i al fet que en general es redueix a sèries de dades amb una longitud inferior a quinze anys. L'informe Aclimaterra (Le Treut et al., 2013) subratlla la manca de coneixement sobre l'impacte del canvi climàtic en els recursos hídrics subterranis a la conca Adour-Garona.

De manera similar, i pel que fa als sistemes hidrogeològics de la part central dels Pirineus

francesos, s'ha indicat que no és possible confirmar una tendència ni positiva ni negativa (AEAG, 2011). Per aquest motiu, la majoria dels estudis existents se centren en caracteritzar l'impacte dels canvis del clima sobre la recàrrega, utilitzant models de simulació. Una eventual disminució de la pluviometria en quantitat i estacionalitat, i la modificació del repartiment d'aquesta entre precipitació sòlida i líquida, tenen potencialment una forta influència sobre la recàrrega dels aqüífers. Així mateix, l'increment de l'evapotranspiració a causa del canvi climàtic (increment de la demanda atmosfèrica d'humitat) o dels canvis en els usos del sòl (revegetació), tenen un fort impacte sobre el balanç hidrològic i, per tant, sobre la recàrrega dels aqüífers. Això és especialment cert pels aqüífers lliures, que es veuen especialment influenciats pels canvis en el balanç hidrològic. Convé a més destacar que les projeccions es podrien veure afectades, també, per canvis futurs en la intensitat de les precipitacions, l'impacte de les quals sobre la recàrrega dels aqüífers està encara poc estudiat.

A França, el projecte RExHyss (Habets et al., 2013) va estimar en un 30% la disminució de la recàrrega anual dels sistemes hidrogeològics de les conques del Sena i del Somme. Aquesta disminució es deu en gran mesura a la disminució projectada de la precipitació hivernal, estimada en una mitjana del 12% per a finals del segle XXI (mitjana d'un conjunt de models climàtics acoblats). En el vessant francès dels Pirineus, Caballero et al. (2016) van estimar l'impacte del canvi de les precipitacions sobre la recàrrega dels aqüífers lliures per a tota la conca de l'Adour-Garona. Van utilitzar les projeccions corresponents als escenaris RCP 2.6 i 8.2 sobre un conjunt de cinc models climàtics, regionalitzats mitjançant dos mètodes diferents i aplicats a dos mètodes diferents de càlcul del balanç hídric, amb l'objectiu d'explorar el rang d'incertesa dels resultats. Aquests van mostrar que, per a la regió pirinenca (departaments dels Pirineus Atlàntics, Alts Pirineus i Alta Garona i Ariège), la recàrrega dels aqüífers podria disminuir una mitjana del 10% el 2050. A Espanya, Candela et al. (2012) van estudiar les conseqüències del canvi climàtic sobre la recàrrega dels aqüífers de la conca del riu Siurana, afluent de l'Ebre a Catalunya. Per a fer-ho van utilitzar el model hidrogeològic Visual Balan (Samper et al., 2005), forçat amb un conjunt de sortides de models acoblats i sota els escenaris SRES A2 i B1. Així van estimar una disminució de la recàrrega d'entre el 5 i el 15% per a l'any 2050. Van assenyalar també que aquesta tendència podria ser, fins i tot, més gran si als efectes del canvi climàtic s'afegien els efectes de la possible evolució futura dels usos del sòl, lligada a una disminució de les superfícies conreades, un augment de la coberta forestal i una expansió del cultiu de la vinya. Ortuño

et al. (2009), emprant el mateix model hidrogeològic i escenaris, van analitzar diverses conques de Catalunya, i van ressaltar la dificultat de quantificar els impactes futurs sobre la recàrrega d'aqüífers, destacant la variabilitat existent entre diferents aqüífers i diferents escenaris climàtics. Malgrat tot, van avaluar una disminució mitjana de la recàrrega al voltant del 25% per al període 2017-2100, per a l'escenari climàtic A2, i del 19% per a l'escenari B2.

Un estudi tècnic de la Confederació Hidrogràfica de l'Ebre (CHE, 2005) va estimar, per als horitzons de 2010-2040, 2040-2070 i 2070-2100, reduccions mitjanes del 12%, 21% i 19% per al cabal total; b) 17%, 25% i 19% per a l'escorrentia superficial; c) 9%, 18% i 18% per al flux hipodèrmic; i d) 13%, 23% i 20% per al flux subterrani. Aquests resultats es van basar en l'aplicació del model hidrològic distribuït GIS-BALAN, forçat amb dades climàtiques de les projeccions del model de circulació general CGCM3 i els escenaris A1B, A2, B1 de l'IPCC [SB2] i l'escenari COMMIT del Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis. La parametrització de GIS-BALAN es va realitzar utilitzant sèries de dades de cabal i nivells piezomètrics a les estacions d'aforament i piezòmetres de la Confederació Hidrogràfica de l'Ebre durant el període comprès entre 1970 i 2000. Finalment, els canvis en els sistemes hidrogeològics poden també tenir el seu reflex en les nombroses surgències i fonts que existeixen en les dues vessants dels Pirineus, tant en sistemes càrstics, cristal·lins, sedimentaris, com fins i tot al·luvials. Els cabals de les fonts, així com la seva evolució estacional, depenen en gran mesura del funcionament de l'aqüífer que els sustenta, de manera que no és senzill fer generalitzacions. És molt probable que siguin les surgències associades a aqüífers lliures les que es vegin afectades en major mesura pels canvis en el balanç hidrològic de les seves zones de recàrrega. Les surgències que presenten major vulnerabilitat al canvi climàtic són aquelles que es caracteritzen per presentar un funcionament estacional, amb importants fluctuacions entre els períodes d'aigües altes i baixes. Observacions realitzades en surgències dels Pirineus mostren que aquestes poden presentar episodis d'esgotament durant anys especialment secs. Aquests episodis podrien fer-se més freqüents en el futur en aquest tipus de sistemes, que tenen una baixa funció capacitiva i temps de residència breus.

2.6.4 Canvis en les característiques físico-químiques de les masses d'aigua

La qualitat de les aigües, entesa com la concentració de diferents compostos naturalment presents o artificials -p. ex. contaminants-, depen de les diferents fonts de contaminació, però també del cabal circulant.

Els contaminants poden provenir, tant de fonts difuses (p. ex. el vessament de residus agrícoles o ramaders), com de puntuals (abocaments d'aigües pobrament tractades). Però el cabal és el principal impulsor del canvi en els paràmetres metabòlics de la comunitat biològica i dels paràmetres físico-químics de l'aigua, especialment a petites escales temporals i espacials, com les que es donen en rius de muntanya (Hunt et al., 2012; Marcarelli et al., 2010). Precisament a aquestes petites escales, la presència de contaminants té un paper determinant en la qualitat de l'aigua. Com s'ha vist en apartats anteriors, el canvi climàtic i els canvis en els usos del sòl (revegetació) han afectat i es preveu que afectin en el futur als cabals circulants, el que tindrà conseqüències en la qualitat de l'aigua. D'una banda, les sequeres i els períodes d'estiatge més llargs tenen un efecte directe en reduir el factor de dilució dels contaminants que arriben als rius, donant lloc a un augment en la concentració de contaminants i, per tant, a un empitjorament de la qualitat de l'aigua.

D'altra banda, les inundacions, encara que inicialment puguin promoure la dilució d'aquests contaminants, promouen l'arrossegament des de les conques fortament humanitzades (fonts difuses) i la re-mobilització de contaminants retinguts en els sediments (Petrovic et al., 2011). La resta de factors que influeixen en la dinàmica del flux de substàncies contaminants es deriven de les activitats humanes (embassaments, assuts, mini centrals, extraccions d'aigua, etc.), totes elles molt presents en els rius Pirinencs. A més, els esdeveniments extrems relacionats amb el canvi climàtic tenen un impacte en els mecanismes de transferència tèrmica entre l'aire i l'aigua (Val et al., 2017). Aquest desacoblament pot conduir a canvis en els processos químics i biològics implicats en la qualitat de l'aigua.

La reducció dels cabals circulants sol comportar un empitjorament de la qualitat química de l'aigua, a l'incrementar la concentració dels contaminants derivats de les activitats humanes a les conques (Petrovic et al., 2011). La combinació de cabals baixos i la presència de substàncies tòxiques que afecten les comunitats biològiques aquàtiques acaba provocant problemes estructurals i funcionals en els ecosistemes fluvials (Val et al., 2016, 2016b). Aquesta estreta relació entre la qualitat (química i ecològica) i el cabal ha estat plenament reconeguda i integrada en la Directiva Marc de l'Aigua Europea (DMA). Per exemple, en les recomanacions per al monitoratge de les masses d'aigua s'accentua de manera explícita la importància del "seguiment del volum i el nivell de flux en la mesura que sigui pertinent per a l'estat ecològic i químic" (DMA, art. 8).

La manca de cabals en determinats trams pot ser especialment greu quan aquests reben els efluents de les plantes de tractament d'aigües residuals (EDAR). En aquests casos (com passa, per exemple, al riu Llobregat) els efluents poden arribar a suposar gairebé el 100% del cabal circulat (Horta et al., 2008). La manca d'una adequada depuració en aquests casos, provoca serioses alteracions en la qualitat aigües avall. Un altre factor de risc és, justament, el contrari: l'absència d'EDAR en molts nuclis de població dels Pirineus. Un inadequat dimensionament de les plantes i de l'elecció de les tecnologies, sumat a la crisi econòmica, ha bloquejat en l'última dècada la construcció de moltes EDAR, el que ha provocat que molts municipis pirinencs estiguin abocant les seves aigües residuals sense tractament.

És d'esperar que el descens dels cabals en zones de capçalera dels Pirineus, combinat amb una major freqüència d'esdeveniments extrems (riuades i sequeres), redueixi el factor de dilució dels contaminants presents a les conques, desembocant en un empitjorament de la qualitat físico-química de les aigües (Petrovic et al. 2011). Tampoc cal menysprear el potencial increment de la temperatura de l'aigua resultat de l'augment en la temperatura mitjana de l'aire (Pérez-Zanon et al., 2017). Recentment, s'ha descrit en rius Pirinencs que els esdeveniments extrems relacionats amb el canvi climàtic impacten en els mecanismes de transferència tèrmica entre l'aire i l'aigua (Val et al., 2017). Aquest desacoblament pot conduir a canvis en els processos químics i biològics moderats per la temperatura, que acabarien tenint implicacions en la qualitat de l'aigua. De fet, algunes evidències d'aquest empitjorament són ja observables. Recents estudis de sèries històriques del riu Gállego a Jabarrella (Osca) mostren un fort impacte sobre el metabolisme de la comunitat biològica associat a una caiguda en els cabals, que seria explicable per una major concentració dels contaminants presents en aquesta zona del riu (Val et al., 2016b). En aquesta mateixa zona s'han realitzat estudis sobre l'impacte de la toxicitat del mercuri en escenaris futurs d'augment de les temperatures. Els resultats van mostrar que aquest increment de temperatura repercuteix en la sensibilitat de la comunitat biològica (algues) a la presència de mercuri en l'aigua. El mateix estudi mostra també que altres factors, com la presència de material particulat o dissolt provinent de la conca, i les seves dinàmiques que es veuran també alterades en els propers anys, alterarien no només la composició de l'aigua del riu, sinó que també modularien (en ambdós sentits) la toxicitat dels contaminants presents a l'aigua (Val et al., 2015c). Per exemple, mentre que un augment en els sòlids en suspensió a causa de les riuades reduiria la toxicitat dels metalls pesants, els canvis en la qualitat del material dissolt, com carboni

orgànic, podria augmentar-la. Aquestes prediccions es veuen reforçades per estudis previs basats en índexs de diatomees (Gomà et al., 2005). Aquests índexs atorguen millors puntuacions a la presència d'espècies poc tolerants a la pol·lució; així, valors elevats indiquen un millor estat químic de les aigües. En un estudi de l'any 1998 ja s'observava que per als rius dels Pirineus orientals el període amb millor qualitat de l'aigua era el de majors cabals a causa de la fusió de la neu, mentre que els pitjors valors s'obtenien al setembre, durant el període de baixos cabals (Gomà et al., 2005).

2.6.5 Canvis en la composició biològica de les masses d'aigua

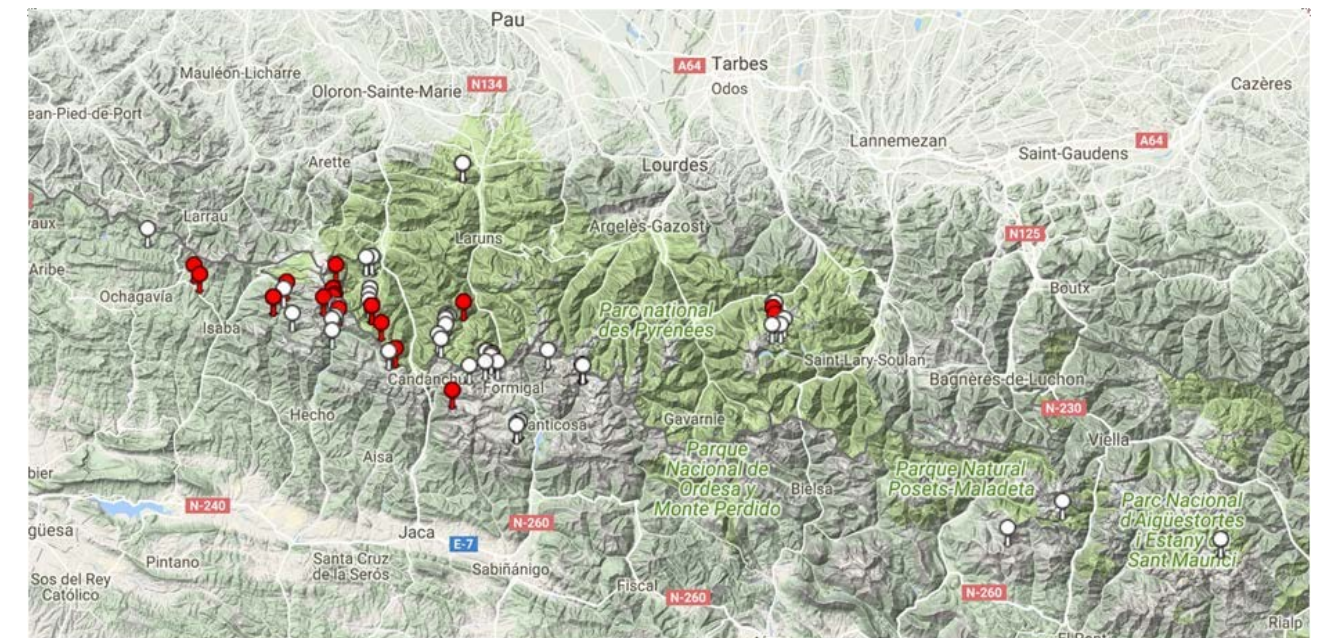
El canvi climàtic global, la transformació dels usos del sòl i la pol·lució actuen com a factors d'estrès en els ecosistemes aquàtics de muntanya, amenaçant el seu funcionament i el seu grau de salut. L'existència de forts gradients en els factors abiòtics (temperatura, precipitació...) en les zones de muntanya creen una gran varietat de micro-hàbitats que suporten una rica biodiversitat. Els organismes que poblen aquests hàbitats estan, amb freqüència, adaptats a un rang molt limitat de condicions abiòtiques, la qual cosa els fa especialment vulnerables al canvi climàtic (Nogués-Bravo et al. 2007; Elsen and Tingley 2015). Algunes espècies poden utilitzar-se com a indicadors de degradació ambiental. La seva presència o absència i el seu millor o pitjor estat fisiològic pot informar sobre l'estat de salut de tot l'ecosistema aquàtic. Els amfibis, com a organismes semi-aquàtics, estan afectats per les condicions canviants del seu hàbitat, tant a l'aigua com fora d'ella. A causa de la seva sensibilitat, s'utilitzen amb freqüència com a indicadors de la qualitat dels sistemes aquàtics. L'extinció accelerada d'espècies d'amfibis a escala global es considera que està relacionada amb una combinació complexa d'interaccions entre la pèrdua d'hàbitats i la degradació ambiental, a més de veure's reforçada per l'emergència i desenvolupament de plagues i malalties (Blaustein i Kiesecker, 2002). El desenvolupament alarmant d'un fong patògen, *Batrachochytrium dendrobatidis* (Bd.), es considera com un dels principals responsables de la davallada recent de moltes espècies d'amfibis (Wake i Vredenburg, 2008). Les epidèmies de Bd. s'han confirmat en diversos ambients bioclimàtics contrastats, i les àrees de muntanya estan afectades de forma especial. Bd. es dispersa a través de zoòspores aquàtiques, infectant la pell dels amfibis. La infecció pot comportar el desenvolupament per part de l'organisme portador, arribant a causar la seva mort. Bd. està present també als Pirineus, i ha arribat a provocar l'extinció de poblacions d'amfibis. La intensitat observada d'infeccions d'amfibis per Bd. varia espacialment (Figura 2.6.5), amb una elevada concentració a la zona central-

occidental, en les proximitats del Parc Nacional des Pyrénées (França).

Tant per millorar la conservació de les espècies d'amfibis, com per monitoritzar la salut dels ecosistemes aquàtics, és important conèixer les condicions ambientals que regulen l'expansió del patògen. La temperatura de l'aigua és un dels factors més importants que determinen el creixement i expansió de Bd (Walter et al., 2016; Clare et al., 2016). Estudis de cultiu han mostrat que Bd. té un desenvolupament òptim entre 17 i 25°C, i les zoòspores no toleren la dessecació. L'existència de temperatures per sobre d'aquest rang representa una limitació per al patògen. D'altra banda, les baixes temperatures s'han relacionat amb el desencadenament de brots de malaltia. Això pot explicar-se per un canvi en l'estratègia de Bd., que produeix un major nombre de zoòspores en ambients freds (Woodhams et al., 2008). D'altra banda, els ambients humits afavoreixen el creixement dels fongs, i s'ha relacionat un increment de les taxes d'infecció amb la prevalença de condicions humides (Berger et al. 2004; Murray et al. 2011). En canvi, les espècies d'amfibis que habiten aiguamolls estacionals s'han mostrat afectades en menor mesura per la malaltia

(Scheele et al., 2015). Els canvis en les condicions hidro-climàtiques es superposen a les condicions imposades per la transformació dels usos del sòl i de la coberta vegetal.

És probable que aquest tipus d'alteracions no climàtiques condicionin en gran mesura els patrons d'expansió de Bd. als Pirineus. Per confirmar aquesta hipòtesi, cal recopilar i analitzar dades sobre la climatologia, quantitat i qualitat de l'aigua, incloent les característiques físico-químiques de les masses d'aigua. El projecte SUDOE V-P3 (People, Pollution and Pathogens (Schmeller et al., 2018)) té com a objectiu investigar la salut dels ecosistemes aquàtics dels Pirineus i d'altres tres sistemes muntanyosos als Estats Units, la Xina i Oman. En el si d'aquest projecte, es prenen i analitzen mostres de qualitat d'aigua, sediment i microbioma al llarg de gradients d'altitud en els diferents massissos. La modelització hidrològica (a partir del model Soil and water assessment tool, SWAT) s'utilitza també en el projecte, amb la finalitat de caracteritzar el cicle hidrològic a les conques de muntanya i la dinàmica de les característiques físiques i químiques de les masses d'aigua. Aquesta informació, combinada, permetrà avaluar de quina manera respondrà la distribució del patògen Bd. al



canvi climàtic als Pirineus, i els seus possibles impactes sobre la salut dels ecosistemes aquàtics.

Com a conseqüència del canvi climàtic, s'ha constatat una redistribució generalitzada de diferents espècies d'aigües continentals cap a altituds més elevades (Hari et al., 2006). A mesura que els rius i rierols es tornen més càlids, els peixos d'aigües càlides desplacen als peixos d'aigües més fredes del seu hàbitat (Matthew, 2016). En rius de zones muntanyoses dels EEUU s'ha descrit, per exemple, l'avançament en les dates de migració de poblacions de salmònids com a resposta a les temperatures més càlides de l'aigua (Kovach, 2012). En els llacs de muntanya, les característiques físiques de l'ambient estan molt influïdes pels efectes del canvi climàtic (Thompson et al., 2009). Per exemple, si el període de gel és més breu s'incrementa la productivitat del llac en augmentar la durada del període durant el qual és possible la fotosíntesi, a més que una major temperatura de l'aigua possiblement facilita aquesta major productivitat (Mendoza, 2013). En una tesi doctoral recent (Mendoza, 2013), es descriu com les comunitats de macroinvertebrats de llacs de muntanya als Pirineus respondran al canvi global, amb respostes diferenciades als seus diferents components: canvi climàtic, pèrdua i fragmentació d'hàbitat, i espècies invasores, els quals poden mostrar també efectes d'interacció mútua. El desplaçament de les espècies cap a aigües amunt implica una reducció de la disponibilitat d'hàbitat, el que possiblement provocarà extincions locals (Mendoza, 2013).

2.6.6 Conclusions i recomanacions per a l'adaptació

El terme Gestió Integrada dels Recursos Hídrics (GIRH) denota "un desenvolupament i gestió coordinats dels recursos hídrics, la terra i altres recursos naturals, a fi de maximitzar el benestar econòmic i social" (Agarwall et al., 2000). Malgrat el relatiu èxit d'aquest concepte entre la comunitat científica, hi ha pocs exemples de la seva aplicació pràctica a la gestió dels recursos hídrics. No obstant això, és evident que per abordar els reptes del canvi climàtic amb relació al recurs aigua cal adoptar una visió integradora de

la gestió del territori, que replantegi la distribució territorial de l'ús de l'aigua. Les àrees de capçalera generen la major part dels recursos hídrics que s'usen aigües avall en les planes i les regions costaneres amb dèficit d'aigua i alta densitat de població. Per tant, les accions sobre els usos de l'aigua de la capçalera poden representar una opció d'adaptació efectiva en ambients amb escassetat d'aigua. Per exemple, diferents opcions de gestió forestal, com l'aclarida, poden millorar la infiltració d'aigües subterrànies i l'escorrentia superficial, augmentant així la producció d'aigua blava³⁶ a l'escala de conca, mentre s'optimitza la productivitat de l'aigua verda forestal. Aquest tipus d'accions, a més, tenen un efecte directe i mesurable sobre les societats pirinenques, ja que són generadores d'ocupació i activitat econòmica.

La gestió de l'aigua al territori pirinenc s'enfronta també a reptes de coneixement. Tot i que, sobre el territori pirinenc hi ha diversos agents amb responsabilitat en el monitoratge i gestió dels recursos hídrics (organismes gestors de conca i altres) i que hi ha diverses xarxes de monitoratge i multitud d'estudis, no hi ha cap avaluació que integri la totalitat de la serralada. L'absència d'estudis amb caràcter transfronterer és especialment greu, ja que la serralada és un element clau en la interacció amb la dinàmica atmosfèrica, de manera que qualsevol estudi de futur ha de tenir en compte la totalitat de la mateixa. Això es posa en relleu, per exemple, en les discrepàncies existents entre algunes simulacions del clima futur realitzades en un i altre vessant dels Pirineus, en els que es preveu una alteració de la trajectòria de les borrasques associades al front polar de signe oposat, amb conseqüències també oposades en el forçament del sistema hidrològic. Per tant, hi ha una necessitat d'abordar l'estudi del cicle hidrològic dels Pirineus íntegrament.

(36) Aigua blava és l'aigua dolça superficial (en els rius, llacs i embassaments) més l'aigua subterrània (en els aqüífers), constituint la part dels recursos hídrics susceptible de suportar un ús consumptiu.

(37) Aigua verda és l'aigua emmagatzemada in situ en el lloc on es produeix la precipitació, fonamentalment en el sòl, i que és evaporada directament a l'atmosfera o bé utilitzada per les plantes (ja sigui vegetació natural o cultius) en el procés conegut com transpiració per satisfer les seves necessitats fisiològiques de manteniment o creixement. Per tant, l'aigua verda és també una part dels recursos hídrics d'un territori.

ENQUADRAMENT 2.6.1. ESTRATÈGIES NACIONALS I REGIONALS D'ADAPTACIÓ AL CANVI CLIMÀTIC EN RELACIÓ AMB ELS RECURSOS HÍDRIC

A nivell nacional, França i Espanya van ser els primers països de la UE a desenvolupar les seves respectives Estratègies d'Adaptació al Canvi Climàtic. El Pla Nacional d'Adaptació al Canvi Climàtic espanyol, de 2007, reconeix les àrees de muntanya com les zones més vulnerables al canvi climàtic. Aquest mateix pla estableix una sèrie d'objectius per a l'avaluació de l'impacte del canvi climàtic i el desenvolupament de mesures d'adaptació a les zones de muntanya:

- i) Integració d'avaluacions sectorials o territorials en l'àmbit de les muntanyes, incloent la cartografia dels impactes del canvi climàtic;
- ii) Desenvolupament de xarxes de seguiment del canvi climàtic, incloent indicadors;
- iii) Seguiment i caracterització de l'impacte del canvi climàtic sobre el balanç hidrològic.

El Pla Nacional d'Adaptació al Canvi Climàtic francès, de 2006, estableix com objectiu principal el de presentar mesures operatives concretes per afrontar i aprofitar les noves condicions climàtiques, identificant algunes d'elles com l'augment de les temperatures, onades de calor i sequeres més freqüents i intenses, etc. El document identifica les accions d'adaptació territorials com a indispensables, i complementàries a les accions encaminades a la mitigació del canvi climàtic, com les polítiques de reducció d'emissions d'efecte hivernacle. A nivell regional també hi ha iniciatives rellevants. Així, l'Estratègia Catalana per a l'Adaptació al Canvi Climàtic de 2013 ja realitza una avaluació dels impactes observats i esperats del canvi climàtic en diferents sectors socioeconòmics i ambientals, identificant i promovent mesures concretes d'adaptació. Igualment, l'Estratègia Aragonesa de Canvi Climàtic i Energies Netes planifica estratègies de mitigació i d'adaptació al canvi climàtic, en sintonia amb l'estratègia espanyola. El Pla Basc de Lluita contra el Canvi Climàtic planteja, per a l'any 2020, la consolidació d'un model socioeconòmic no dependent del carboni, i minimitzar la vulnerabilitat davant el canvi climàtic. L'Estratègia davant del Canvi Climàtic de Navarra també identifica els objectius i les accions concretes per millorar l'adaptació de la societat navarresa al canvi climàtic, establint el mateix horitzó de 2020. El Pla Climàtic de la regió Llenguadoc-Rosselló de 2009 proposa mesures concretes d'adaptació mobilitzant totes les competències de la regió. La regió de Midi-Pyrénées també va desenvolupar un Pla Regional per al Clima, Aire i Energia, adaptant l'estratègia

nacional a les peculiaritats de la regió. El Pla Regional per al Clima, Aire i Energia d'Aquitània de 2012 estableix el marc d'adaptació per a aquesta regió, i fins i tot va arribar a formar un comitè d'experts per unir les polítiques públiques amb el coneixement científic, especialment adaptat a les condicions de la regió.

Precisament, pel que fa a la gestió dels recursos hídrics, la Unió Europea ha reconegut àmpliament la necessitat de garantir un abastament suficient en quantitat i qualitat. La Directiva Marc en matèria d'aigua (2000/60/EC) és el document central sobre gestió dels recursos hídrics en termes de protecció dels sistemes hídrics. Aquesta directiva s'ha plasmat, per exemple, en els Plans de Gestió de Conca realitzats pels diferents organismes de conca, d'acord amb i desenvolupant els principis de la Directiva Marc europea. Un altre document europeu (COM/2007/414) aborda els reptes derivats de l'escassetat d'aigua i les sequeres a la Unió Europea, emfatitzant la importància de promoure mesures de gestió eficient dels recursos hídrics. La Directiva sobre qualitat ambiental en l'àmbit de la gestió hidràulica (2008/105/EC) descriu els límits de concentració de diferents substàncies contaminants en els cossos d'aigua. A nivell nacional, els diferents organismes gestors de l'aigua han adaptat el marc general de la directiva europea a les seves respectives conques, desenvolupant els plans de gestió dels recursos hídrics per a diferents escenaris futurs.

3. Impacte del canvi climàtic en els sectors socioeconòmics

3.1 Turisme

Coordinadors: Idoia Arauzo (CTP-OPCC), Juan Terrádez (CTP-OPCC)

Autors: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC).

Coautors: Marc Pons (CEMNA-IEA), David Saurí (UAB), Ibai Rico (UPV-EHU, IPE-CSIC), Jeremie Fosse (ECOUNION).

3.1.1 Reducción del atractivo turístico invernal de las estaciones de esquí

Situació actual: el turisme d'hivern és la principal font d'ingressos i la força motriu del desenvolupament local en moltes zones dels Pirineus (OMT, 2015). No obstant això, els darrers anys aquest sector de la indústria turística s'ha identificat com un sector extremadament vulnerable als efectes del canvi climàtic (Pons et al., 2015; EEA, 2017). L'augment significatiu de les temperatures mitjanes, màximes i mínimes hivernals registrat a banda i banda del massís durant el segle passat (OPCC, 2013) i l'elevada sensibilitat de la neu a l'augment de la temperatura, han provocat una disminució hivernal de la proporció de precipitacions en forma de neu i un augment de l'energia disponible per a la fusió de la neu (Rood et al., 2008). En conseqüència, està disminuint el nombre de dies amb una acumulació de neu suficient per a poder desenvolupar amb normalitat les diverses modalitats d'esquí alpí i s'està produint una migració cap a cotes superiors de la línia d'acumulació de la neu (Minder, 2010; López-Moreno et al., 2013). En un estudi recent sobre l'evolució de la capa de neu i del nombre de dies esquiabls a les estacions dels Pirineus s'ha determinat que, durant el període comprès entre els anys 1960 i 2010, el nombre de dies a l'any amb una capa de neu de 0 a 30 cm i de 30 a 100 cm, ha disminuït notablement a totes les estacions d'esquí, especialment a les estacions que es troben a cotes baixes (5-70 % i 42-100 %, respectivament) i a cotes mitjanes (4-20 % i 20-65 %, respectivament) (Gilaberte-Búrdalo et al., 2017). També s'ha anat posposant progressivament la data d'inici de la temporada d'esquí (en funció de la disponibilitat de neu natural), amb retards que oscil·len entre 5 i 55 dies a les estacions que es troben a cotes baixes i entre 5 i 30 dies a les estacions situades a cotes mitjanes. Aquests retards tenen implicacions econòmiques, ja que generalment comporten una reducció dels ingressos

RESUM

El sector turístic al massís dels Pirineus es caracteritza per ser un dels motors econòmics d'aquest territori. A l'Aragó, el turisme de neu representa el 7 % del PIB i la despesa generada pels esquiadors ronda els 170 milions d'euros per temporada (ATUDEM, 2016). En el cas d'Andorra s'estima que el pes del turisme de neu representa al voltant del 15 % del PIB, amb un impacte directe, indirecte i induït de prop de 450 milions d'euros per temporada (OBSA, 2014). El clima és un factor clau per al turisme de muntanya. Els factors climàtics i el temps meteorològic són dos elements crítics que defineixen l'atractiu de les diferents destinacions turístiques i condicionen les decisions dels turistes a l'hora d'escollir el lloc on passaran les vacances (Eurostat, 2015). Concretament, en el sector turístic, l'efecte del canvi climàtic en la decisió sobre el lloc on passar les vacances inclou dos aspectes importants. D'una banda, el canvi climàtic pot provocar efectes directes en els turistes com a conseqüència de la modificació de les condicions de confort tèrmic. D'altra banda, també pot resultar decisiu a l'hora de determinar les condicions necessàries per practicar certes activitats (com per exemple, que hi hagi una cobertura i uns gruixos de neus suficients per practicar l'esquí). Així mateix, també pot provocar alteracions ambientals amb efectes contextuais negatius. En particular, aspectes com la presència o no de certes espècies de fauna i flora emblemàtica, la qualitat dels ecosistemes, l'estat de les formacions naturals iconogràfiques i de l'entorn en general, també poden veure's afectats pel canvi climàtic (Perels et al., 2015), cosa pot acabar provocant una pèrdua per l'interès turístic de les zones afectades.

Per a un gran nombre de turistes, les condicions climàtiques del lloc on passaran les vacances determinen l'organització del viatge, i és que, el turistes planifiquen els viatges de forma que puguin gaudir de les condicions òptimes per dur a terme les activitats que desitgen allà on van. En aquest sentit, és molt probable que l'augment en la variabilitat climàtica que es preveu que es produirà durant els pròxims decennis, juntament amb l'increment de les temperatures mitjanes, modifiqui les destinacions escollides pels turistes, cosa que tindrà repercussions tant positives com negatives en la dinàmica dels fluxos turístics als dos vessants del massís.

anuals: el pont de la Puríssima, les últimes setmanes de desembre i l'inici de gener són períodes d'especial aflluència turística als Pirineus per a practicar-hi esports d'hivern. Atès que el retard en l'inici de la temporada de neu coincideix amb la temporada de més demanda turística, les estacions d'esquí es veuen sistemàticament obligades a recórrer a la innivació artificial per tal de poder romandre operatives, cosa que té una important repercussió econòmica com a conseqüència de la despesa energètica que comporta aquest sistema i de l'elevat cost de manteniment dels equips d'innivació artificial (Steiger i Stotter, 2013). Estudis similars duts a terme tant en altres zones de muntanya mediterrànies (López-Moreno, Goyette et al., 2011; López-Moreno i Vicente-Serrano et al., 2011; Franch et al., 2016) com als Alps (Endler i Matzarakis, 2011; Beniston et al., 2013) han obtingut uns resultats similars als dels Pirineus. Pel que fa a altres aspectes socioeconòmics, cal esmentar que la demanda hídrica destinada a la producció de neu, en un context de disminució de la disponibilitat de l'aigua a causa del canvi climàtic i dels canvis d'ús del sòl, pot arribar a esdevenir un motiu de conflicte entre els sectors hidro exigents, especialment en algunes subconques dels Pirineus. És el cas per exemple de les subconques pirinenques de l'Adour i de la Garona on, durant alguns anys, la demanda hídrica destinada a la producció de neu s'ha equiparat pràcticament a la demanda necessària del sector hidroelèctric i industrial (Clarimont et al., 2008). La producció de neu artificial a gran escala, a part de posar en risc la rendibilitat econòmica de les estacions d'esquí, comporta una sèrie d'externalitats ambientals que també cal tenir en compte, especialment en un escenari futur en el qual es preveu que es produirà una manca de recursos hídrics (Steiger i Abegg, 2013). A més a més, l'augment de les temperatures hivernals també afectarà la capacitat de produir neu artificial de forma eficient, fet que implica un increment dels costos de producció i una disminució dels dies idonis per a produir neu artificial (Steiger i Abegg, 2013; Pons et al., 2015). Paral·lelament als afectes socioeconòmics, cal destacar que, un augment considerable de la producció de neu artificial pot comportar determinades externalitats ambientals greus de caràcter mediambiental. Concretament, la producció massiva de neu artificial pot tenir efectes negatius sobre la vegetació, i per tant, sobre el potencial erosiu dels vessants. D'altra banda, també es possible que augmenti el risc d'alterar la qualitat de l'aigua retornada al medi a com a conseqüència de la possible presència d'additius.

Projeccions de futur: pel que fa al futur, els principals models climàtics coincideixen en què la situació actual empitjorarà a mitjans i a final d'aquest segle. Amb un increment mitjà de la temperatura als Pirineus de fins

a + 2 °C l'any 2070 i de fins a + 4 °C l'any 2100 (López-Moreno et al. 2008; ENSEMBLES, 2012; EURO-CORDEX, 2014, és molt probable que tant l'espessor del mantell nival com la superfície de cobertura de neu continuïn disminuint cada vegada més durant els pròxims decennis i que, en conseqüència, també es produeixi una disminució de la superfície esquiabls, així com del nombre de dies esquiabls per temporada. Si es compleixen aquestes previsions, a part de provocar alteracions importants en el cicle hidrològic i en els ecosistemes dels Pirineus, també plantejaran seriosos reptes per al sector turístic hivernal (SCAMPEI, 2012; Steger et al., 2013; Kovats et al., 2014; Pons et al., 2014; EEA, 2017). En el context d'un estudi de Pons et al. de l'any 2015, s'ha estimat la vulnerabilitat de la capacitat operativa de les estacions d'esquí dels dos vessants del massís pirinenc en un futur en relació amb l'impacte del canvi climàtic (Figura 3.1.1).

En aquest estudi s'ha avaluat la capacitat operativa futura de les principals estacions d'esquí dels Pirineus en dos escenaris d'increment de les temperatures mitjanes (un increment de la temperatura mitjana hivernal de + 2 °C per als anys 2051-2070 i de + 4 °C per al període comprès entre els anys 2071 y 2100) i prenent com a hipòtesi l'ús, o no, de canons de neu artificial i l'aplicació d'un tractament a les pistes. Els escenaris proposats fan referència únicament a la variació prevista de les temperatures, ja que és la variable que en les projeccions climàtiques influeix més sobre les modelitzacions de l'evolució del mantell nival (Pons et al., 2015). Segons els criteris emprats en aquest estudi, actualment, i durant una temporada mitjana d'esquí, el 93 % de les estacions dels Pirineus poden funcionar amb normalitat sense recórrer a l'ús de neu artificial. Aquest percentatge s'eleva fins al 98 % amb l'ús de canons de neu. No obstant això, en un escenari en què es produeix un augment de la temperatura de + 2 °C, aquest percentatge es reduirà al 44 %. Si l'augment de les temperatures mitjanes fos del + 4 °C, el percentatge total d'estacions d'esquí amb plena capacitat operativa disminuiria dramàticament fins a un 7 %. Si bé l'ús de mesures d'adaptació tècniques, com ara la producció de neu artificial tindria un impacte positiu en el primer escenari considerat (del 44 % al 85 %), en l'escenari en què la temperatura augmenta + 4 °C, l'efecte la producció de neu artificial seria residual i no comportaria cap increment significatiu del percentatge d'estacions d'esquí plenament operatives com a conseqüència de la disminució dels dies idonis que permeten produir neu artificial.

Tot i que els estudis sobre l'impacte del canvi climàtic en el turisme d'hivern no són gaire encoratjadors per a aquest sector, és important recordar que les

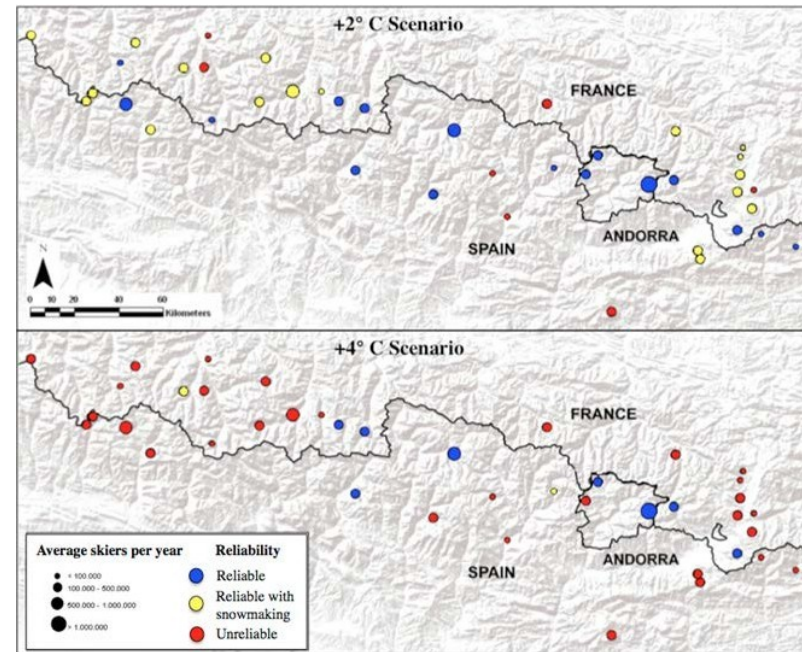


Figura 3.1.1. Evolució de la capacitat operativa de les estacions d'esquí dels Pirineus sense producció de neu artificial i amb producció de neu artificial, per a dos horitzons temporals i escenaris futurs diferents (+2oC, per als anys 2051-2070, i +4 oC per al període comprès entre 2071-2100). El color dels punts fa referència a les previsions sobre la capacitat operativa de les estacions en funció dels diferents escenaris. En blau es mostren les estacions que es preveu que mantindran la seva capacitat operativa; en groc, les estacions que podran mantenir la seva capacitat si produeixen neu artificial i, en vermell, les estacions que es preveu que alguns anys tindran dificultats per operar, fins i tot produint neu artificial com a mesura d'adaptació. La mida dels punts és proporcional al nombre d'esquiadors per any de cadascuna de les estacions estudiades. Font: Pons et al., 2015

estacions dels Pirineus poden presentar diferències notòries en el grau de sensibilitat i vulnerabilitat al canvi climàtic en funció de les diferents característiques, tant geogràfiques com topogràfiques i de gestió, (Campos Rodrigues et al., 2016; Navarro-Serrano i López-Moreno, 2016; Gilberte-Búrdalo et al., 2017). En aquest sentit, cal destacar que l'elevada heterogeneïtat i la gran variabilitat espacial, climàtica, de gestió i del context socioeconòmic i turístic, fa que el grau de vulnerabilitat sigui molt diferent en espais separats per distàncies molt curtes, fins i tot a una mateixa vall. Aquesta diferència de vulnerabilitat ens permet classificar les estacions en tres grups diferents. Un grup d'estacions considerades d'alta vulnerabilitat, en les quals, tant un escenari mitjà com un d'un canvi climàtic més sever afectarien la seva activitat i per les quals les mesures d'adaptació tècnica no seran suficients. Un grup de vulnerabilitat mitjana, en el qual les mesures d'adaptació tècniques podrien ser suficients en l'escenari d'un canvi climàtic mitjà, però que en el cas d'un escenari més intens es veuran obligades a adoptar mesures més estructurals, a optar per una transformació orientada a la desestacionalització de les estacions d'esquí i a presentar-se com a estacions de turisme de muntanya. Finalment, el grup de les estacions més resilientes, està format per aquelles estacions que, gràcies a les seves característiques geogràfiques i socioeconòmiques gaudeixen d'un avantatge competitiu respecte a les altres, cosa que comportaria que, en contradicció amb altres estudis (Campos Rodrigues et al., 2016), aquestes estacions no patiran una disminució del nombre d'esquiadors, sinó que, fins

i tot, podrien atraure els esquiadors de les estacions més vulnerables (Pons et al., 2014). Aquesta hipòtesi concorda amb el nombre de dies amb d'esquiadors de certes estacions del Pirineu que, en temporades amb condicions marginals, milloren les seves xifres o presenten una variació menor que en les temporades amb bones condicions d'innivació. S'ha estimat que si una estació d'esquí tanca o té poca neu, només un 5 % dels esquiadors deixa o deixarà d'esquiar. La resta opta per cercar una alternativa o esquia de forma més intensa un cop l'estació gaudeix de condicions més òptimes (Rutty et al., 2015). Per aquest motiu, més que una disminució completa del sector dedicat a l'esquí, s'espera que es produirà una redistribució del mercat entre aquelles estacions més vulnerables i les més resilientes dels Pirineus. Així doncs, per tal de garantir una bona adaptació al canvi climàtic és necessari dur a terme accions individuals en les diferents estacions en funció del grau de vulnerabilitat local i de la magnitud de l'impacte esperat (Pons et al., 2014).

ENQUADRAMENT 3.1.1. ESTIMACIÓ DEL COST ASSOCIAT A L'ADAPTACIÓ DE LES ESTACIONS D'ESQUÍ: UNA VALORACIÓ ECONÒMICA

Les valoracions econòmiques sobre l'estimació del cost associat a l'adaptació de les estacions d'esquí són instruments de gran utilitat per facilitar la presa de decisions en aquesta matèria. Tot i que les valoracions i estimacions econòmiques en aquest camp s'han d'interpretar amb precaució a causa de la incertesa inherent al futur (evolució de l'economia, emissions globals i variabilitat climàtica futura), es tracta d'estudis que permeten reflectir de manera clara els costos i beneficis hipotètics de les possibles mesures d'adaptació. Aquests estudis permeten optimitzar les mesures d'adaptació a partir de l'equilibri entre els possibles costos i beneficis i valorar amb informació objectiva la viabilitat d'aquestes opcions (Howden et al., 2007).

En un estudi recent de Campos Rodrigues et al. (2016) de l'any 2016, s'ha dut a terme una anàlisi de l'impacte del canvi climàtic a les zones de turisme d'hivern d'Espanya i s'han descrit les possibles mesures d'adaptació. Concretament, en aquesta recerca s'ha dut a terme una anàlisi de la relació cost-beneficis en funció de diversos escenaris climàtics per a dues mesures d'adaptació: l'augment de la innivació artificial i l'ampliació dels d'horaris d'activitat (horari d'esquí nocturn). La figura 3.1.2 recull les estimacions sobre les pèrdues futures d'ingressos (sense aplicar mesures d'adaptació) obtingudes per a tres escenaris diferents en els quals es redueix el nombre de dies esquiabls (escenari baix: -10 dies, escenari mitjà: -20 dies i escenari elevat: -30 dies).

Sistema montanoso	Estación	Escenario bajo		Escenario medio		Escenario elevado	
		Forfaits diurnos vendidos	Pérdida de ingresos (€)	Forfaits diurnos vendidos	Pérdida de ingresos (€)	Forfaits diurnos vendidos	Pérdida de ingresos (€)
PC	Baqueira Beret	731 805	-1 360 040	669 787	-2 720 081	545 753	-5 440 161
	Boí Taüll	101 608	-198 952	92 536	-397 904	74 391	-795 807
	Esport Esquí	58 072	-112 701	52 933	-225 401	42 655	-450 802
	La Molina	244 188	-473 898	222 579	-947 797	179 360	-1 895 594
	Masella	340 906	-602 908	313 413	-1 205 816	258 428	-2 411 632
	Port Ainé	96 735	-187 735	88 175	-375 470	71 053	-750 940
	Port del Comte ¹	47 357	-101 818	42 714	-203 636	33 429	-407 271
	Vall de Núria	41 729	-88 846	37 677	-177 691	29 575	-355 382
PA	Vallter 2000	55 470	-105 780	50 647	-211 560	41 000	-423 119
	Astún	179 735	-394 160	161 762	-788 320	125 815	-1 576 639
	Candanchú	173 333	-365 500	156 667	-731 000	123 333	-1 462 000
	Cerler	226 073	-438 743	206 067	-877 485	166 054	-1 754 971
	Formigal	475 928	-940 279	433 051	-1 880 557	347 299	-3 761 115
Panticosa	75 552	-149 267	68 746	-298 534	55 133	-597 069	

Figura 3.1.2. Estimació del nombre de forfaits diurnos venuts i de la pèrdua d'ingressos diurnos associada als escenaris climàtics de les estacions del Pirineu Català (PC) i del Pirineu Aragonès (PA). Font: Campos Rodrigues et al., 2016.

En aquest estudi, els autors conclouen que, tenint en compte els diferents escenaris climàtics, l'adopció de les dues mesures d'adaptació esmentades, comportaria en tots els casos un augment considerable dels costos totals, fet que podria comprometre la viabilitat econòmica futura de determinades estacions. Aquests costos podrien compensar-se mitjançant l'increment del nombre de forfets venuts. En aquest cas, però, el percentatge de forfets necessaris per cobrir els costos de la innivació artificial podria ser superior al 10 % per a diverses estacions, i fins i tot superar el 25 %, d'acord amb els escenaris considerats. De totes maneres, el balanç econòmic global estimat en aquesta investigació (resultat de les pèrdues associades a la disminució dels dies d'esquí, les despeses derivades de l'ampliació horària i els beneficis obtinguts a partir de la venda de forfets nocturns), és negatiu per a totes les estacions. Els resultats indiquen un balanç negatiu agregat que varia entre els 7 i els 33,1 milions d'euros. En termes generals, els autors conclouen que algunes estacions dels Pirineus hauran de redissenyar el seu model econòmic i apostar per altres activitats de muntanya més adaptades als escenaris climàtics futurs. A més a més, a l'hora d'adoptar mesures d'adaptació de caràcter estructural, és important tenir en compte l'aparició de certs reptes, com ara la necessitat d'implicar els agents econòmics regionals al debat, la possible necessitat de fer rendible el capital físic invertit en les estacions o tenir en compte la tipologia del mercat laboral a cada estació en particular per tal de poder analitzar la seva capacitat d'adaptació a la possible diversificació del sector.

3.1.2 Alteració del elements iconogràfics del paisatge pirinenc

Situació actual: un altre tipus d'impacte que el canvi climàtic pot exercir sobre el sector turístic dels Pirineus són els canvis en el paisatge, i en especial, l'acceleració del procés de degradació d'alguns elements iconogràfics del paisatge d'alta muntanya, com ara les torberes, les glaceres i els llacs (Stewart et al., 2016). D'altra banda, els efectes de l'escalfament global en la biodiversitat del massís, com ara els canvis fisiològics en els boscos, el desplaçament de les comunitats vegetals cap a cotes superiors o la reducció de la biodiversitat, poden contribuir, juntament amb la degradació dels elements iconogràfics descrits anteriorment, a reduir l'atractiu visual dels paisatges pirinencs. L'ús dels boscos per a dur a terme activitats de lleure també es podria veure afectat per un augment del risc d'incendis forestals (Barrio et al., 2007; Hystad i Keller, 2008), així com per la possibilitat que alguns rius i rierols s'assequin o que la qualitat de l'aigua es vegi afectada per la disminució de les precipitacions en determinades estacions de l'any (Moreno et al., 2010).



Figura 3.1.3. Imatge de la glacera del Mont Perdut l'estiu de l'any 1981 (esquerra) i l'estiu de 2011 (dreta). Font: López-Moreno et al., 2016

La aceleración del retroceso de los glaciares pirenaicos, además de implicar una serie de impactos indirectos a nivel ecológico (Finn et al., 2013), representa una pérdida irreversible en términos de patrimonio cultural y ambiental (Houghton et al., 2001). Desde 1984 hasta 2016, se ha estimado que han desaparecido 20 de los 39 glaciares contabilizados en 1984, lo que ha supuesto una pérdida de superficie glaciar equivalente a 516 ha. En otras palabras, en solo 32 años han desaparecido algo más de la mitad de los glaciares de los Pirineos (Lopez-Moreno et al., 2016; Rico et al., 2016).

El retrocés de les glaceres als anys 80 ha doblat el ritme i les taxes de canvi del segle XX, passant de 9,33 ha de pèrdua anual entre 1850 a 1984 i un descens de 17,76 ha durant el període comprès entre 1984 i 2016 (Rico et al., 2017). L'estudi d'escales de massa i canvis a la zona altimetria confirma l'equilibri de les glaceres glacials respecte a les condicions ambientals, conures de les espècies de diversos metres anuals (Chueca et al., 2007, Del Rio et al., 2014; Rico et al., 2014; Moreno-Santaengracia, 2016; René, 2017).

Si es confirmen les previsions dels principals models climàtics, és molt probable que a finals de segle hagin desaparegut la majoria de les glaceres d'Europa. Si tenim en compte que les glaceres dels Pirineus es troben situades en una ubicació geogràfica més meridional, això implica que desapareixeran gairebé totes les glaceres dels Pirineus (Radić et al., 2014; Marti et al., 2016).

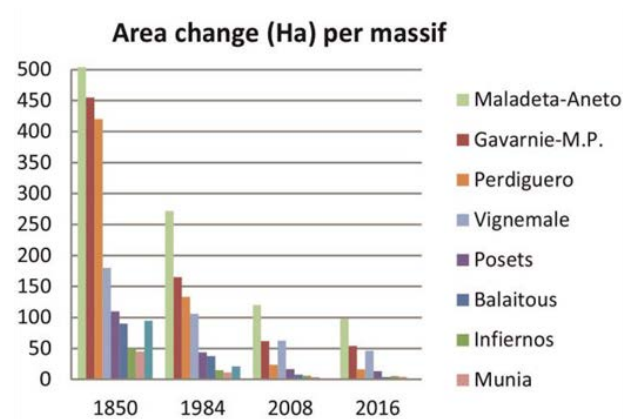


Figura 3.1.4. Estimació de l'evolució de l'àrea dels principals massissos glacieres dels Pirineus. Font: Rico et al., 2017

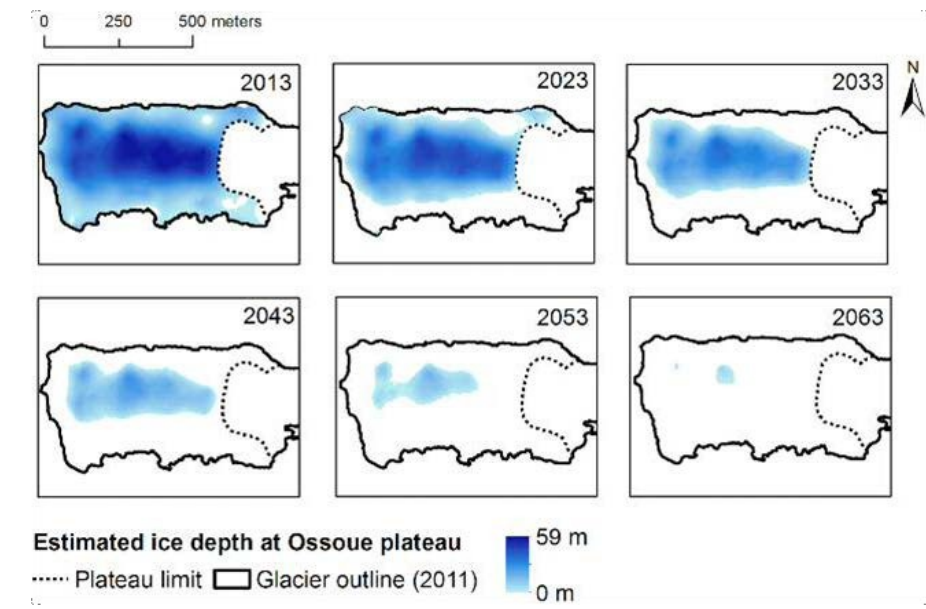


Figura 3.1.5. Estimació de l'evolució de la profunditat de la massa de gel al plateau d'Ossoue en les pròximes dècades. Font: Marti et al., 2016

3.1.3 Augment del risc per a les infraestructures turístiques com a conseqüència dels fenòmens hidrològics, geològics i dels esdeveniments climàtics extrems

La influència del canvi climàtic sobre els riscos hidrològics i els riscos derivats dels esdeveniments climàtics extrems es configura com un element d'instabilitat capaç de generar greus danys a les infraestructures relacionades directa i indirectament amb el sector turístic als Pirineus (complexos hotelers i apartaments rurals, refugis, instal·lacions de telecomunicacions, carreteres de muntanya i senders turistes), i fins tot en determinats casos, comprometre la integritat de les poblacions situades en aquestes zones (Nogués-Bravo et al., 2007). Les possibles implicacions d'un augment dels riscos hidrològics i meteorològics en el sector turístic inclouen tant els danys directes a persones com els danys a les instal·lacions destinades a l'allotjament i a les infraestructures turístiques. Entre els fenòmens hidrològics i geològics que poden provocar danys greus i que més poden variar el seu comportament a causa del canvi climàtic destaquen: les inundacions sobtades o les crescudes provocades per una major freqüència de precipitacions intenses, i els corriments i esllavissades de terra associats a un augment dels cicles de gel i desgel a conseqüència d'una major variabilitat climàtica (Keiler et al., 2010; Raia et al.

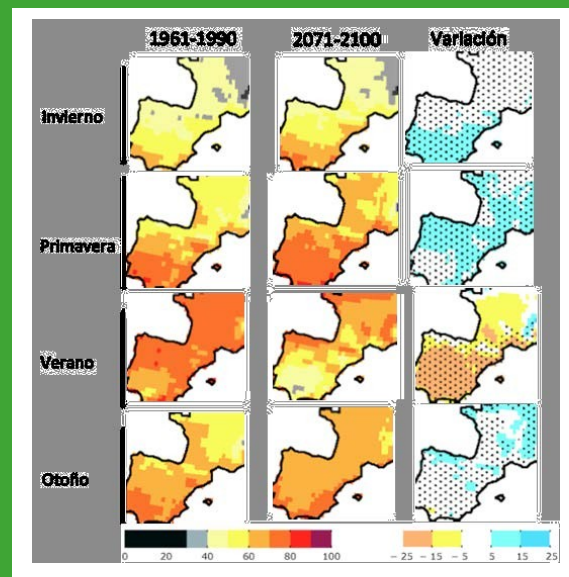
2012). (més informació al capítol 3.4 Riscos naturals). Un altre aspecte a considerar consisteix en les possiblesafeccions a la seguretat dels usuaris de muntanya derivats dels riscos glacials intensificats pel canvi climàtic. En particular, la degradació del permafrost pot generar una augment dels desprendiments de roques (Rico et al., 2017) a més de canvis en muntanyes icòniques com Vignemale o Aneto.

3.1.4 Prolongación de la estación de turismo de montaña

El canvi climàtic també podria tenir efectes positius en el turisme de muntanya. La prolongació de l'estació estival, unes temperatures més suaus a la primavera i a la tardor i el descens de les temperatures mínimes, poden fer que un major nombre de persones opti per la muntanya com a destinació turística, en detriment d'altres destinacions menys confortables com a conseqüència de les elevades temperatures (Isoard et al., 2008). Això podria traduir-se en un avantatge pels Pirineus en termes competitiu respecte a les zones turístiques de sol i platja a mesura que els turistes optin cada cop més per passar les seves vacances en zones de muntanya en lloc de fer-ho al litoral, on un augment de les temperatures mitjanes i màximes podria disminuir de forma significativa la idoneïtat climàtica de les cotes baixes (Scott et al., 2007).

ENQUADRAMENT 3.1.2. ELS MODELS D'IDONEÏTAT CLIMÀTICA TURÍSTICA

Hi ha diversos enfocaments que permeten avaluar l'impacte del canvi climàtic en el turisme. Els models d'idoneïtat climàtica turística (Becker, 1998; Mieczkowski, 1985; Moreno i Amelung, 2009) incorporen diversos paràmetres meteorològics, com ara la temperatura, les precipitacions o el vent, per tal d'intentar reflectir de manera sintètica i amb un sol valor, la idoneïtat climàtica de les diferents destinacions en funció de les activitats turístiques que s'hi duen a terme. Tot i que aquests models presenten limitacions (tenen una escassa validació empírica en relació al comportament dels turistes) i, per tant, cal interpretar-los amb certa cautela, són una de les eines més útils per avaluar els efectes del canvi climàtic en el turisme, ja que en general, és possible obtenir les variables climàtiques i també perquè permeten incorporar els canvis estacionals en els factors climàtics (ref.). L'índex climàtic turístic (ICT)³⁸ és un índex que permet estudiar la relació entre les condicions meteo-ambientals i el benestar físic de les persones. Aquest índex permet avaluar les diferents ubicacions en relació a la comoditat que ofereixen als turistes i a les activitats que aquests duen a terme en cada zona del territori i temporada de l'any. Així doncs, s'obindrà un ITC diferent per al turisme estival a les zones costaneres en comparació amb l'ITC calculat per al turisme de muntanya. En l'àmbit del projecte europeu PESETA, Amelung i Moreno (2009), han demostrat que, efectivament, existeix una bona correlació entre aquest índex i els fluxos turístics a Europa.



Mapa 3.1.4. Valors de l'Índex Climàtic Turístic (ICT) calculats per al període de referència (1961-1990, columna de l'esquerra), per al període futur (2071-2100, columna central) i variació de l'ICT entre els dos períodes (columna de la dreta). Les condicions climàtiques futures es basen en el RCP2.6. S'utilitza la mitjana de 5 models de projecció climàtiques en el context del projecte europeu PESETA.

Si comparem la situació de l'ITC actual i la projectada per al futur (mapa x), s'observa, en línies generals, que les condicions idònies per a les activitats turístiques es troben cada cop més a altituds i latituds més elevades. Com a conseqüència del canvi climàtic és molt probable que durant aquest segle, la franja de "clima favorable" es desplaci cap al nord i cap a altituds més elevades, fet que millorarà la idoneïtat dels Pirineus com a destinació turística, especialment a la primavera i a la tardor. La idoneïtat dels Pirineus com a destinació turística tendeix a romandre estable o a presentar una lleugera millora durant el període estival. Si la comparem, però amb les zones costaneres, la millora és molt significativa. Tant a França com a Espanya, les previsions mostren un empitjorament del confort climàtic a les zones costaneres, cosa que ofereix una nova oportunitat al turisme de natura i muntanya (Perrels et al., 2015).

(38) L'Índex Climàtic Turístic (ICT) proposat pel geògraf Z. Mieczkowski està considerat l'índex de referència per valorar l'impacte del canvi climàtic en el turisme. Aquest índex integra les variables meteorològiques que es consideren decisives per tal que una activitat turística gaudeixi de tots els requisits necessaris.

3.1.5 Conclusions i recomanacions

El sector turístic dels Pirineus presenta una elevada vulnerabilitat a l'impacte del canvi climàtic. Aquest sector és al mateix temps un important motor econòmic d'aquest territori. La magnitud dels impactes previstos dependrà en gran mesura de les estratègies d'adaptació que adoptin els diferents actors del sector (turistes, tour-operadors i autoritats de gestió), i de la capacitat que aquests tinguin per dur a terme una gestió adaptativa. En aquesta secció presentem de manera sintètica els principals reptes que afecten i afectaran el sector turístic del massís, així com un marc general on s'indiquen les recomanacions principals que caldria seguir per tal d'adaptar aquest sector turístic al canvi climàtic. Les conclusions es presenten com un llista dels principals reptes climàtics que afecten aquest sector, mentre que les recomanacions d'adaptació es presenten en funció de tres tipologies d'intervenció o mesura d'adaptació: *mesures verdes, grises i soft (toves)*.

Reptes principals

- Readaptar els models de desenvolupament turístic per tal de fomentar la resiliència del sector davant de la futura disminució del nombre de dies esquiables i la major pressió ambiental associada a aquesta activitat i promoure les oportunitats emergents per al turisme de natura i muntanya (concepte d'estacions de muntanya);
- Reduir la vulnerabilitat de les infraestructures turístiques davant del possible augment dels esdeveniments hidrològics, geològics i climàtics extrems, i garantir la integritat física dels turistes;
- Reforçar les estratègies i els plans de gestió del medi natural per tal de disminuir la vulnerabilitat dels ecosistemes i de la biodiversitat dels Pirineus, especialment, als ecosistemes sensibles d'alta muntanya (estanyos, glaceres, torberes etc.);
- Garantir una gestió equilibrada dels recursos hídrics al sector turístic, en especial, a les conques alimentades per aigua de pluja;
- Garantir la integritat física de les persones davant els riscos hidrometeorològics i climàtics que puguin

veure's agreujats pel canvi climàtic (crescudes, onades de calor, empitjorament de la qualitat de l'aire i de l'aigua etc.).

Recomanacions

Aquesta secció recull un conjunt de mesures generals adreçades a establir les bases que permetin desenvolupar mecanismes per augmentar la resiliència del sector turístic davant del clima del futur i la seva variabilitat. En tot cas, no existeix una combinació eficaç de mesures preestablertes i vàlides per a totes les destinacions turístiques dels Pirineus, sinó que cada realitat local haurà de dur a terme un estudi minuciós de la seva vulnerabilitat particular i establir les prioritats abans de formular i implantar un conjunt de mesures òptimes en termes d'eficàcia i eficiència (cost/ benefici) per tal d'adaptar-se al canvi climàtic.

Mesures soft³⁹

- Descentralitzar i diversificar l'oferta turística fomentant el turisme de muntanya i de natura i garantir així la sostenibilitat econòmica del sector en funció de l'evolució del clima (promoure la desestacionalització del turisme de muntanya). És important implicar a tots els actors locals en aquest procés.
- Elaborar plans i normes de gestió específiques per preservar o restablir les característiques naturals de les zones turístiques i garantir-ne un bon estat de conservació fins i tot en les condicions climàtiques del futur.
- Emprar els pronòstics estacionals a curt termini per a planificar les activitats de màrqueting a curt termini (UNWTO et al., 2008).
- Garantir la disponibilitat de dades sobre la demanda i el consum turístic dels recursos naturals per tal de garantir la sostenibilitat ambiental del sector.
- Promoure estudis sobre les repercussions dels impactes físics del canvi climàtic en el sector turístic dels Pirineus (per exemple, dur a terme un desenvolupament i seguiment d'indicadors socioeconòmics d'impacte, estudis de percepció del risc per part dels agents socioeconòmics locals implicats).

(39) Les mesures Soft o mesures no estructurals són aquelles mesures que s'apliquen per reduir o pal·liar els efectes negatius del canvi climàtic. Aquesta categoria de mesures està representada pels estudis d'investigació enfocats a donar resposta als buits de coneixement o a enriquir les bases de coneixement sobre el canvi climàtic, el seu impacte i els sectors més vulnerables. Aquesta categoria també engloba el desenvolupament de metodologies i sistemes específics amb l'objectiu de reduir els riscos associats al canvi climàtic (per exemple, el desenvolupament d'un early warning System transfronterer que permeti gestionar les onades de calor al massís pirinenc).

- Readaptar les dates de l'inici i final de la temporada d'esquí.
- Introduir mesures tècniques i de gestió que permetin augmentar l'atractiu turístic de les estacions d'esquí (per exemple, l'esquí nocturn).
- Promoure sistemes de gestió integrada dels recursos turístics al massís per tal d'ajudar a crear les condicions que fomentin unes estades més llargues als territoris per part dels turistes, que englobin tot el territori pirinenc i durant tot l'any.

Mesures verdes⁴⁰

- Garantir el bon estat de conservació dels corredors naturals i la seva adaptació a les condicions climàtiques futures per potenciar la interconnectivitat progressiva dels espais naturals del Pirineus, i garantir d'aquesta manera el bon estat de salut dels ecosistemes de muntanya.
- Intensificar, quan sigui possible, la coberta forestal als voltants de les pistes, per tal d'augmentar la durada de la capa de neu mitjançant un augment de les àrees de pista ombrejades.
- Promoure les mesures d'adaptació verdes per fomentar el manteniment natural del mantell nival (per exemple, promoure un bon estat del mantell d'herba als pendents).

Mesures grises⁴¹

- Potenciar la producció de neu artificial i adoptar les mesures per a mantenir-la (construcció de barreres d'acumulació i de protecció contra el vent) en aquelles estacions i vessants on sigui factible a mig termini des del punt de vista climàtic, viable econòmicament i sostenible des d'un punt de vista ambiental (per exemple, en estacions amb una bona disponibilitat hídrica). És important concentrar els esforços i les inversions en aquesta línia només a les estacions i zones adequades.
- Desenvolupar en les infraestructures turístiques projectades o en remodelació, projectes específics

per garantir una gestió eficient dels recursos hídrics i una producció d'energia autosuficient i oferir rutes turístiques per tal d'explotar el potencial de l'ecoturisme responsable i sensibilitzar els turistes sobre aquestes qüestions.

IDEES CLAU

- El canvi climàtic està disminuint el nombre de dies amb una acumulació de neu suficient per poder desenvolupar amb normalitat les diverses modalitats d'esquí alpí, a més d'una migració a cotes superiors de la línia d'acumulació de la neu.
- La reducció de la capa de neu prevista durant aquest segle afectarà de manera heterogènia a les diferents estacions d'esquí dels Pirineus, en funció de la seva localització, altitud i característiques de gestió.
- La intensificació de riscos naturals provocada per la l'escalfament global podria incidir especialment en algunes destinacions i infraestructures turístiques d'alta muntanya.
- El canvi climàtic podria alterar alguns elements iconogràfics del paisatge dels Pirineus, incidint negativament en el seu atractiu i interès turístic.
- L'extensió de l'estació estival i les temperatures tendencialment més suaus a la primavera i tardor, juntament amb el descens de les temperatures mínimes, podria suposar un increment de l'elecció de destinacions pirinencs en detriment d'altres destinacions menys confortables a causa de les altes temperatures estivals.

(40) Les mesures verdes o basades en els serveis ecosistèmics: aquesta tipologia de mesura inclou totes les mesures, bones pràctiques, estudis o iniciatives que tenen com a principi l'ús dels serveis ecosistèmics procurats pels diferents recursos naturals per pal·liar els efectes negatius del canvi climàtic (per exemple, pràctiques silviculturals conservatives per incrementar la capacitat dels boscos dels Pirineus per reduir els riscos hidrogeològics).

(41) Les mesures grises o infraestructurals, són totes les mesures que basen la seva acció pal·liativa en la construcció o implantació d'elements infraestructurals concrets (com per exemple, la construcció de dics a les zones habitades amb un elevat risc d'inundacions torrencials).

3.2 Cultius agrícoles i agropastoralisme de muntanya

Coordinadors: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC).

Autors: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC).

Coautors: Rosa M. Canals (UPNA, ABA, Grupo Ecología y Medio Ambiente), María Durán (UPNA, ABA, Grupo Ecología y Medio Ambiente), Jordi Puig (Espigall).

3.2.1. Impactes i vulnerabilitats en el sector agrícola

La disminució del període de gelades i l'increment de les temperatures mitjanes podria afavorir l'expansió de cultius no habituals als Pirineus, com els cultius d'àmbit mediterrani o els d'origen subtropical. En canvi, altres cultius principalment de secà podrien veure restringida la seva àrea de distribució potencial a causa d'una major variabilitat en el règim de les precipitacions i l'increment de la temperatura.

A. Desplazamiento de las áreas de idoneidad de los cultivos

La modificació de les condicions climàtiques provocarà molt probablement un desplaçament de les àrees potencialment idònies per al creixement de determinats cultius (Mereu et al., 2008). Si bé l'àrea de distribució potencial de determinades espècies⁴² podria veure's reduïda, com és el cas del blat de moro (Iglesias i Rosenzweig., 2009; Donatelli et al., 2012), altres cultius, com ara el de la vinya o l'olivera, podrien sortir-ne beneficiats (Ponti et al., 2014). Gràcies a l'increment de les temperatures mitjanes i al descens del nombre de dies amb gelades, els cultius especialment sensibles al fred, com la vinya i l'olivera, podrien ampliar la seva àrea de distribució potencial cap a terrenys que es trobin a una major latitud i altitud (Arblaster., 2007; Donatelli et al., 2012; Tanasijevic et al., 2014), on fins ara les condicions climàtiques no ho feien possible.

Pel que fa als Pirineus, i en particular al cultiu de l'olivera, s'estima que es produirà una reducció considerable de les àrees no idònies per al seu cultiu, i una expansió de la superfície potencialment idònia

(42) La distribució potencial d'una espècie és un terme que s'utilitza en els models predictius que fa referència als llocs on potencialment podem trobar una determinada espècie perquè s'hi donen les condicions climàtiques i ambientals necessàries per tal que es pugui desenvolupar de forma correcta.

RESUMEN

L'agricultura i la ramaderia són sectors socioeconòmics clau pel seu elevat valor estratègic, econòmic i territorial a les dues vessants dels Pirineus. Encara que la seva presència és desigual a la serralada, segons les dades disponibles l'agricultura dóna feina al 8,4% de la població activa al vessant francès, i representa un potencial econòmic de més de 500 milions d'euros €, basat principalment en la producció agropecuària (ACAP, 2017).

En canvi aquest sector ocupa a un 0,4% de la població activa a Andorra i representa un total de 12,8 milions d'euros del producte interior brut del país (IEA, 2016). En les pròximes dècades, el canvi climàtic podria influir de manera significativa en la capacitat de producció de les superfícies agrícoles pirinenques, tant pels efectes directes de l'augment de la concentració de CO₂ a l'atmosfera (en positiu) com pel canvi en les condicions climàtiques i mediambientals (bàsicament, en negatiu). Els principals impactes de l'escalfament global sobre l'agroecosistema s'associen a disminucions en la producció a causa d'un major estrès hídric i tèrmic en els cultius, la pèrdua de terres agrícoles a causa de l'increment dels riscos hidrològics, i a un increment del risc de propagació de plagues. D'altra banda, les noves condicions agro-climàtiques podrien propiciar l'expansió d'alguns cultius, de tipus mediterrània, no habituals als Pirineus.

Les pastures de muntanya són un recurs fonamental per al sector i a més generen nombrosos serveis ecosistèmics a la societat (de producció, de manteniment de la biodiversitat, de paisatge, de recursos hídrics de qualitat i embornals de carboni). L'increment de la concentració de CO₂ atmosfèric, el conseqüent increment de la temperatura mitjana de l'aire, així com els canvis en el règim estacional de les precipitacions i la major freqüència i intensitat dels esdeveniments climàtics extrems, afectaran a l'agricultura i a la ramaderia extensiva lligada a l'aprofitament de les pastures de muntanya als Pirineus, provocant impactes de diferent magnitud i fins i tot de diferent signe segons les zones considerades.

i acceptable (Moriondo et al. 2008; Tanasijevic et al., 2014). Concretament, es preveu que zones que actualment no es consideren idònies per al conreu de l'olivera sí ho seran en un futur, i que per contra,

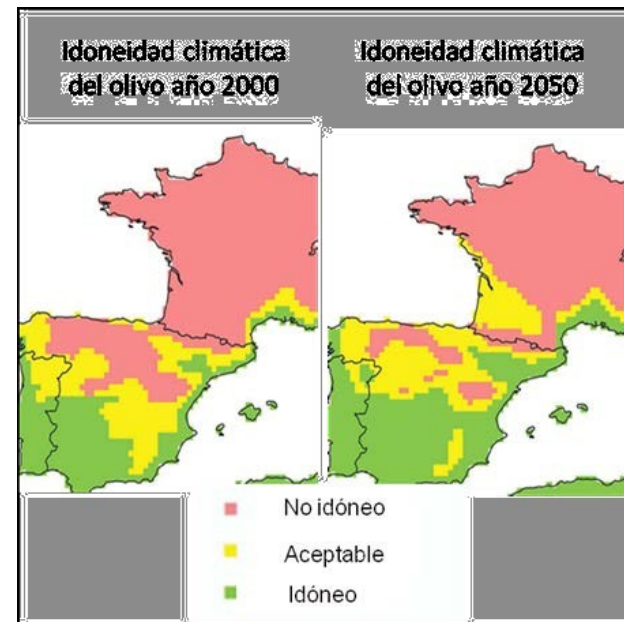


Figura 3.2.1. Estimació de l'evolució de la idoneïtat climàtica per al cultiu de l'olivera en el període 2000-2050 emprant el model ECHAM5 i l'escenari d'emissions A1B. Font: Tanasijevic et al., 2014

zones que avui en dia es consideren aptes, deixaran de ser-ho. No obstant això, no podem oblidar que els esdeveniments extrems, cada vegada més freqüents, com per exemple les gelades tardanes, poden revertir part dels efectes positius anteriorment esmentats, ja que poden afectar les plantes que es troben en un estat de desenvolupament avançat i més vulnerable a les gelades (Trnka et al., 2015). Per aquesta raó els nous cultius de caire mediterrània s'haurien de situar en zones molt favorables i utilitzant varietats de cicle curt i tardà.

B. Canvis en els rendiments dels cultius

El canvi climàtic té efectes positius i negatius en el rendiment dels cultius. Els impactes positius més significatius són l'efecte fertilitzant del CO₂ atmosfèric la prolongació de la temporada de creixement. Els impactes negatius (observats i esperats) més rellevants

són els canvis en la fenologia dels cultius, majors dèficits hídrics i un increment del risc de danys per esdeveniments climàtics extrems.

La capacitat productiva dels cultius agrícoles està fortament condicionada per dos factors: la temperatura i la quantitat d'aigua disponible al sòl. El canvi climàtic influeix directament sobre totes dues variables i pot generar efectes negatius tant en la quantitat com en la qualitat de la producció final. A part dels canvis progressius associats a un increment gradual de les temperatures i una major variabilitat de les precipitacions, els esdeveniments climàtics extrems (onades de calor, sequeres i precipitacions intenses) poden generar impactes que, tot i ser puntuals, afecten molt els cultius. A escala europea, el canvi climàtic es considera un dels principals factors associats a l'estancament del rendiment de determinats cultius clau de cereals, tot i els continus avenços agronòmics (Brisson et al., 2010; Olesen et al., 2011; EEA, 2016). Entre els impactes observats, cal destacar els canvis agrogenològics⁴³ als cultius: l'increment progressiu de les temperatures mitjanes està provocant l'avançament de bona part del calendari agrícola, i en particular, de la data de floració i collita d'un gran nombre de cultius (figura 3.2.2). Si bé és possible contrarestar en part els canvis fenològics a curt termini mitjançant la implantació de pràctiques de gestió agronòmica (com per exemple, avançant de la data de sembra o optar per varietats tardanes), pot ser que aquestes mesures no siguin suficients per garantir els nivells de producció actuals d'un gran nombre de cultius a mig i llarg termini (Trnka et al., 2014) Segons un estudi dut a terme recentment pel Centre Comú d'Investigació de la Comissió Europea (JRC), a l'àrea corresponent al massís pirinenc, la floració del blat s'ha avançat un promig de $0,35 \pm 0,15$ dies per any entre els anys 1985 i 2014, amb diferències significatives en funció de la zona específica considerada. De forma anàloga a la floració, la data de maduració o d'ompliment del gra, i per tant del moment de recol·lecció, s'ha avançat considerablement en els últims trenta anys. Aquest avançament provoca una acceleració considerable del cicle vegetatiu dels cultius. En general, un cicle vegetatiu accelerat es tradueix en un menor rendiment dels cultius, ja que comporta un ús menys eficient de l'energia tèrmica, de la radiació solar i dels recursos hídrics disponibles.

En el cas del sector vitícola, l'avançament de la floració i de la recol·lecció podria provocar una disminució significativa de la producció en certes àrees (Ponti et

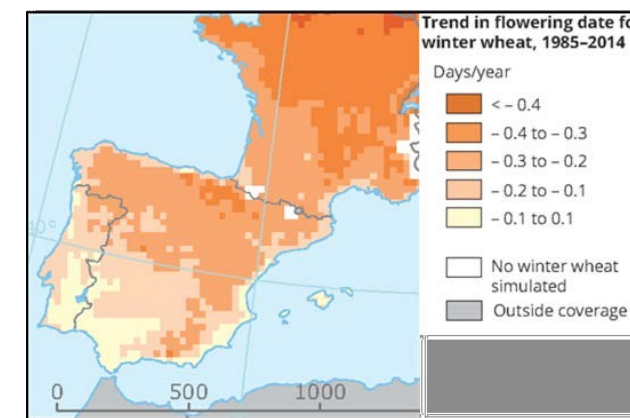


Figura 3.2.2. Estimació de la taxa de canvi de la data de floració del blat d'hivern durant el període 1985-2014, expressada en nombre de dies per any. Font: EEA 2016 de MARS/STAT database

al., 2015). Fraga et al., 2016, han valorat que la data de floració i de recol·lecció del raïm a les dues vessants del pre Pirineu, podria avançar-se 30 ± 10 dies i 40 ± 10 dies respectivament entre els anys 2040-70 respecte al període de 1980-2005. Un dels efectes negatius observats durant les últimes dècades és conseqüència del fet que la maduració primerenca coincideix amb una freqüència cada cop més elevada d'esdeveniments climàtics extrems, com ara les onades de calor i les pluges intenses durant els mesos d'estiu. Aquestes circumstàncies poden afectar el raïm, ja que el fruit absorbeix i perd molta aigua en poc temps. Aquest efecte d'hidratació i dessecació excessiva continuada com a conseqüència d'un excés puntual de calor i aigua provoca sovint el trencament de la pell del fruit i fa que la fruita madura es podreïxi abans de ser collida (Lareboullet et al., 2013). Si bé un augment moderat de la temperatura pot incrementar la productivitat de la vi, també pot alterar la qualitat de la collita i les propietats del producte final (el vi tindrà un grau alcohòlic més elevat). És probable que a mesura que s'intensifiquin els efectes del canvi climàtic, el sector es vegi obligat a modificar progressivament les tècniques de producció i, fins i tot, a substituir les varietats conreades per d'altres que s'adaptin millor a les noves condicions agroclimàtiques, fet que planteja tota una sèrie de problemes per a la producció amb denominació d'origen, la qual es troba lligada a llocs i varietats específiques dels Pirineus.

Un aspecte fonamental per garantir que els cultius creixen correctament és la relació entre la disponibilitat i la demanda d'aigua. La demanda d'aigua dels cultius es defineix com l'aigua necessària durant la temporada de creixement per tal que els cultius es desenvolupin correctament. Aquesta varia significativament entre els diferents tipus de cultiu i en funció del moment de l'estació de creixement. L'augment de la variabilitat en el règim de les precipitacions i en la freqüència i intensitat de les sequeres està provocant un desequilibri entre la creixent demanda hídrica dels cultius i la cada cop menor disponibilitat d'aigua al sòl, fet que origina el que en termes agronòmics es defineix com dèficit hídric dels cultius (Felten et al., 2011).

Finalment, com impactes previstos, si bé no es disposa de projeccions específiques per al massís pirinenc sobre l'evolució de l'agrogenologia, és molt probable que el període vegetatiu de molts cultius s'acceleri de forma gradual a mesura que augmentin les temperatures (Savé et al., 2012; Ponti et al., 2015) i que això afecti negativament el rendiment i la qualitat final dels fruits i del gra (Olesen et al., 2012; Ferrise et al., 2013; Funes et al., 2015; Fraga et al., 2016).

Pel que fa a l'evolució projectada del dèficit hídric dels cultius, el canvi previst en el règim estacional de les precipitacions, l'augment en la freqüència i intensitat de les sequeres i les onades de calor, i l'augment de les taxes d'evapotranspiració potencial (García-Ruiz, 2011), generaran molt probablement una major variabilitat interanual en la disponibilitat de recursos hídrics, que al seu torn provocarà un increment de les situacions de dèficit hídric en determinades zones i en certs cultius del massís (Figura 3.2.3).

L'augment del dèficit hídric incidirà directament en la productivitat i qualitat dels cultius de secà, i indirectament, en els cultius de regadiu, ja qu'augmentaran les necessitats de reg (Ciscar et al., 2013). Aquest desequilibri entre la disponibilitat i la demanda hídrica en certs períodes de l'any pot augmentar el risc que es produeixin certs conflictes entre els sectors amb una forta demanda hídrica. D'acord amb els models emprats pel JRC, el dèficit hídric del cultiu de blat de moro serà especialment elevat a l'extrem oriental nord i occidental sud del massís. No obstant això, el valor d'aquest increment variarà notablement en funció dels cultius, regions i vessants del massís pirinenc, per la qual cosa serà necessari dur a terme estudis més detallats i amb una major resolució per tal de poder dissenyar i implantar les mesures d'adaptació més adequades en cada cas.

(43) Els canvis agrogenològics fan referència als canvis en el cicle anual dels cultius en relació als factors climàtics.

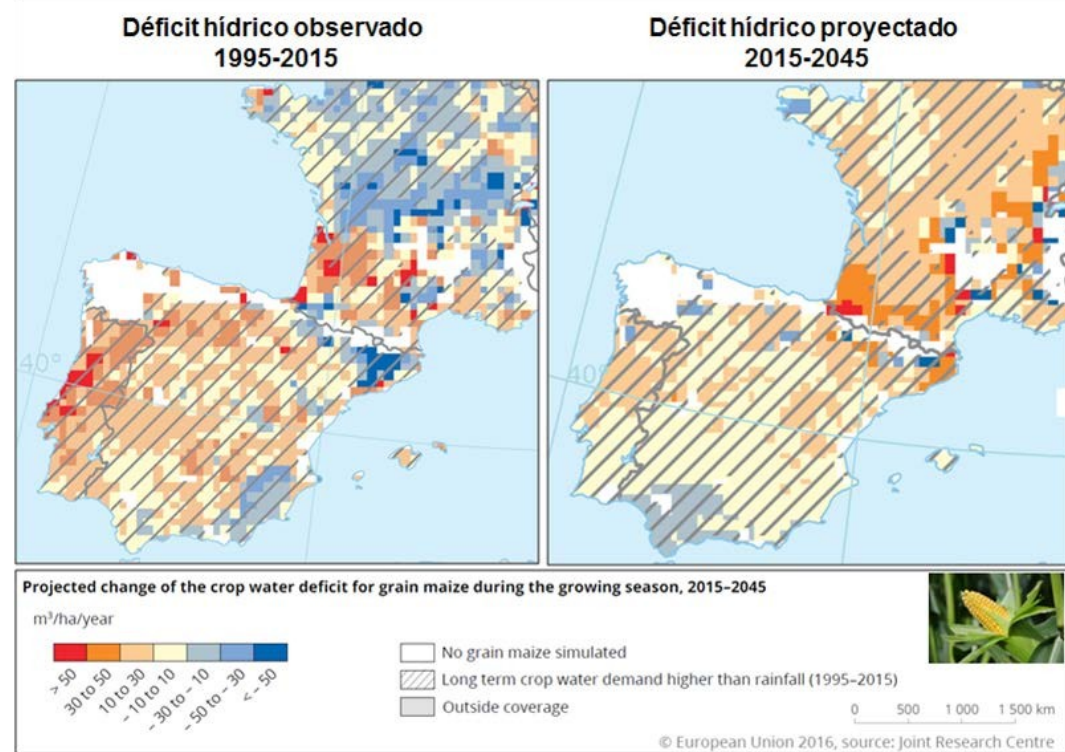


Figura 3.2.3. Estimació del dèficit hídric observat (esquerra) i projectat (dreta) per al cultiu del blat de moro en funció del model climàtic de circulació global MIROC. Les simulacions es van dur a terme amb el model agroclimàtic WOFOST per a l'escenari d'emissions RCP 8.5. El color vermell indica un augment del dèficit hídric i el color blau indica una reducció d'aquest dèficit. Les àrees on la demanda d'aigua dels cultius supera de forma regular la disponibilitat d'aigua es marquen amb ratlles transversals. Font: JRC 2016.

Pel que fa a l'impacte dels esdeveniments climàtics extrems, aquests poden provocar danys significatius als cultius i pèrdues considerables de la producció. S'estima que les pèrdues en les collites de cereals provocades per les onades de calor estivals dels anys 2003 i 2010, van arribar al 20% de la collita total a les regions europees afectades. En molts casos, els períodes més calorosos coincideixen també amb períodes de sequera, de manera que es genera un efecte sinèrgic negatiu. Així mateix, s'ha estimat que durant l'estació de cultiu 2004/2005, la producció de cereals a la Península Ibèrica va disminuir de mitjana al voltant del 40% respecte a la mitjana d'altres anys (IPCC, 2014). Finalment, el possible augment dels riscos naturals induïts o intensificats pel canvi climàtic (ensorraments, esclavissades de terra, crescudes d'aigua, etc.) pot afectar negativament les terres agrícoles situades a cotes

mitjanes com a conseqüència de la intensificació dels fenòmens erosius i de la pèrdua de sòl agrícola. A més a més, la major incidència i extensió dels incendis forestals projectats per a les pròximes dècades (Giannakopoulos, et al., 2009) pot provocar un augment temporal de la superfície de sòl que no disposa d'una cobertura vegetal, fet que incrementa també l'exposició de les capes superficials a l'erosió hídrica. D'altra banda, una atmosfera més calenta pot provocar una acceleració del procés de mineralització de la matèria orgànica del sòl⁴⁴ i intensificar encara més la problemàtica associada a la pèrdua de sòl. En aquest sentit, és molt probable que una major freqüència de les pluges torrencials intensifiqui els fenòmens de pèrdua de sòl, sobretot dels sòls arables amb escassa vegetació i pobres en matèria orgànica, ja de per si vulnerables a l'erosió hídrica (Olesen et al., 2007; Jones et al., 2012; Panagos et al., 2015).

(44) La mineralització es pot definir com el procés de conversió de la matèria orgànica del sòl (MOS) en matèria inorgànica. Un sòl ric en matèria orgànica té una millor estructura i, entre altres avantatges, és més resistent als processos erosius. Un sòl empobrit en matèria orgànica és generalment més vulnerable als processos erosius.

L'estació de creixement tèrmic és un indicador agroecològic que reflecteix en quins llocs i en quin moment es poden conrear potencialment els diferents cultius, considerant que disposen del sòl adequat, i de suficient aigua i radiació solar. La prolongació de l'estació de creixement reflecteix la durada del període durant el qual la temperatura supera un cert llindar i a partir del qual els cultius poden créixer correctament. La durada de l'estació sense gelades es considera el període més favorable per a que creixin la majoria de plantes i cultius, i d'aquest calendari depenen els moments clau en el cicle vital dels diferents cultius, com la floració o el període d'ompliment del fruit. En les últimes dècades s'ha allargat el període comprès entre les últimes gelades de primavera i les primeres gelades de tardor, cosa que es tradueix en un augment dels dies sense gelades a tot Europa (Brázdil, et al., 2011). Pel que fa als Pirineus, s'ha estimat que el nombre de dies amb gelades ha disminuït al voltant de $-0,4 \pm 0,2$ dies per dècada durant el període comprès entre els anys 1985 i 2014 (ESPO project, 2013; EEA, 2016 veure les dades copernicus). A les zones de cultiu dels Pirineus, on les baixes temperatures i les oscil·lacions tèrmiques són el principal factor limitant, l'augment de les temperatures mínimes durant l'estació hivernal i l'inici de la primavera podria provocar un increment de la producció dels cultius més sensibles al fred.

No obstant això, en determinats cultius, aquestes variacions podrien provocar fins i tot més danys que beneficis, ja que unes temperatures mínimes més elevades podrien bloquejar el desenvolupament dels mecanismes de protecció natural de les plantes contra el fred (Maracchi., 2004). Sense aquestes eines naturals, les gelades tardanes puntuals, cada vegada més freqüents, podrien generar pèrdues importants, especialment en els cultius que s'hagin desenvolupat de forma prematura. Pel que fa a l'efecte de l'augment de la concentració de CO₂ atmosfèric, s'ha constatat experimentalment que un increment en la concentració de diòxid de carboni estimula el creixement i la producció dels cultius i permet un ús més eficient de l'aigua a causa de la disminució de la conductància estomàtica⁴⁵. Com més elevada és la concentració de CO₂, més alta és la taxa

fotosintètica i major la capacitat de la planta per créixer i fixar el carboni atmosfèric (Ainsworth i Long., 2005). No obstant això, aquest augment no serà lineal, i no tots els cultius reaccionaran de la mateixa manera, ja que el seu comportament varia en funció del tipus de metabolisme. Els cultius amb un metabolisme de tipus C346 (gra, arròs, alfals, soja i gran part de les plantes de fruit), responen millor a l'augment de la concentració de CO₂ que les plantes amb un metabolisme tipus C447 (blat de moro, mill, melca, etc.), ja que aquestes últimes ja disposen d'un procés fotosintètic molt eficient, i per tant, responen de manera menys significativa a l'augment de la concentració de CO₂ atmosfèric (Long et al. 2006; Yano et al., 2007).

Alguns autors han estimat que, de mitjana i en absència de factors d'estress biòtic i abiòtic, per a una concentració de CO₂ atmosfèric de 550 ppm (403,64 ppm el mes de novembre de l'any 2017) es podria assolir un increment de la productivitat dels cultius que oscil·laria entre el 10 i el 20% per a les plantes C3 i entre el 0 i el 10% per a les plantes C4 (Gifford, 2004; Long et al., 2004). Altres autors suggereixen que en el cas del blat, l'efecte fertilitzant associat a l'augment de la concentració de CO₂ a l'atmosfera podria fins i tot contrarestar els efectes negatius induïts per l'estress hídric (Manderscheid i Weigel, 2007). De fet, independentment de la tipologia de planta (C3 o C4), l'augment en la concentració de CO₂ induïx el tancament parcial dels estomes de les fulles, i redueix així el consum d'aigua per transpiració, sense que aquest efecte influeixi en el procés de fotosíntesi, i en conseqüència, en la taxa de productivitat (Bernacchi et al., 2007; Kruijt et al., 2018; Arellano et al., 2012). No obstant això, cal subratllar que el possible efecte fertilitzant associat a l'augment de la concentració de CO₂ es veurà fortament limitat i condicionat, a part de per una menor disponibilitat hídrica, per altres factors limitants directament relacionats amb el canvi climàtic, com ara la menor presència i disponibilitat de carboni orgànic al sòl, una freqüència i intensitat més elevada dels esdeveniments climàtics extrems i un augment de la difusió de paràsits i d'altres organismes nocius. D'altra banda, l'assimilació d'elevades concentracions de CO₂ per part de la majoria dels cultius provoca canvis

(45) La conductància estomàtica és un paràmetre de proporcionalitat que relaciona el flux d'aigua transpirada a través dels estomes amb la força motora dels aquests.

(46) Les plantes amb un metabolisme C3 només duen a terme una fotosíntesi eficient a temperatures moderades (amb una eficiència màxima a 20 °C), ja que els estomes es troben oberts durant les hores diürnes i una temperatura excessiva provoca un augment de la transpiració de la planta a través de les fulles. S'anomenen plantes C3 perquè el primer compost orgànic produït mitjançant la fotosíntesi és una cadena carbònica amb tres àtoms de carboni, el 3-fosfogliceraldehid o gliceraldehid 3-fosfat.

(47) Es defineixen com a plantes C4 algunes espècies característiques de climes àrids, com ara el blat de moro o la melca, que utilitzen una via diferent i més eficient que les plantes C3 per fixar el carboni atmosfèric, i que per tant, fan un ús més eficient de l'aigua en la fase de fixació del carboni.

en la seva composició mitjançant la modificació del contingut (ràtio) carboni-nitrogen del gra, cosa que afecta principalment la productivitat i la qualitat (Makowski et al., 2015). En vista als múltiples factors en joc i a la complexitat de les possibles interaccions entre aquests factors, caldrà fomentar el desenvolupament d'estudis centrats en el disseny i implantació de models dinàmics de simulació per tal d'obtenir una valoració més exhaustiva dels hipotètics efectes positius d'una concentració més elevada de CO₂ en els diferents cultius d'interès als Pirineus.

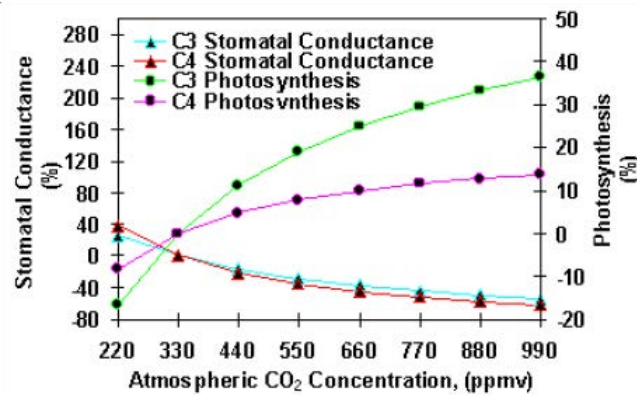


Figura 3.2.4. Corba d'increment de l'eficiència fotosintètica i disminució de la conductància estomàtica a les plantes amb un metabolisme C3 i C4, en funció de la concentració de CO₂ a l'aire. Font: AVEMAC project; JRC., 2012

C. Expansió de plagues i malalties agrícoles

Les interaccions entre les plantes i els seus enemics naturals es veuen influenciades per les condicions ambientals i les temperatures. L'eventual modificació de les àrees de distribució d'alguns cultius, en sinergia amb el canvi previst en les condicions d'humitat del sòl i de les temperatures mitjanes, poden propiciar una variació dels patrons de distribució i difusió de les fitopaties actuals en els principals cultius dels Pirineus, així com un augment del risc de propagació de les fitopaties emergents (Luck et al., 2011). Hi ha tres mecanismes principals pels quals el canvi climàtic influeix en la propagació i aparició de noves plagues.

D'una banda, les noves condicions climàtico-ambientals poden facilitar el desenvolupament de determinats organismes nocius durant certs períodes de l'any. En particular, els insectes són individus ectotèrmics⁴⁸, que responen ràpidament als canvis en la temperatura ambiental. En conseqüència, la distribució, desenvolupament i reproducció de les diferents espècies d'insectes està estretament relacionada amb les temperatures. A les regions boreals i alpines d'Europa s'han descrit ja fenòmens de multivoltinisme⁴⁹ en insectes relacionats amb el canvi climàtic, que estan afectant el rendiment de cultius i ocasionant defoliacions severes en masses forestals (Dalin et al., 2012; Stoeckli et al., 2012; Klapwijk et al., 2013). En el cas dels microorganismes patògens, les condicions de canvi poden estar afavorint a algunes espècies en períodes de l'any en què anteriorment el seu desenvolupament es veia limitat per les baixes temperatures. Un exemple característic d'aquest fet és el *Colletotrichum coccodes*, un fong que afecta greument el cultiu de la patata (antracnosi de la patata) i que en moltes regions d'Europa i també al sud de França i nord d'Espanya està substituint com a conseqüència de la importància i la magnitud del seu efecte negatiu al *Rhizoctonia solani*, un altre fong que provoca que les patates es podreixin (Manici i Caputo., 2009; Garibaldi i Guillino, 2010).

En segon lloc, pot ser que les noves condicions climàtiques generin zones climàticament idònies per a l'expansió de nous organismes nocius introduïts accidentalment des de zones més càlides, que es podrien propagar ràpidament com a conseqüència de la manca de competidors i predadors naturals. És

(48) Ectotèrmia és un terme modern que fa referència a l'estratègia de molts éssers vius per optimitzar la seva temperatura corporal, antigament coneguda com a pecilotèrmia i que s'aplica a certs animals amb una temperatura corporal variable (molt incorrectament agrupats com a animals de sang freda o pecilotèrmes). L'ectotèrmia també és un sistema de regulació del ritme metabòlic.

(49) El fenomen del multivoltinisme es refereix a espècies que completen més d'un cicle vital en el transcurs d'un any.

ENQUADRAMENT 3.2.1 ESTUDI SOBRE L'ADAPTACIÓ AL CANVI CLIMÀTIC DEL SECTOR AGRÍCOLA DE L'ALT PIRINEU I LA VALL D'ARAN: UNA ESTIMACIÓ ECONÒMICA

L'estudi Adaptació al canvi climàtic del sector agrícola de l'Alt Pirineu i la Vall d'Aran: riscos i oportunitats analitza les implicacions del canvi climàtic en l'agricultura d'aquest territori a partir d'una modelització climàtica d'implantació de cultius i compara l'escenari actual amb un escenari futur (2030-2050).

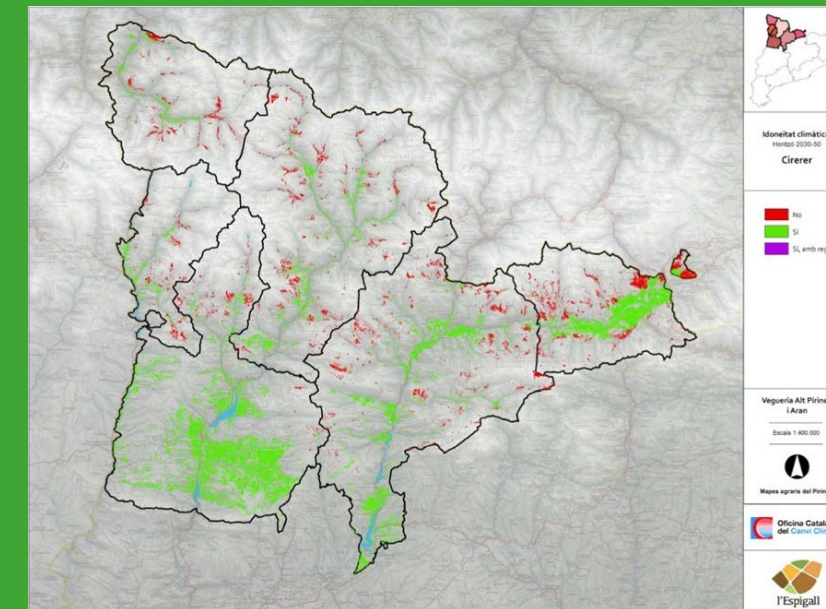


Figura 3.2.5. Mapa de idoneïtat climàtica projectada per a cultius de cereals en el Alt Pirineu i la Vall d'Aran per l'escenari 2030-50, comparant amb la idoneïtat climàtica actual. Font: 2020, 2017

L'estudi conclou que, en el futur, el canvi climàtic farà penetrar el clima mediterrani sec cap a les valls ara frescals d'aquesta zona dels Pirineus. Els hiverns seran menys freds i disminuiran els dies en què es produiran gelades. Per contra, els estius seran més llargs, calorosos i secs. En conseqüència, els cultius de tipologia mediterrània (vinya, olivera, cereals...) i determinats fruiters que necessiten poca aigua seran els que millor s'adaptaran a aquestes condicions i certs cultius tradicionals de secà, com ara la patata, patiran una forta regressió. En canvi, cultius de nova implantació, com la pomera o la perera, estan destinats a fer-se un lloc en els espais de regadiu i competir amb el farratge, l'horta o altres productes amb un major valor afegit.

L'estudi estima que els ingressos bruts del sector agrícola en aquesta zona dels Pirineus, que avui en dia són de 84,3 M € a l'any, poden disminuir un 8,9 % en l'escenari 2030-50. Els autors argumenten que les estratègies per limitar aquests impactes haurien de centrar-se en les zones de secà, ja que la resiliència d'aquestes zones a la sequera és molt més limitada que la dels conreus de regadiu. Els autors proposen dur a terme un canvi d'enfocament productiu que comporta modificar l'actual agricultura destinada a l'alimentació animal, per una agricultura orientada a l'alimentació humana. Concretament, els autors proposen com a principal línia d'actuació, augmentar l'extensió de pastures extensives als prats alpins i les zones no agrícoles de les valls. Això permetria reduir la pressió actual sobre el sòl agrícola i revertir alhora la tendència actual d'avanç dels boscos a zones de pastura i la pèrdua de biodiversitat que comporta. Aquesta expansió de les pastures extensives es traduiria en l'alliberament de 26.103 ha de superfície agrícola, que podria destinar-se a cultius per a l'alimentació humana tenint en compte el màxim rendiment econòmic i el mínim consum d'aigua. Els autors proposen integrar 10 cultius per al consum humà en les àrees alliberades, en funció dels criteris d'idoneïtat climàtica present i futura (pomera, perera, cirerer, fèsols, vinya, olivera, sègol, espelta, patata i mongetes). Amb aquesta solució, els autors estimen que els ingressos bruts del sector agrícola en l'escenari futur podrien ascendir als 181,1 M € anuals en comparació amb els 84,3 M € actuals o dels 76,7 M € previstos per a aquest escenari futur si no es duu a terme cap tipus d'actuació. Aquest estudi ha estat publicat per l'Oficina Catalana del Canvi Climàtic, en el marc del projecte Life MEDACC i amb la col·laboració de l'empresa l'Espigall.

El canvi climàtic és doncs un factor d'estrès afegit capaç d'actuar en sinergia amb els canvis d'ús del sòl i l'abandonament progressiu de l'agricultura y ramaderia extensiva d'alta muntanya (Busqué et al., 2016).

En aquest context, les interaccions que es produeixen entre el clima, els usos del sòl i la gestió de les pastures adquireixen una gran importància. El fet d'implantar accions senzilles d'adaptació a l'hora de gestionar les pastures, com ara modificar el calendari de pasturatge o la temporada de tall del farratge, pot fer possible compensar, com a mínim temporalment, part dels possibles efectes negatius observats.

3.2.3. Sector ramader extensiu: impactes i vulnerabilitats

El canvi climàtic també afecta la producció ramadera, de forma tant directa com indirecta. D'una banda, els canvis en la temperatura i la humitat tenen una influència directa en l'estat de salut i el rendiment animal. D'altra banda, les temperatures elevades i els extrems climàtics poden afectar indirectament a la producció animal, com a conseqüència d'una menor disponibilitat i qualitat de les pastures. A més a més, les noves condicions climàtiques podrien afavorir una major difusió i prevalença de malalties del bestiar (Heffernan et al., 2012; Gauly et al., 2013), incloent les malalties transmeses per vectors (Estrada-Peña et al., 2012).

A. Reducció del benestar animal i de la producció ramadera

La capacitat del bestiar per mantenir-se en bon estat de salut depèn directament de les característiques de l'ambient on viuen (Lacetera et al., 2013). Cada espècie té un interval de temperatura ambiental òptim, definit com la zona de neutralitat tèrmica⁵². Quan la temperatura ambiental supera la zona de neutralitat, els animals reaccionen activant una sèrie de mecanismes fisiològics que es tradueixen en un augment de la freqüència respiratòria, de la sudoració i del consum d'aigua per tal de contrarestar l'augment de la temperatura corporal (Fregley, 1996; Bernabucci et al. 2010). Quan se sotmet els animals a un estrès tèrmic, aquests redueixen també el consum d'aliments i l'activitat metabòlica, cosa que afecta directament el seu estat de nutrició i rendiment reproductiu (Roy i Prakash, 2007; Mader, 2007) i, en general, la seva salut i benestar. Si les condicions d'estrès tèrmic es perllonguen durant períodes llargs de temps, augmenta fins i tot el risc que l'animal mori (Nardone et al., 2010). El THI⁵³ (Temperature Humidity Index en anglès) és un indicador de l'estrès tèrmic que combina valors de temperatura i humitat ambiental. En les últimes dècades, aquest índex ha augmentat el seu valor a tot Europa i ha provocat un impacte negatiu en la ramaderia (Vitali et al., 2008).

ENQUADRAMENT 3.2.2 PROJECTE "ALPAGES SENTINELLES ALPINS": XARXA D'ACTORS PER PRESERVAR LA BIODIVERSITAT I LA SALUT DE LES PASTURES D'ALTA MUNTANYA DAVANT DELS REPTES QUE PLANTEJA EL CANVI CLIMÀTIC

Arran de les successives onades de calor i de la creixent preocupació sobre l'impacte del canvi climàtic en les pastures d'alta muntanya, el Parc Nacional des Écrins, situat als Alps francesos, va decidir reunir la seva Comissió d'Agricultura per fer front a aquesta problemàtica. Conscients de la multifuncionalitat d'aquests ecosistemes d'alt valor paisatgístic, ecològic i cultural, així com de l'interès comú per limitar els efectes negatius del canvi climàtic sobre aquests ecosistemes, va crear un grup de treball transversal que va implicar els ramaders locals, els gestors dels espais protegits, els gestors de les explotacions ramaderes, les autoritats dels municipis interessats i la comunitat científica. Gràcies a la posició privilegiada del Parc Nacional des Écrins per desenvolupar i dur a terme un seguiment de les iniciatives de disseny i implantació d'accions adaptatives, els actors implicats van crear de manera col·lectiva la xarxa de "Pastures sentinella de muntanya". El programa, cofinançat amb fons FEDER, té com a objectiu millorar la comprensió sobre la dinàmica futura dels espais agropastorals d'alta muntanya en el context del canvi climàtic i anticipar-se així als possibles efectes negatius. Entre les accions específiques que promou aquesta iniciativa, destaquen:

- la creació d'una xarxa d'observació de l'evolució climàtica a les diferents parcel·les d'estudi
- la definició de protocols robustos i comuns per valorar els efectes del canvi climàtic a les pastures d'alta muntanya
- la creació i dinamització d'un espai de diàleg continu entre els diferents actors implicats en el projecte

El programa, que s'inicià l'any 2011, s'ha ampliat a altres àrees protegides (Parc Nacional de Vanoise i Mercantour, Vercors, Charteruse, Lubéron i Ventoux). Avui en dia, la xarxa disposa d'una trentena de pastures sentinella que formen part de 37 explotacions ramaderes de 7 territoris alpins. La iniciativa està coordinada per IRSTEA i hi participen socis científics, gerents d'àrees protegides, pastors i representants del sector agrícola. L'any 2018, gràcies a la cooperació entre els actors i els territoris, es publicarà una guia metodològica per avaluar l'exposició i la sensibilitat de les pastures de muntanya als riscos climàtics, així com un conjunt de fitxes tècniques per dur a terme una "gestió a prova de clima" dels agroecosistemes d'alta muntanya.

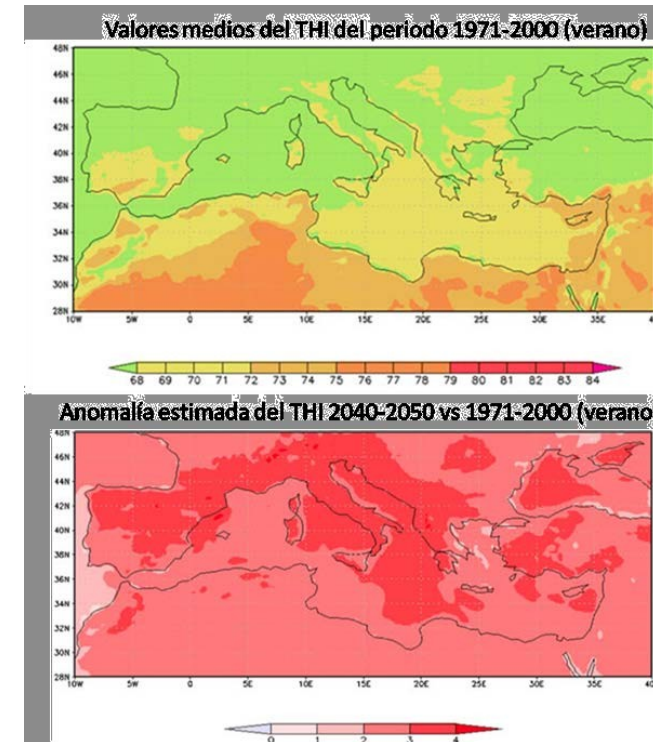


Figura 3.2.8. Valors mitjans de l'índex THI durant el període comprès entre els anys 1971-2000 (a dalt) i anomalia estimada del valor de THI per a la dècada 2040-2050. Font: Segnalini et al., 2012.

B. Noves zoonosis i difusió de malalties del bestiar

D'altra banda, el canvi climàtic també es considera com un dels factors implicats en l'augment de la propagació i transmissió d'organismes que provoquen malalties i dels seus vectors de difusió, en sincronia amb la major mobilitat de béns i persones (Patz i Olson, 2006). De fet, gran part dels insectes vectors de malalties i especialment els del phylum dels artròpodes, són molt sensibles a factors climàtics com la temperatura i la

humitat, factors que determinen de forma decisiva la presència, densitat i comportament d'aquests insectes. En conseqüència, és molt probable que l'augment previst en les temperatures mitjanes amplii també l'àrea de distribució de determinats vectors de malalties ja presents al territori del Massís, on les condicions climàtiques s'han adequat als seus cicles biològics, i que faciliti també la importació, implantació i expansió de nous organismes patògens (Iriso et al., 2017).

Un exemple d'aquesta problemàtica és l'expansió cap a latituds més elevades de la incidència de la malaltia de la llengua blava⁵⁴ del bestiar. Es tracta d'una malaltia vírica transmesa per un insecte vector del gènere *Culicoides* (una espècie de mosca considerada com el principal vector de transmissió de la malaltia), que actua com a reservori i transmissor del virus. Fins fa poques dècades, aquest virus no es podia trobar a Europa. L'any 1998 es va produir una epidèmia que va introduir el virus des del continent africà al continent europeu (FAO, 2006). Mitjançant el seu vector, el virus ha anat expandint-se progressivament cap a latituds més elevades. De fet, els casos d'infecció per aquest virus són cada vegada més freqüents al vessant nord del Massís (Jacquet et al., 2016), i és molt probable que la difusió d'aquest virus augmenti en el futur (Bonizzoni et al., 2013). La seva expansió s'associa a factors climàtics, i principalment, a la major supervivència de la mosca vector gràcies a uns hiverns més càlids i als canvis en el règim dels vents que transporten les mosques portadores (Jacquet et al., 2016), induïts en part pel canvi climàtic (Mardulyn et al., 2013).

Un altre exemple significatiu és la paparra comuna del bestiar. Les paparres són vectors transmissors de bacteris, protozous i virus que provoquen malalties com ara la borreliosis de Lyme, la febre botonosa mediterrània, el virus de la febre hemorràgica de Crimea-Congo i el virus de l'encefalitis. Les paparres passen la major part del seu cicle de vida en el medi, de manera que el seu desenvolupament, supervivència i

(52) La zona de neutralitat tèrmica del bestiar és l'interval de temperatures en les quals l'animal no lluita ni contra el fred ni contra la calor, de manera que l'energia disponible per al creixement és màxima.

(53) El THI és un indicador que s'empra des de principis dels anys 90 per mesurar l'efecte combinat de la temperatura ambiental i la humitat relativa en l'estat de salut del bestiar. Permet calcular de manera senzilla i intuïtiva els nivells de risc del bestiar associats a l'estrès tèrmic, en funció de l'evolució de les condicions ambientals. Quan el valor del THI supera les 72 unitats, el bestiar oví comença a experimentar estrès per calor i es comença a alterar la seva taxa de productivitat. Quan el valor del THI supera els 78 punts, la producció de llet es veu seriosament afectada. Quan el THI supera els 82 punts, existeix el risc que es produeixin pèrdues molt significatives en la producció i el bestiar mostra signes d'estrès greu i fins i tot pot morir.

(54) La malaltia de la llengua blava és una malaltia vírica dels rumugants no contagiosa i no és una zoonosi. Els vectors són els insectes del gènere *Culicoides*. Oficialment és una malaltia animal de declaració obligatòria i es pot trobar en la llista A de l'OIE. Afecta principalment als ovins domèstics i amb menys freqüència als bovins, als caprins, als cervols, als dromedaris i als antílops. Aquesta malaltia la causa el virus de la llengua blava (Bluetongue virus, BTV).

dinàmica poblacional depèn d'un conjunt de factors, entre els quals hi trobem la influència del canvi climàtic, ja que aquest influeix en les temperatures mitjanes i mínimes, en les alteracions del cicle hidrològic (Randolph et al., 2008) i en la modificació de la distribució dels seus hostes principals (Léger et al., 2013; Williams et al., 2015). En conseqüència, és molt probable que el canvi climàtic provoqui canvis en la distribució i densitat de les poblacions d'insectes vectors com les paparres, així com en el risc de transmissió dels patògens que allotgen. No hem d'oblidar, però que la resposta d'aquests artròpodes no dependrà exclusivament de l'evolució dels factors climàtics, sinó que també estarà condicionada en gran part per altres factors no climàtics, com ara l'evolució de les poblacions dels seus hostes principals als Pirineus (fonamentalment, els grans vertebrats), i per la modificació i fragmentació del paisatge, entre d'altres.

D'acord amb les principals investigacions i malgrat les incerteses inherents a les projeccions climàtiques futures, és necessari tenir en compte la informació sobre la vulnerabilitat del sector ramader al canvi climàtic a l'hora de planificar les inversions i en els instruments de finançament actuals del sector (per exemple, el Fons de Desenvolupament Rural), per tal d'augmentar la resiliència als reptes climàtics, i que aquests no es afegeixin més pressió als diferents reptes socioeconòmics que afecten ja avui en dia aquest sector.

De fet, tot i que el canvi climàtic es posiciona com un gran repte per al sector, és molt probable que els factors i barreres socioeconòmiques que afecten l'agropastoralisme dels Pirineus (globalització, fluctuació dels preus, abandonament de l'activitat, falta de renovació generacional, dependència de les subvencions, costos més elevats de producció i de les inversions necessàries, etc.) continuaran sent en el futur la principal causa de vulnerabilitat (Leclère et al., 2013; Busqué et al., 2016; Canals, 2018). Per aquest motiu, i per tal de garantir que les possibles mesures d'adaptació de l'agropastoralisme siguin eficaces i eficients, cal que es concebin i es dissenyin tenint en compte els possibles escenaris futurs de canvi global, situació en què el canvi climàtic es posiciona com un estrès afegit capaç d'agreujar la magnitud dels reptes actuals.

3.2.4. Conclusions i recomanacions

La productivitat dels sistemes agrícoles depèn de forma crítica de diversos factors, entre els quals hi trobem les condicions climàtiques. En general, l'efecte del canvi climàtic en la productivitat agrícola es pot resumir com el resultat de les interaccions entre l'augment de la concentració de CO₂ atmosfèric, la

variació de la durada de l'estació de creixement, els canvis en la disponibilitat dels recursos hídrics, i la propagació o la proliferació de plagues i malalties.

És d'esperar que el canvi climàtic afecti negativament la productivitat d'un gran nombre de cultius agrícoles, així com la producció ramadera: els efectes negatius que provoca o intensifica el canvi climàtic, com ara un augment en la difusió de les plagues i organismes patògens, la major freqüència i intensitat d'esdeveniments climàtics extrems, i la progressiva disminució de la qualitat dels cultius, farratge i productes derivats, podrien comportar seriosos reptes al sector durant els pròxims anys.

De moment, en les pastures de muntanya, els efectes del canvi d'usos del sòl (abandonament de la ramaderia extensiva, manca de recanvi generacional entre altres raons socioeconòmiques) estan tenint efectes més importants i evidents que els efectes potencials associats al canvi climàtic. Per això, les investigacions sobre agropastoralisme de muntanya als Pirineus s'han centrat en l'estudi de l'abandonament d'usos i no tant en els efectes observats i previstos del canvi climàtic. Si bé les estratègies d'adaptació a curt termini poden basar-se en pràctiques agrícoles relativament senzilles relacionades amb canvis en les dates de sembra o de les varietats conreades, a llarg termini aquestes mesures podrien no ser suficients. En aquest sentit, és essencial donar resposta als buits de coneixement existents sobre l'impacte del canvi climàtic en els principals cultius i agro-ecosistemes de muntanya. També serà de vital importància oferir suport als agricultors i ramaders en el procés d'adaptació per tal d'augmentar la resiliència del teixit agropastoral del massís pirinenc davant dels reptes climàtics. A continuació presentem de manera sintètica i no exhaustiva els principals reptes que afecten i afectaran el sector agrícola del massís pirinenc en els propers decennis, així com algunes recomanacions per dur a terme el procés d'adaptació.

Les recomanacions d'adaptació es presenten en funció de tres tipologies d'intervenció o mesura d'adaptació: mesures verdes, grises i toves.

Reptes principals

- Reduir les incerteses sobre els riscos més importants, els possibles efectes negatius i la pressió futura sobre el sector primari, agrícola i ramader dels Pirineus;
- Augmentar la resiliència dels cultius agrícoles y els

sistemes agropastorals de muntanya per poder fer front a la pressió del canvi climàtic i als canvis d'usos del sòl;

- Promoure una gestió conservativa dels sòls per tal d'augmentar-ne la fertilitat natural i maximitzar el seu paper com a embornal de carboni
- Afavorir l'adopció de mesures de gestió que garanteixin un ús sostenible dels recursos hídrics en el marc d'una gestió integral dels recursos.
- Fomentar la implantació de sistemes de vigilància d'organismes patògens i malalties emergents del bestiar i dels cultius
- Limitar l'abandonament del sector e incentivar la diversificació i la modernització de les explotacions des d'una perspectiva de sostenibilitat.

Recomanacions

Aquesta secció recull un conjunt de propostes adreçades a establir les bases que permetin desenvolupar mecanismes per augmentar la resiliència del sector primari davant del clima del futur i la seva variabilitat. En tot cas, no existeix una combinació eficaç de mesures preestablertes i vàlides per a tots els sistemes agrícoles i ramaders dels Pirineus. La gran heterogeneïtat espacial i microclimàtica, així com l'elevada diversitat de situacions i esquemes socioeconòmics del sector al massís pirinenc, fan que sigui necessari dur a terme un estudi de vulnerabilitat específic per a cada realitat local. Només d'aquesta manera és possible establir un procés d'identificació de les prioritats d'adaptació que permeti formular un conjunt de mesures d'adaptació al canvi global factibles des del punt de vista de la implantació, i òptimes en termes d'eficàcia i eficiència (costos/beneficis).

Mesures soft ⁵⁵

- Desenvolupar grups de treball multidisciplinaris, transfronterers i estables a llarg termini, integrats pels representants de tots els grups d'interès

(ramaders, propietaris d'explotacions, autoritats locals, científics etc ...), que orientin el debat sobre els efectes del canvi climàtic i de usos del sol en el sector mitjançant models participatius d'observació.

- Promoure projectes sobre models agro-sistèmics que integrin les projeccions climàtiques regionalitzades sobre la variabilitat climàtica futura, per tal d'avaluar el possible impacte del canvi climàtic en la producció agrícola, agropecuària i en les pastures d'alta muntanya (qualitat dels productes finals, evolució de les àrees idònies per a cada cultiu, etc.); desenvolupar models dinàmics de simulació dels diferents cultius que permetin descriure la intercepció de radiació solar per les fulles, la generació de biomassa (part aèria i arrels), els balanços d'aigua i de nitrogen, i la generació del rendiment.
- Reforçar i, si s'escau, reorientar de manera proactiva els plans existents de seguiment i vigilància de les plagues i altres organismes patògens, de manera integrada i d'acord amb la noves evidències climàtiques i les conseqüències que s'en deriven; monitoritzar la possible expansió de vectors i organismes patògens tenint en compte els canvis potencials en els corrents d'aire; intensificar la vigilància i el control sobre la introducció antròpica de nous organismes nocius potencialment perillosos que puguin veure afavorida la seva expansió o naturalització a causa del canvi climàtic; desenvolupar models que simulin el comportament de diferents agents patògens amb fa al clima, la capacitat d'adaptació al biòtop i la dinàmica estacional dels diferents processos.

- Promoure la introducció de noves tècniques agrícoles per adaptar el sector al canvi climàtic i minimitzar els danys provocats pels esdeveniments climàtics extrems als cultius i al bestiar, d'acord amb els objectius de mitigació i gestió sostenible dels recursos hídrics: promoure l'ús de tècniques de gestió del risc d'escassetat hídrica; diversificar els cultius de muntanya mitjançant la introducció de noves varietats més resilientes a la sequera o cultius alternatius; ajustar els períodes de sembra en resposta a les noves condicions climàtico-

(55) Les mesures Soft o mesures no estructurals són aquelles mesures que s'apliquen per reduir o pal·liar els efectes negatius del canvi climàtic. Aquesta categoria de mesures està representada pels estudis d'investigació enfocats a donar resposta als buits de coneixement o a enriquir les bases de coneixement sobre el canvi climàtic, el seu impacte i els sectors més vulnerables. Aquesta categoria també engloba el desenvolupament de metodologies i sistemes específics amb l'objectiu de reduir els riscos associats al canvi climàtic (per exemple, el desenvolupament d'un early warning system transfronterer que permeti gestionar les onades de calor al massís pirinenc).

ambientals i avaluar la possible reubicació d'alguns cultius en funció de l'evolució de les zones d'idoneïtat climàtica.

- Al sector ramader, afavorir la reducció de la càrrega animal (ramaderia extensiva) i els canvis necessaris en la gestió del pasturatge (transhumància durant les temporades de més calor i sequera), així com ajudar a la suplementació i adaptació de les instal·lacions per fer-les resistents a la climatologia (sistemes d'aïllament i ventilació natural contra les onades de calor).

- Definir mesures d'intervenció per oferir suport als agricultors per tal que puguin adaptar-se al canvi climàtic; oferir serveis d'assessoria tècnica i d'adaptació als mecanismes d'assegurances existents.

Mesures verdes⁵⁶

- Promoure el desenvolupament de sistemes eficients de gestió dels residus agrícoles amb l'objectiu de reutilitzar tots els nutrients naturals disponibles i reduir les aportacions de fora del sistema.
- Promoure una gestió conservativa del sòl, que permeti potenciar-ne la fertilitat natural, la capacitat d'actuar com a embornal de carboni, la capacitat natural de retenir aigua, així com les funcions de protecció de la biodiversitat de la muntanya i la protecció davant de fenòmens erosius.

Mesures grises⁵⁷

- Oferir incentius per modernitzar les explotacions i poder així millorar els sistemes de ventilació/refrigeració dels estables, tot fomentant, en la mesura possible, l'ús de fonts renovables d'energia (centrant-se en la despesa energètica i les emissions de gasos d'efecte hivernacle).
- Utilitzar tècniques per augmentar les zones d'ombra, com per exemple les xarxes d'ombra, les

quals tenen un efecte important sobre la radiació solar, però cap sobre la temperatura i la humitat (i és a més a més, una intervenció de baix cost).

- Fomentar l'ús de tècniques i mesures de gestió més eficients del reg (subirrigació, reg per degoteig i un temps de reg adequats).

IDEES CLAU

- La disminució del període de gelades i l'increment de les temperatures mitjanes podria afavorir l'expansió de cultius no habituals als Pirineus, com ara els cultius d'àmbit mediterrani o d'origen subtropical.
- Els cultius de secà podrien veure restringida la seva àrea de distribució potencial i el seu rendiment a causa d'una major variabilitat en el règim de les precipitacions i l'increment de les temperatures.
- La modificació de les àrees de distribució d'alguns cultius i la major sensibilitat / susceptibilitat dels mateixos per les condicions d'estrès climàtic poden propiciar canvis en la distribució i difusió de les actuals malalties i plagues dels cultius, així com augmentar el risc de expansió de noves malalties.
- El canvi climàtic pot incidir negativament en la producció animal a través de la menor disponibilitat de pastures de qualitat i aigua, la major difusió de malalties i els seus vectors i les onades de calor a través de l'estrès tèrmic i el seu impacte en la salut dels animals.
- El canvi climàtic es posiciona com un factor d'estrès afegit capaç d'actuar en sinergia amb els canvis d'ús del sòl.
- L'abandonament progressiu dels usos tradicionals a la muntanya pirinenca està conduint a uns processos de arbustització i repoblament molt ràpids, amb importants implicacions a nivell de pèrdua de paisatges en mosaic.

(56) Les mesures verdes o basades en els serveis ecosistèmics: aquesta tipologia de mesura inclou totes les mesures, bones pràctiques, estudis o iniciatives que tinguin com a principi l'ús dels serveis ecosistèmics oferts pels diferents recursos naturals per pal·liar els efectes negatius del canvi climàtic (per exemple, pràctiques silviculturals conservatives per incrementar la capacitat dels boscos dels Pirineus per reduir els riscos hidrogeològics).

(57) Les mesures grises o infraestructurals, són totes les que basen la seva acció pal·liativa en la construcció o implantació d'elements infraestructurals concrets (com per exemple, la construcció de dics a les zones habitades amb un elevat risc d'inundacions torrencials).

3.3 Energia

Coordinadors: Juan Terrádez (CTP-OPCC),

Idoia Arauzo (CTP-OPCC).

Autors: Juan Terrádez (CTP-OPCC), Idoia Arauzo (CTP-OPCC).

Coautors: Jeremie Fosse (ECOUNION), Marta García París (CEO ECOSERVEIS).

RESUM

L'energia té un paper fonamental en la vida moderna. A més, el sector és responsable de gran part de les emissions de gasos d'efecte hivernacle d'origen humà (Edehofer et al., 2014). Es tracta també d'un sector vulnerable als efectes del canvi climàtic tant a nivell de proveïment energètic (efectes sobre la producció d'energia) com a nivell de la demanda. Quant a la producció d'energies renovables, és previsible que el canvi climàtic afecti de manera negativa la producció hidroelèctrica, termoelèctrica i eòlica als Pirineus, mentre que els efectes en la producció de l'energia fototèrmica⁵⁸ i fotovoltaica⁵⁹ podrien ser positius en determinades zones.

Els canvis esperats en la quantitat i distribució espacial i temporal de les precipitacions, la seva influència en la disminució dels cabals dels rius principals i la seva implicació directa en la capacitat d'acumulació en preses i embassaments molt probablement reduiran la capacitat de producció hidroelèctrica de les centrals minihidràuliques en muntanya i, en menor mesura, de les centrals hidràuliques més grans en vall. Això cal afegir les cada cop menors i més efímeres reserves hídriques en forma de neu i gel. Les temperatures, cada cop més altes, estan avançant la data de fusió de la neu i del gel als Pirineus, que abans proporcionaven una reserva d'aigua més constant i explotable a l'estiu. A més, la reducció dels cabals mínims dels rius, juntament amb l'augment de la temperatura de l'aigua, molt probablement imposaran limitacions a la capacitat de generació d'energia termoelèctrica atesa la menor eficiència dels sistemes de refrigeració de les centrals termoelèctriques, especialment durant la temporada d'estiu. Tot i que en menor mesura, el fet que les temperatures mitjanes i, en especial, les temperatures màximes a l'estiu siguin més altes podria tenir un impacte

negatiu en el rendiment del cicle termodinàmic, cosa que redueix l'eficiència de les centrals. Els impactes positius esperats es faran notar probablement a través d'un augment del potencial de producció d'algunes energies renovables. En particular, la capacitat de producció d'energia solar fotovoltaica i fototèrmica es podria veure afavorida per un grau més alt d'insolació vinculat a la disminució de la capa de núvols.

No obstant això, el canvi de règim i la disminució de velocitat dels vents previstos per a les properes dècades als Pirineus podrien incidir de manera negativa en la capacitat de producció d'energia eòlica en determinades zones del massís. També l'augment previst de la freqüència i la intensitat dels fenòmens climàtics extrems podria suposar una amenaça per als sistemes de producció energètica a causa d'una major exposició de les infraestructures d'emmagatzematge, transmissió i distribució d'electricitat als riscos

climàtics. Quant a l'evolució de la demanda d'energia al massís, s'espera un escenari de demanda caracteritzat per un augment significatiu de la demanda energètica estival, en resposta a les necessitats creixents d'energia per a la climatització dels habitatges a causa dels estius cada cop més càlids i de les onades de calor cada cop més freqüents. Aquest augment de la demanda estival es podria veure compensat, encara que només sigui en part, per la disminució de la demanda elèctrica hivernal per a la calefacció, en resposta a hiverns cada cop més suaus.

3.3.1 Disminució de la capacitat de producció d'energia hidroelèctrica

El sector energètic als Pirineus està marcat per la importància del sector hidroelèctric a les dues vessants del massís. Les conques hidrogràfiques de l'Ebre i de la Garona i les conques interiors de Catalunya tenen una gran importància des del punt de vista energètic tant a escala regional com nacional. Per a la conca

(58) Els sistemes fototèrmics converteixen la radiació solar en calor i la transfereixen a un fluid de treball. La calor es fa servir aleshores per escalfar edificis o aigua o per moure turbines per generar electricitat.

(59) L'energia solar fotovoltaica és una font d'energia que produeix electricitat d'origen renovable, obtinguda directament a partir de la radiació solar mitjançant un dispositiu semiconductor denominat cèl·lula fotovoltaica, o bé mitjançant una deposició de metalls sobre un substrat denominada cèl·lula solar de pel·lícula fina.

hidrogràfica Ebre-Pirineus, l'energia hidroelèctrica potencial instal·lada s'acosta als 1080 GW (REE, 2017) i suposa més del 50 % de l'energia potencial instal·lada de tot el territori pirenaic (IAEST, 2016). Pel que fa a la vessant francesa, a Occitània el 49 % del potencial energètic regional instal·lat correspon a l'energia hidroelèctrica (Bilan électrique 2016), mentre que a Nova Aquitània voreja el 15 % (RTE Nouvelle-Aquitaine, 2016). Per la seva part, Andorra es troba en una posició singular, atès que el seu territori es troba íntegrament en zona muntanyenca i el seu sistema energètic es caracteritza per la importació de gran part de l'energia que consumeix.

Impactes observats:

La quantitat d'energia elèctrica generada per les centrals hidroelèctriques depèn en part de l'energia potencial instal·lada, però sobretot de la disponibilitat de recursos hídrics acumulats a les preses⁶⁰, en el cas de les centrals d'embassament, i de les variacions del cabal dels rius, en el cas de les centrals d'aigua fluent⁶¹. El proveïment d'aigua depèn en gran mesura de l'estacionalitat del cicle hidrològic i concretament del règim de les precipitacions i del calendari del cicle de desgel de la neu. El canvi climàtic està modificant tant el règim de les precipitacions com el calendari del desgel (López Moreno et al., 2013), amb efectes considerables tant en la capacitat d'acumulació dels embassaments com en el cabal dels rius principals (Morán Tejada et al., 2017).

Fruit de la fusió anticipada de la neu a causa de les altes temperatures, en les últimes dècades s'ha anticipat el pic primaveral del cabal dels rius pirenaics, cosa que ha resultat en un augment dels cabals hivernals i en una disminució dels cabals estivals (Morán Tejada et al., 2017). Això està provocant una variabilitat interanual més alta en la producció d'energia hidroelèctrica.

Als efectes de la major variabilitat de les precipitacions i dels canvis en el calendari de fusió de la neu, cal sumar a més la major freqüència i intensitat de les sequeres, que els anys 2003, 2005, 2007 i 2012 ja van provocar disminucions considerables en la producció d'energia hidràulica tant a la conca de l'Ebre com a la de l'Alta Garona (Van Vliet et al., 2016).

Impactes previstos:

És altament probable que la major variabilitat climàtica prevista per a les properes dècades afecti negativament la capacitat de producció hidroelèctrica al massís. La reducció dels cabals superficials dels rius i els canvis estacionals en la disponibilitat dels recursos hídrics previstos pels principals models suggereixen una major disponibilitat d'aigua durant els mesos hivernals, acompanyada d'un descens molt pronunciat de la disponibilitat hídrica durant l'estació estival (Bangash et al., 2013; Michelle et al., 2013; Morán Tejada et al., 2017). D'altra banda, si les temperatures mitjanes continuen pujant, les reserves hídriques en forma de neu es reduiran encara més (López Moreno et al., 2013). A més de reduir considerablement la seva magnitud, és molt probable que el fenomen del desgel avanci el seu calendari i, com a conseqüència, els pics de desgel es registrin en èpoques de l'any en què els embassaments i les preses ja es podrien trobar al límit de la seva capacitat màxima (Beniston et al., 2013). Per contra, les aportacions hídriques per desgel típiques de la primavera seran cada cop més escasses, cosa que farà disminuir les reserves hídriques acumulades per a la temporada estival, moment de l'any en què, a més, se suma una major demanda d'energia per a refrigeració i de recursos hídrics per a l'agricultura i la ramaderia (Finger et al., 2012). Si aquestes projeccions es confirmessin, la capacitat de producció d'energia hidroelèctrica als Pirineus podria disminuir fins a un -10 % de mitjana i assolir fins i tot el -35 % durant l'estació estival de l'any 2070 respecte a l'època actual (Rojas et al., 2012; Van Vliet et al., 2016), coincidint amb els valors estimats a major escala de detall per a la vessant sud del Pirineu oriental (Bangash et al., 2013). No obstant això, una estimació quantitativa precisa de l'entitat d'aquests canvis a nivell de detall resulta indiscutiblement complexa. De fet, existeixen notables incerteses associades a l'estimació de la variabilitat climàtica futura respecte del comportament de les precipitacions en un sistema tan complex a nivell climàtic i tan heterogeni a nivell orogràfic com els Pirineus. A més de per als valors mitjans anuals i mensuals, aquestes complexitats fan que l'estimació dels valors relatius als episodis de precipitacions curtes i especialment intenses sigui particularment difícil. En canvi, són estimacions fonamentals per determinar la

(60) Les centrals d'embassament són el tipus més freqüent de central hidroelèctrica. Utilitzen un embassament per emmagatzemar aigua i anar graduant el cabal que passa per la turbina. És possible generar energia durant tot l'any si es disposa de reserves suficients.

(61) Les centrals d'aigua fluent, també anomenades "centrals de tall d'aigua" o "de passada", utilitzen part del flux d'un riu per generar energia elèctrica. Operen de forma contínua ja que al no disposar d'embassaments, no tenen capacitat per a emmagatzemar aigua. Turbines l'aigua disponible en el moment, limitades per la capacitat instal·lada. En aquests casos les turbines poden ser d'eix vertical, quan el riu té un pendent fort, o horitzontal, quan el pendent del riu és baixa.

formació d'avingudes i les aportacions hídriques totals (veure capítol 2.6. recursos hídrics).

3.3.2 Disminució de l'eficiència en la producció d'energia termoelèctrica⁶²

La generació d'energia termoelèctrica també es podria veure afectada pel canvi climàtic a través de la reducció dels recursos hídrics disponibles per a refrigeració de les centrals i de la disminució de l'eficiència del cicle termodinàmic provocat per les altes temperatures (Wilbanks et al., 2007).

Impactes observats i previstos:

L'augment de la temperatura atmosfèrica podria desembocar en una reducció de l'eficiència del procés de transformació termoelèctrica⁶³. L'increment de la temperatura de les aigües utilitzades per a refrigeració de les centrals podria alentir el procés de refredament i imposar una disminució de la capacitat de producció, sobretot durant l'estació estival i durant els períodes de cabal mínim (Eskeland et al., 2008).

A més, l'augment de la temperatura dels rius, juntament amb la reducció esperada dels cabals durant l'estació estival (Van Vliet., 2016; Morán Tejeda et al., 2017), podria derivar en possibles restriccions per incompliment de la directiva europea en matèria de cabals mínims (el cabal ecològic mínim⁶⁴ establert per la Directiva Marc d'Aigües 2000/60/CE), imposant limitacions a la descàrrega d'aigües de refrigeració i a la producció termoelèctrica. Finalment, l'augment de la temperatura atmosfèrica produeix una reducció de l'eficiència del procés de transformació termoelèctrica provocada per la disminució de la densitat de l'aire de subministrament que alimenta les turbines (Hewer et al., 2006).

3.3.3 Canvi climàtic i energies renovables

El canvi climàtic pot influir en la capacitat de generació d'algunes energies renovables àmpliament esteses als Pirineus, com són l'energia solar fotovoltaica i fototèrmica o l'energia eòlica. Els canvis en el comportament d'algunes

variables claus, com la velocitat i la distribució dels vents, el grau de nuvolositat o la transmissivitat de l'atmosfera, poden tenir efectes significatius en la capacitat de producció d'aquestes energies, de diferent magnitud i signe segons la font d'energia i el lloc considerats.

Impactes observats i previstos:

Segons els principals estudis realitzats fins ara, els sectors fotovoltaic i fototèrmic es podrien veure moderadament afavorits en el futur a causa del canvi climàtic (Bartók et al., 2010; Crock et al., 2011; Jerez et al., 2015; Wild et al., 2015; Vliet et al., 2016). La probable modificació del contingut en vapor d'aigua de l'atmosfera, com també la variació de l'índex de nuvolositat i de les característiques dels núvols, podrien tenir efectes directes sobre la transmissivitat de l'atmosfera als raigs del sol. Al sud-oest europeu, inclosa la serralada dels Pirineus, s'espera un augment de la irradiació solar mitjana en les properes dècades (Bartók et al., 2010; Gaetani et al., 2014; Jerez et al., 2015) que podria variar entre un 5 % i un 10 % a l'estiu i a la tardor, i entre un -2 % i un +8 % a l'hivern i a la primavera (Pašičko, 2010). Segons Jerez et al., 2015 i Gaetani et al., 2014, això podria suposar un augment de la capacitat potencial de producció d'energia fotovoltaica de fins al 10 ± 3 % per al 2070-2099 respecte al període de referència 1970-1999.

Un altre estudi realitzat a escala global conclou que, per al període 2051-2080, el potencial de producció d'energia fototèrmica podria augmentar en fins a un 10 % respecte al 2010, mentre que la producció fotovoltaica augmentaria en menor magnitud, amb increments pels volts del 3,5 % (Crook et al., 2011), una mica menys que les estimacions de Jerez et al. (2015) i Gaetani et al. (2014).

No obstant això, cal considerar que l'augment de les temperatures també podria influir negativament en l'eficiència de les cèl·lules fotovoltaïques. En concret, s'ha estimat que les cèl·lules de silici cristal·lí redueixen la seva eficiència al voltant del 0,4-0,5 % per cada 1°C d'augment de la temperatura mitjana (Pašičko, 2010). Si considerem un augment de la temperatura mitjana

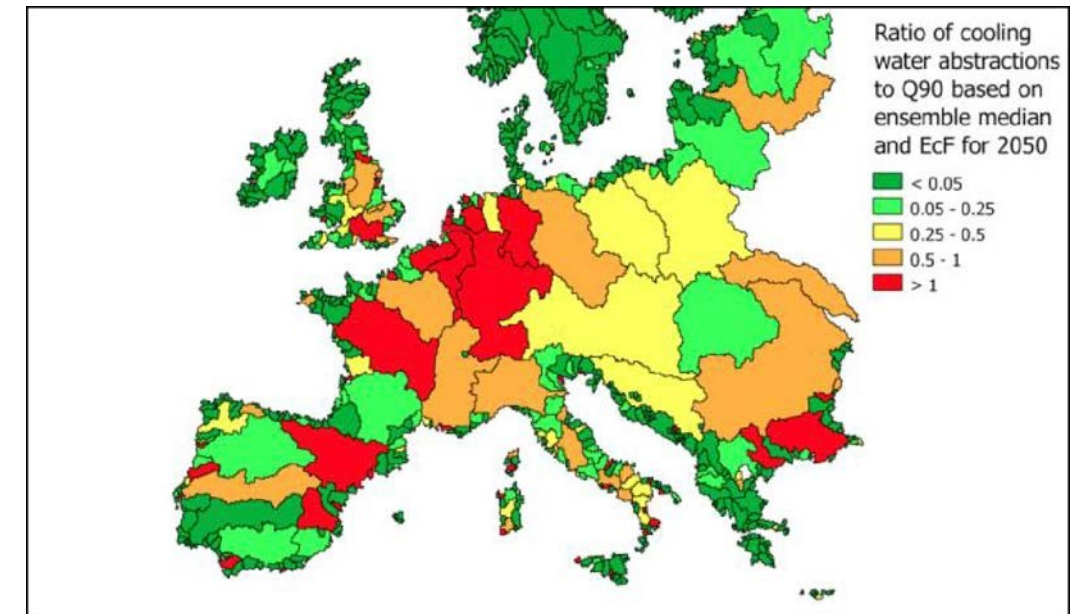


Figura 3.3.2. Estimació de l'impacte del canvi climàtic en l'eficiència dels processos de refrigeració de les centrals termoelèctriques en l'any 2050, segons l'escenari d'emissió A1B, sense mesures d'adaptació. Els valors que es mostren a la llegenda es refereixen a la possible intensitat de l'impacte, en relació amb la mitjana europea. Font: projecte ClimWatAdapt, 2011.

d'1,5°C per al període 2050-2070 (previsions dels escenaris més optimistes), l'impacte sobre l'eficiència de les cèl·lules fotovoltaïques, sense tenir en compte els possibles avenços tecnològics emergents, podria suposar una reducció del -0,75 % de l'eficiència respecte a l'actual.

Pel que fa a la generació d'energia eòlica, els estudis més recents coincideixen a dir que el canvi climàtic tindrà un impacte negatiu en el potencial de producció d'energia eòlica als Pirineus (Santos et al., 2014; Gonçalves Ageitos et al., 2015; Tobin et al., 2015). Els canvis previstos en el patró dels vents i l'esperada reducció de la velocitat diària mitjana dels vents en superfície (fins a un -9 % més lents) podrien reduir el potencial de producció d'energia eòlica en un $-1 \pm 0,5$ MWh/dia en les properes dècades respecte als valors actuals.

Aquesta reducció es considera que serà molt més marcada durant l'època d'estiu i tardor que durant els mesos d'hivern i primavera, estacions durant les quals fins i tot podria augmentar relativament el potencial eòlic en algunes zones (Santos et al., 2014). Les àrees més afectades per aquesta disminució serien els Pirineus central i oriental, mentre que a la vessant atlàntica de la serralada no s'hi esperen grans variacions i, segons alguns models, el potencial eòlic podria fins i tot augmentar lleugerament (Gonçalves Ageitos et al., 2015).

(62) Es denomina energia termoelèctrica a la forma d'energia que resulta d'alliberar l'aigua per mitjà d'un combustible per moure un alternador i produir energia elèctrica.

(63) Procés que consisteix en ús d'un combustible per transformar l'aigua en vapor, que acciona al seu torn les turbines o alternador que produirà l'energia.

(64) L'expressió "cabal ecològic", referida a un riu o a qualsevol altre llera d'aigua corrent, és una expressió que pot definir-se com el aigua necessària per preservar els valors ecològics a la llera del mateix, com: els hàbitats naturals que acullen una riquesa de flora i fauna, les funcions ambientals com dilució contaminants, amortiment dels extrems climatològics i hidrològics, preservació del paisatge.

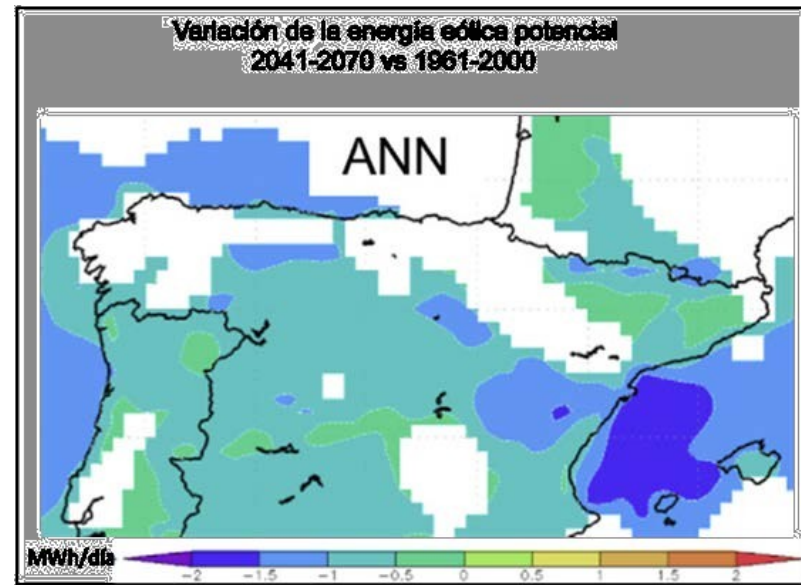


Figura 3.3.3. variació estimada de l'energia eòlica potencial anual per al trentenni 2041-2070 respecte als valors mitjans del període 1961-2000, fent servir el model COSMO-CLM i l'escenari d'emissions A1B. Font: Santos et al., 2014. Renewable Energy © journal.

3.3.4 Variació estacional de la demanda energètica

La climatització de les llars i altres espais és responsable d'una fracció considerable de l'energia utilitzada a Europa (EEA, 2016). Les necessitats de calefacció i refrigeració depenen en gran mesura de les condicions meteorològiques i, sobretot, de les temperatures. Els principals estudis realitzats en la matèria (PESTA II, ClimateCost, POLES, EENSEMBLES) coincideixen a dir que la demanda estacional d'energia a Europa ha sofert fluctuacions considerables en les darreres dècades a causa del canvi climàtic i que la situació es continuarà donant també en el futur.

Impactes observats i previstos:

Aproximadament un terç de la demanda energètica destinada a la calefacció de les llars europees se subministra amb electricitat (Mideksa i Kallbekken,

2010). En canvi, la demanda energètica per al refredament mitjançant aparells d'aire condicionat es cobreix exclusivament amb electricitat. En les últimes dècades, els hiverns cada cop més suaus i els estius cada cop més calorosos i marcats per les onades de calor han provocat canvis en l'estructura de la demanda energètica per a calefacció i refrigeració de llars i locals. Per avaluar el seguiment de la demanda energètica relativa a les necessitats de calefacció i refrigeració, la majoria d'estudis fan servir un indicador denominat CDD65 (grau-dia de refrigeració, per les sigles de Cooling Degree Day) i HDD66 (grau-dia de calefacció, per les sigles de Heating Degree Day).

Tots dos indicadors fan referència a la quantitat d'energia necessària per escalfar o refrigerar els habitatges fins a una determinada temperatura de confort. Entre el 1981 i el 2014 s'ha produït una reducció del valor de l'indicador d'entre -8 ± 2 HDD/any, a causa dels hiverns més suaus (figura 3.3.4). En canvi,

(65) El grau-dia de calefacció (HDD) és una mesura dissenyada per quantificar la demanda d'energia necessària per escalfar un edifici. HDD és funció directa de la temperatura de l'aire exterior. Els requisits de calefacció per a un edifici determinat en un lloc específic es consideren directament proporcionals al nombre d'HDD en aquest lloc.

(66) El grau-dia de refrigeració (CDD) és una mesura anàloga al HDD que reflecteix la quantitat d'energia utilitzada per refrigerar una llar o negoci. El valor de base de l'HDD i del CDD es defineix com la temperatura a què no cal utilitzar ni refrigeració ni calefacció (Schaeffer et al., 2012).

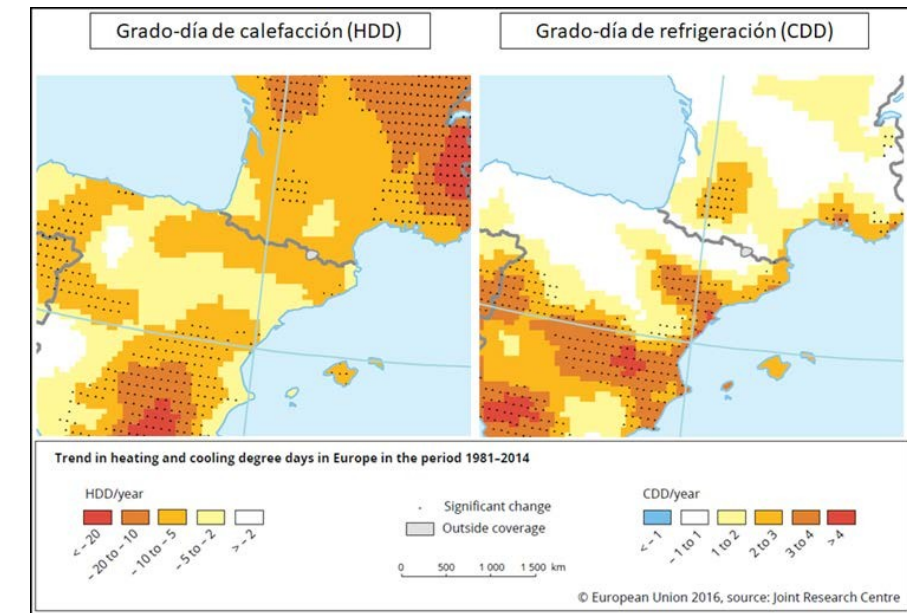


Figura 3.3.4. Evolució dels indicadors HDD (esquerra) i CDD (dreta) durant el període comprès entre el 1981 i el 2014 als Pirineus. Font: JRC, 2016 de EEA, 2016.

durant el mateix període s'ha registrat un augment de $+2 \pm 1$ del CDD/any a causa dels estius cada cop més càlids (EEA, 2016).

Segons les projeccions de l'evolució d'aquests dos indicadors realitzades en el context del projecte europeu ENSEMBLES, per a la fi del segle es preveu una reducció paulatinament major de les necessitats energètiques per a l'escalfament de les llars durant l'estació hivernal i un increment de les necessitats energètiques per a la refrigeració en els sectors civil, industrial i de serveis. Cal assenyalar que l'augment de la demanda energètica per cobrir les necessitats creixents de refrigeració (pics de demanda) es produirà molt probablement en moments de l'any crítics per a la generació d'energia hidroelèctrica i amb possibles limitacions en l'ús dels recursos hídrics per a refrigeració de les centrals termoelèctriques (Förster i Lilliestam, 2009). A això cal afegir-hi els efectes sobre la demanda i l'oferta energètica provocats pels extrems climàtics cada cop més freqüents i intensos. En concret, és molt probable que durant l'estació estival els pics de demanda energètica augmentin cada cop més per poder afrontar els estius calorosos, alhora que disminueix la capacitat de producció d'energia per la menor disponibilitat de recursos hídrics per a la producció hidroelèctrica.

3.3.5 Increment del risc de danys en les infraestructures energètiques

La major freqüència i intensitat dels fenòmens meteorològics extrems podria suposar una amenaça per a la integritat dels sistemes de producció d'energia des del punt de vista de les infraestructures d'emmagatzematge, transmissió, transformació i distribució d'electricitat als Pirineus (Sathaye et al., 2011; Muriel et al., 2016).

Impactes observats i previstos:

Moltes de les infraestructures que conformen els sistemes de transmissió i transformació d'energia a les dues vessants dels Pirineus estan particularment exposades als riscos climàtics i als riscos naturals induïts o potenciat per aquests. D'una banda, les infraestructures energètiques es caracteritzen per tenir vides mitjanes relativament llargues (de 20 a 80 anys) i, per això, estan particularment exposades a aquests riscos a llarg termini. D'altra banda, gran part de la xarxa es troba en àrees del territori en risc d'inundació, amb pendents acusats sovint inestables o afectats per moviments de masses i desprendiments de roques freqüents, típics dels ambients de muntanya. A més, el canvi en el règim de les precipitacions podria derivar en un nombre més alt de períodes de pluja curts però excepcionalment intensos, actuant com

a factor desencadenant de molts riscos geològics i hidrològics. Altres esdeveniments climàtics extrems que probablement augmentin la seva freqüència en el futur, com els vents forts i les tempestes, poden provocar la caiguda d'arbres i de pals telefònics, cosa que provoca danys a les xarxes de distribució i, com a conseqüència, interrupcions temporals en la distribució d'electricitat. Finalment, durant les onades de calor, les altes temperatures podrien provocar avaries en els transformadors d'energia elèctrica i alterar temporalment el subministrament d'energia elèctrica (Karl et al., 2009; Sathaye et al., 2011). Com que ara per ara no existeixen estudis quantitius sobre aquests impactes als Pirineus, resulta pertinent avaluar amb més profunditat els nivells de risc de les infraestructures energètiques derivats o induïts pel canvi climàtic. Una anàlisi més exhaustiva i quantificativa permetria valorar si aquest aspecte del canvi climàtic requereix l'adopció de mesures específiques per evitar o mitigar possibles danys. No obstant això, i com a mesura preventiva a curt i mitjà termini, és important que s'adaptin els dissenys i les condicions d'operació de les infraestructures energètiques de nova construcció per fer-les més resistents als riscos climàtics, aprofitant les lliçons apreses d'altres zones de muntanya.

3.3.6 Conclusiones i recomanacions

El sector energètic és particularment vulnerable als impactes del canvi climàtic. Es preveu que el canvi climàtic modifiqui el comportament de l'oferta i la demanda en les properes dècades. La disminució de la capacitat de producció d'energia hidràulica i termoelèctrica a causa de les implicacions del canvi climàtic podria suposar la reducció de l'oferta energètica en períodes crítics de pic de demanda energètica. En aquest sentit, durant els estius, cada cop més càlids i caracteritzats per onades de calor més intenses i freqüents, es produiran canvis en l'esquema de la demanda energètica, amb el pic de demanda cada cop més concentrat en aquesta època. Aquesta desincronització entre els períodes de més demanda i els períodes de menys capacitat de producció d'energia podria derivar en possibles conflictes entre diferents sectors socioeconòmics en relació amb els recursos hídrics, especialment a l'estiu per l'escenari d'escassetat creixent. De fet, és previsible que l'impacte combinat del canvi climàtic sobre els recursos hídrics dificulti la satisfacció total de les necessitats hídriques per als sectors agrícola, energètic i ambiental. Per aquest motiu, la implementació de mesures transversals d'adaptació es contempla com un element fonamental per assegurar la resiliència d'aquests sectors davant dels desafiaments climàtics.

Desafiaments principals

- Optimitzar la producció energètica i l'ús de recursos hídrics en la producció d'energia hidroelèctrica i termoelèctrica.
- Adequar la gestió del sector energètic a les possibles variacions de la demanda.
- Aprofundir en les possibles limitacions del sistema energètic actual davant dels desafiaments climàtics.
- Identificar possibles oportunitats emergents.
- Promoure mesures i campanyes d'estalvi energètic.
- Assegurar l'adaptació progressiva de les infraestructures elèctriques i hidràuliques a la dinàmica futura de la demanda.
- Identificar els nodes de la xarxa de distribució energètica ubicats en territori de muntanya més crítics respecte als riscos climàtics, hidrològics i geològics.
- Assegurar una bona capacitat de resposta i de recuperació de la xarxa de distribució davant d'esdeveniments climàtics extrems.
- Fomentar la transició a un model de generació d'energia distribuïda en substitució del model de producció centralitzada actual.

Recomanacions

En aquest apartat s'inclou un seguit de recomanacions d'adaptació destinades a facilitar el procés de disseny i desenvolupament de mecanismes per augmentar la resiliència del sector energètic davant del clima futur i la seva variabilitat. Cal mencionar que no existeix cap combinació de mesures preestablertes eficaç i que, en funció tant del sistema de producció energètica en qüestió com de la localització geogràfica específica de les infraestructures de producció, transport i acumulació, seran més prioritàries unes accions que d'altres. També és important tenir en compte el caràcter particularment transversal del sistema energètic, tant en la valoració detallada dels impactes previstos com en la definició de possibles mesures d'adaptació. Aquesta transversalitat resulta especialment evident en la qüestió dels recursos hídrics i en els aspectes relacionats amb les polítiques i els objectius de mitigació. És imprescindible considerar tots aquests aspectes per poder establir prioritats abans de

formular i implementar un conjunt de mesures òptimes en termes d'eficàcia i eficiència (cost/beneficis) per augmentar la resiliència del sector al canvi climàtic en l'àmbit pirenaic.

Mesures soft⁶⁷

- Integrar les consideracions sobre l'evolució de les variables climàtiques i les seves implicacions en la demanda energètica anual en els sistemes actuals de pronòstic de crisis i pics de demanda.
- Fomentar i incentivar sistemes tèrmicament eficients de construcció i de climatització passiva, capaços de fer front a l'augment de la temperatura i als requisits de confort tèrmic a baix cost energètic o cost "0" (per exemple, augmentar el sistema d'incentius per millorar l'eficiència energètica d'edificis restaurats i de nova construcció).
- Consolidar nous enfocaments de modelització en relació amb les projeccions meteo i hidroclimàtiques, integrant en la mesura del possible els processos naturals i antròpics rellevants a nivell de conca.
- Integrar sistemàticament les consideracions relatives al cabal ecològic definit per la Directiva Marc d'Aigües (2000/60/CE) en els plans i pràctiques de gestió dels embassaments per garantir les necessitats funcionals dels ecosistemes fluvials també en consideració a un escenari d'agreuament dels cabals mínims.

- Promoure estudis per valorar la sensibilitat al canvi climàtic de les principals fonts d'energia renovable (per exemple, reduir les incerteses sobre les implicacions futures del canvi climàtic en la producció d'energia hidroelèctrica, termoelèctrica i eòlica) a un nivell de detall suficient que permeti orientar les accions i inversions sobre el terreny.

Mesures verdes⁶⁸

- Desenvolupar sistemes de producció energètica alternatius aprofitant els recursos locals (com ara calderes de biomassa o pellets).

Mesures grises⁶⁹

- Afavorir la transició a un model de generació energètica descentralitzat.
- Fomentar les tècniques i materials de construcció tèrmicament eficients i els sistemes de climatització passiva (envidrament exterior doble i triple, refredament amb sistemes de refrigeració passius, ús de "sostres verds", etc.).
- Recuperar, on sigui factible, la capacitat d'acumulació dels embassaments i preses més crítics per facilitar la planificació i la gestió plurianual dels recursos hídrics mitjançant l'adopció d'accions que optimitzin l'acumulació tot i la variabilitat en les aportacions.

(67) Les mesures soft o mesures no estructurals per reduir o pal·liar els efectes negatius del canvi climàtic. Aquesta categoria de mesura està típicament representada pels estudis d'investigació enfocats a cobrir llacunes de coneixement o per enriquir les bases de coneixement sobre el canvi climàtic, els seus impactes i els sectors més vulnerables. També trobem en aquesta categoria el desenvolupament de metodologies i sistemes específics per reduir riscos derivats del canvi climàtic (p. e. desenvolupament d'un early warning system transfronterer per a la gestió de les onades de calor al massís).

(68) Les mesures verdes o basades en serveis ecosistèmics inclouen totes les mesures, bones pràctiques, estudis o iniciatives que tinguin com a principi l'ús dels serveis ecosistèmics que ofereixen els diferents recursos naturals per pal·liar els efectes negatius del canvi climàtic (p. e. pràctiques silviculturals conservadores per augmentar la capacitat dels boscos dels Pirineus per reduir els riscos hidrogeològics).

(69) Les mesures grises o infraestructurals són totes aquelles que basen la seva acció pal·liativa en la construcció o implantació d'elements infraestructurals concrets (p. e. construcció de dics en zones habitades amb un alt risc d'inundacions torrencials).

- Augmentar la interconnectivitat de les infraestructures hídriques més grans per incrementar la resiliència del sistema (integració de xarxes de distribució i introducció de mecanismes per a l'intercanvi i la transferència temporal de concessions).

- Implementar una estratègia d'intervencions per al manteniment regular de la seguretat de les infraestructures especialment vulnerables als esdeveniments climàtics extrems i als riscos que se'n deriven (com ara infraestructures energètiques ubicades en zones de risc d'inundació, de lliscament de terres o avingudes).

- Fomentar la creació d'una xarxa elèctrica intel·ligent transpirenaica o "smartgrid" que afavoreixi la interconnexió de plantes de producció de petita grandària i de fonts renovables, ja siguin fotovoltaïques, eòliques o hidroelèctriques.

IDEES CLAU

- És previsible que el canvi climàtic afecti negativament la disponibilitat d'aigua per a la producció hidroelèctrica al Pirineu.
- La reducció dels cabals mínims dels rius, juntament amb l'augment de la temperatura de l'aigua, molt probablement imposaran limitacions a la capacitat de generació d'energia termoelèctrica.
- La capacitat de producció d'energia solar fotovoltaica i fototèrmica podria veure-es afavorida a causa d'un major grau d'insolació, vinculada a la disminució de la capa de núvols.
- El canvi en el règim i disminució de la velocitat dels vents previst per als propers decennis als Pirineus, podria incidir de manera negativa en la capacitat de producció d'energia eòlica en certes zones del Massís.
- L'augment previst de la freqüència i intensitat dels fenòmens climàtics extrems podria suposar una amenaça per als sistemes de producció i distribució energètica.
- L'escalfament global podria provocar un augment de la demanda estival per refredament de les llars, que es podria veure compensat encara que només en part per la disminució de la demanda elèctrica hivernal per a calefacció.

3.4 Riscos naturals

Coordinació: Yvan Caballero (BRGM)

Autors: Séverine Bernardie y Nina Graveline (BRGM); María del Carmen Llasat (UB); Christine Bouisset, Sylvie Clarimont e Isabelle Degrémont (UNIV. PAU); Santiago Beguería (EEAD-CSIC), Juan Ignacio Lopez-Moreno (IPE-CSIC), Vincent Jomelli (CNRS), Enrique Serrano (UVA), Yvan Caballero (BRGM).

Dels desastres provocats per amenaces naturals que van ocórrer a Europa des de l'any 1980, aproximadament el 90 % dels esdeveniments i el 80 % de les pèrdues econòmiques van ser causats per riscos climàtics o hidrometeorològics (AEMA, 2010). Donades les condicions del canvi ambiental global, tal com es descriu en el Cinquè Informe de l'IPCC (2014), els impactes dels riscos naturals sobre els sistemes naturals i humans probablement creixeran i es manifestaran amb més intensitat a tot el món. Europa, per exemple, assistirà probablement a un augment progressiu dels riscos climàtics a les regions del sud-oest (Forzieri et al., 2016).

Aquest capítol examina, de manera sintètica, els principals elements de coneixement respecte a la possible influència del canvi climàtic sobre els perills associats amb els principals riscos naturals que poden presentar-se als Pirineus. La importància del risc que presenta un determinat tipus de fenomen natural (tempestes, sequeres, inundacions i esllavissades de terres, entre d'altres) en un territori depèn de la combinació de la perillositat del fenomen (que qualifica la seva aparició i intensitat) i de la vulnerabilitat del territori en què es produeix el fenomen natural (que és encara més important com més gran és l'exposició de la població i els béns a un determinat risc). En aquest capítol, no discutirem la noció de vulnerabilitat. Més aviat, ens centrarem en una presentació de l'estat del coneixement actual sobre els perills que presenten els principals fenòmens naturals descrits en el territori pirinenc, i la seva possible evolució futura. S'han considerat cinc tipus de fenòmens naturals: 1) Els esdeveniments meteorològics extrems, 2) les inundacions, 3) els desprendiments de roques i les esllavissades de terra, 4) la degradació del pergelisol i 5) les allaus. En conclusió, es presenten algunes recomanacions en termes d'accions d'adaptació per emprendre.

RESUM

Aquest capítol presenta l'estat de l'art dels coneixements sobre la possible influència del canvi climàtic en els perills associats amb els principals riscos naturals que poden afectar els Pirineus. En el futur, és probable que el territori pirinenc hagi de fer front a un augment de les temperatures màximes i mínimes, de les onades de calor i dels episodis de sequera; a un augment de la freqüència d'episodis de pluja intensa i de la intensitat dels episodis de calamarsa; a un augment del risc associat amb les crescudes i les inundacions, tot i la manca d'indicacions clares sobre l'evolució futura de la seva ocurrència i intensitat; a una disminució de l'estabilitat dels talussos i roques en proporcions molt poc conegudes, però que podria resultar de la combinació de l'evolució futura de les precipitacions, de les temperatures i de la probable descongelació o degradació del pergelisol.

El capítol conclou amb una reflexió sobre les estratègies d'adaptació que caldria tenir en compte per tal de fer front a aquests esdeveniments, i recomana una sèrie de mesures que poden aplicar-se per augmentar la resiliència del territori pirinenc als riscos naturals induïts pel canvi climàtic.

3.4.1 Augment dels fenòmens meteorològics extrems

Evolució actual

El seguiment i l'anàlisi de l'evolució dels fenòmens extrems (pluges torrencials, sequeres, onades de calor...) és una activitat complexa no només per l'escassetat i el caràcter sobtat de les seves ocurrències (sensibilitat de les variables que es pretenen observar i els canvis progressius en els mètodes i equips de mesurament utilitzats per a documentar-los) sinó també a causa de la dificultat d'arribar a un acord sobre la forma de definir-los. En general, els riscos climàtics millor documentats són l'evolució de les temperatures extremes. L'IPCC (Hartmann et al., 2013) proposa una il·lustració general (3.4.1) sobre l'evolució observada en la freqüència dels principals riscos climàtics des de mitjan segle XX. Estudis específics sobre la calamarsa han demostrat que els episodis de calamarsa són més

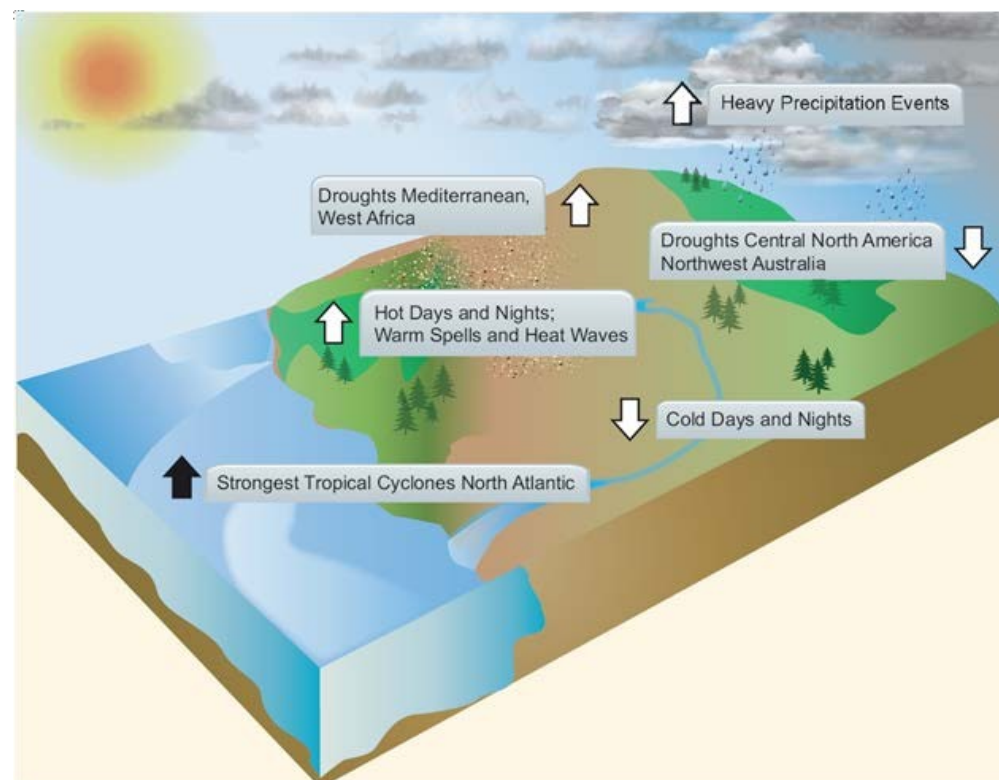


Figura 3.4.1. Evolució de les freqüències (o intensitat) de diferents tipus d'esdeveniments extrems (la direcció de la fletxa indica l'evolució de l'augment o de la disminució), des de mitjan segle XX. Font: Hartmann et al., 2013

freqüents i intensos a la serralada dels Pirineus que a la resta dels massissos muntanyencs de França. Això pot ser degut molt probablement a la influència dels corrents d'aire humit que provenen d'Espanya en determinats períodes de l'any, i/o als fronts d'aire fred procedents de l'Atlàntic (Berthet et al., 2011). Del registre d'observacions dels episodis de calamarsa en els últims 40 anys, s'observa la tendència cap a un augment en la intensitat dels episodis, en correlació amb l'augment de les temperatures primaverals, encara que cap tendència ha estat detectada en la seva freqüència d'ocurrència (Berthet et al., 2011).

Projeccions futures

No s'ha establert la relació entre els canvis en les precipitacions totals i l'evolució dels fenòmens extrems. No obstant això, les projeccions realitzades

pels models climàtics indiquen que, a escala mundial, les precipitacions podrien intensificar-se durant la temporada de pluges, en particular a les latituds altes i a les regions que es beneficien de pluges monsoòniques (Collins et al., 2013). En el marc de l'informe especial sobre esdeveniments extrems SREX de l'IPCC (2012), es projecta un augment de la freqüència de pluges especialment intenses en detriment de les pluges de baixa intensitat. A nivell estacional, l'augment de l'evapotranspiració vinculat a l'escalfament global podria causar períodes de sequera més freqüents i llargs, especialment a les regions semiàrides com la conca mediterrània (Collins et al. 2013). A més d'aquestes sequeres, qualificades de "meteorològiques", també les sequeres "agronòmiques" podrien ser més freqüents en un futur (vegeu el capítol 3.3), sobretot a les regions on el contingut d'aigua del sòl és actualment baix.

ENQUADRAMENT 3.4.1. SOLUCIONS PER LIMITAR L'IMPACTE DE LES SEQUERES A LES CIUTATS

Varias ciudades han comenzado a implementar soluciones basadas en la creación de islotes de frescura para luchar contra el aumento de la temperatura⁷⁰. En Orléans (Francia), el desarrollo de tejados vegetalizados y de áreas verdes, la reducción de las superficies impermeabilizadas, el mantenimiento o la creación de áreas naturales mediante la plantación de especies preferentemente locales, y la gestión y renovación del patrimonio de árboles, permite a las ciudades su reconversión a "ciudades-jardín". En Stuttgart (Alemania), se ha adoptado un reglamento de construcción vinculante, que promueve el uso de soluciones basadas en la naturaleza, y ha ayudado a que la ciudad logre cubrir el 60% de su superficie con áreas verdes. Los 1900 m² de techos verdes en el Ayuntamiento de Chicago, ejecutados según el Plan de Acción Climático de Chicago, han ayudado a disminuir la escorrentía pluvial y reduce el efecto de isla de calor urbana alrededor del proyecto piloto (PNUE, 2014).

3.4.2 Augment de la freqüència d'inundacions i crescudes

Evolució actual

Fins avui, no s'ha detectat cap tendència estadísticament robusta de l'evolució de les inundacions a escala global. L'únic senyal robust s'observa a la primavera, a les regions on la neu acumulada és important i on el cabal de les aigües superficials està fortament influenciat pel desglaç (Hartmann et al., 2013). L'IPCC (2014) i altres estudis específics (Hall et al., 2014) assenyalen que la tendència creixent registrada en els impactes de les inundacions està més correlacionada amb els canvis en els usos del sòl i l'augment de la vulnerabilitat que amb l'augment de temperatura a causa del canvi climàtic i el seu efecte en la precipitació (Aerts et al., 2018).

Mediero et al. (2014), en analitzar l'evolució de la descàrrega màxima anual en grans conques d'Europa, reporten més tendències negatives que positives per al període 1959- 2009. No és possible estendre aquestes conclusions a l'escala de les capçaleres de conca per falta de reports. López-Moreno et al. (2006) i Renard

et al. (2008) assenyalen tendències negatives en les puntes d'avingudes al Pirineu Central per als períodes 1955- 1995 i 1968-2000, respectivament; tanmateix, aquestes tendències es podrien justificar àmpliament per l'augment de la massa forestal i els canvis en els usos de sòl (més informació al capítol 3.1). Bulygina et al. (2009, 2011) van demostrar que, a les conques petites, l'augment de la massa forestal pot induir una reducció del cabal mitjà dels rius, de fins a un 10 % durant les inundacions.

Als Pirineus, les inundacions es produeixen principalment com a resultat de pluges de gran intensitat, com "inundacions llampec" de resposta ràpida. Només en poques ocasions el desglaç juga un paper important (episodi del riu Garona de l'any 2013, on el desglaç va provocar inundacions catastròfiques que van afectar Catalunya, Aragó, Andorra i Pirineu Central; Agència de l'Aigua Adour-Garonne [2014]; Llasat et al., 2017). Les avingudes als Pirineus s'han produït amb més freqüència a la tardor, amb inundacions excepcionals a l'octubre de 1940 (més de 860 mm de pluja) i novembre de 1982 (més de 600 mm de pluja) (Llasat et al., 2017), i el 1999 (nord de Catalunya), i el nombre més gran de víctimes en els últims anys en el sud de França, Boudou (2016). No obstant això, no s'ha pogut detectar cap tendència en aquestes inundacions catastròfiques (Llasat et al., 2013). D'altra banda, s'ha detectat un augment en la freqüència de les inundacions "extraordinàries", encara que els danys provocats per aquestes inundacions han estat menors gràcies als esforços duts a terme en la disminució dels nivells d'exposició i, especialment, a les zones costaneres

(Llasat et al., 2013). Per exemple, entre 1981 i 2015, van tenir lloc 77 inundacions a Catalunya, de les quals el 23 % van ser catastròfiques, i el 51 % van provocar un total de 100 morts (Llasat et al., 2017). En paral·lel, 97 esdeveniments catastròfics van ocórrer entre 1981 i 2010 a les regions d'Occitània i Nova Aquitània, amb un total de 94 morts. A Andorra, es van produir inundacions extraordinàries l'any 1907, l'octubre de 1937 i el novembre de 1982. Aquesta última va causar víctimes mortals. Es va registrar un increment lleu però significatiu (0,4 esdeveniments/dècada) de les inundacions durant l'època estival (juliol- agost-setembre) al Pirineu Català. Álvarez-Rodríguez et al. (2016) sostenen que, des del 1950 fins avui, s'han observat pocs canvis en la distribució de les estacions més enllà de 1400 m d'altitud. Aquestes dades posen

(70) <http://uicn.fr/solutions-fondees-sur-la-nature/>

de manifest la necessitat d'analitzar les variacions estacionals sobre la base de sèries pluviomètriques d'alta resolució temporal, cosa que actualment es troba limitada per la falta d'observacions in situ (especialment en altura).

Projeccions futures

És difícil desenvolupar projeccions futures quant a les inundacions en vista de les incerteses relacionades amb les projeccions per pluges d'alta intensitat i els canvis en els usos del sòl (Hall et al., 2014). Els informes de l'IPCC (2012, 2014) es limiten a presentar una projecció de la freqüència de precipitacions d'alta intensitat (per a un període de retorn de 20 anys) al sud d'Europa. No obstant això, s'identifica com un repte a futur, amb un alt nivell de confiança, l'increment de les pèrdues econòmiques i humanes causades per les inundacions de rius i costaneres, com a resultat de la creixent urbanització, de l'augment del nivell del mar, de l'erosió costanera i de les puntes d'avingudes a Europa. En el cas dels Pirineus, això podria afectar principalment les regions costaneres perifèriques. Per contra, a les àrees muntanyoses pirinenques, el procés continu de despoblació rural i l'augment de la coberta forestal fan que molt probablement la problemàtica afecti sobretot determinades zones turístiques (urbanització de riberes de rius i torrents) amb un alt nivell de risc, com, per exemple, en el cas del riu Garona al juny de 2013 (Llasat et al., 2017), o de Biescas, a l'agost de 1996 (García Ruiz et al., 2004). Pel que fa a les projeccions futures de les inundacions, els estudis de Rojas et al. (2012) no van trobar cap indicació significativa a les regions de la Mediterrània Occidental. Dumas et al. (2013) projecten un augment en la freqüència de les inundacions amb un període de retorn de 100 anys sobre el territori francès. Pel que fa a l'índex de pluges màximes anuals recollides en un període de 24 hores, Turc et al. (2016) han constatat canvis en la regió pirinenca per al període 2070-2100 respecte al període de referència 1971-2000, que van des de menys 5 % a més 5 %, que serien clarament negatius a la primavera i l'estiu.

ENQUADRAMENT 3.5.2. SOLUCIONS PER LIMITAR ELS RISCOS D'INUNDACIONS

Davant el risc d'inundacions, s'han aplicat en primera instància estratègies basades en la construcció d'infraestructures de protecció (com ara conques de retenció associades a sistemes automatitzats de gestió). Més recentment, diversos països han aplicat enfocaments basats en la planificació urbana i destinats a la gestió del fenomen aigües amunt 71. Per exemple, el departament de Sena Saint-Denis utilitza els espais naturals per regular les avingudes i afavorir la infiltració de les aigües de vessament. Un programa franco-suís de restauració del riu Rin ha permès reduir l'exposició de la població al risc d'inundacions restablint el subministrament d'aigua a alguns braços morts del riu, així com modificant l'estructura d'alguns dels seus afluents. L'any 2002, el Fons Mundial per a la Naturalesa (WWF) va iniciar un programa per reconnectar llacs a la província de Hubei amb el riu Yangtze (Xina), per mitjà de la reobertura estacional de comportes. Es facilita d'aquesta manera la gestió sostenible dels llacs a través de la supressió o modificació de les infraestructures i s'augmenta l'emmagatzematge de les aigües d'inundació (PNUE, 2014). A Suïssa, prop de Ginebra, fins fa pocs anys, el riu Aïre fluïa a través d'un canal. Els períodes de fortes pluges trencaven repetidament les seves riberes i plantejaven un risc d'inundació per a alguns dels barris de la ciutat. L'any 2002, es va iniciar un projecte de protecció contra inundacions, combinat amb la modernització ecològica del curs d'aigua. Un llarg tram de la llera es va eixamplar; com a resultat, la descàrrega va disminuir i els pics d'inundació a la conca baixa es van dissipar. Des de l'any 2011, la Llei de Protecció de les aigües suïsses ha prescrit un espai mínim per a rius i rierols. Les franges de protecció que ja existeixen en l'actualitat al llarg de riberes s'han d'eixamplar, especialment al llarg de cursos d'aigua importants. Per això, es necessiten prop de 20.000 hectàrees de terra a tot Suïssa, principalment a les zones agrícoles. Però aquesta terra no està perduda per a l'agricultura; segueix sent possible utilitzar-la com a pastures extenses per a la ramaderia i la producció de fenc (FBA (2017a).

3.4.3 Augment de les esllavissades i desprendiments de roques

Evolució actual i futura del nombre i dels tipus d'esllavissades de terra

Els registres històrics d'ocurrència d'esllavissades (Seneritvane et al., 2012) mostren una àmplia variabilitat, a causa d'efectes locals, a incerteses i a efectes indeterminats. Diversos estudis han demostrat que l'elevació de la temperatura de l'aire ha redundat en l'augment de l'activitat, especialment d'esllavissades i allaus de roques i gel i de corriments de runa (Stoffel i Beniston, 2006; Ravelin i Deline, 2011, 2015; Huggel et al., 2012, 2013; Paranzio et al., 2016). Els efectes del canvi global podrien ser encara més importants a les zones particularment vulnerables, com les regions de muntanya. Els canvis futurs de temperatura i de precipitacions podrien modificar la relació entre pluja, neu i gel, que, en última instància, resultarà en canvis en quantitat i estacionalitat. Per tant, els processos naturals controlats pel context hidrometeorològic, i, entre ells, les esllavissades, provocaran noves pressions sobre el medi ambient, tant en els sistemes socials com naturals. L'informe de l'IPCC (2014) indica que *"els fenòmens extrems de precipitació sobre la majoria de les terres en latituds mitjanes i a les regions tropicals humides seran molt probablement més intensos i més freqüents"*. Es confia fermament que aquesta evolució afectarà les esllavissades de terres a algunes regions (Seneviratne et al., 2012). Jomelli (2012), A. Stoffel et al. (2014) i Wood et al. (2016) indiquen que, quan augmenti la freqüència i/o la intensitat de les pluges, també s'espera que augmentin les esllavissades superficials, incloent-hi els desprendiments de roques, els corriments de desfets i les allaus de runa. No obstant això, no es pot trobar una relació entre intensitat de precipitació i desencadenament de caiguda de roques en diversos dels fenòmens documentats a Andorra (Copons, 2004).

Més específicament, les esllavissades de terra poden ser sensibles al canvi climàtic per causa de sis factors relacionats amb el clima (Crozier, 2010): precipitacions totals, intensitat de precipitació, temperatura de l'aire, velocitat i durada del vent, canvis de situació climàtica regional i variabilitat meteorològica resultant. Aquests factors poden afectar diferents processos, com ara la freqüència de les esllavissades. Per exemple, un augment de la intensitat de les precipitacions pot implicar una elevació del nivell freàtic que podria afeblir l'estabilitat del terreny. L'augment de la temperatura i la disminució de les precipitacions poden implicar un augment dels incendis forestals, resultant també en una reducció de l'estabilitat de talussos, a causa de la manca de resistència mecànica de les arrels. L'augment anual de la temperatura en altura pot provocar el

desglaç del pergelisol i el debilitament de la solidesa de les roques a causa de la disminució de les glaceres, provocant l'augment de l'esllavissada de roques. El canvi de velocitat i de durada del vent pot implicar canvis en l'evapotranspiració i, per tant, en la humitat del sòl. En zones de muntanya, aquests fenòmens danyen periòdicament infraestructures crítiques i desbaraten xarxes de transport regionals amb conseqüències socioeconòmiques (Utasse et al., 2016).

A escala dels Pirineus, s'han analitzat les condicions climàtiques i geomorfològiques per explicar l'ocurrència d'esllavissades (Lorente et al., 2002), però poc s'ha fet fins ara sobre la qüestió de l'evolució futura d'aquests fenòmens en relació amb el canvi climàtic. S'espera que la major freqüència i intensitat dels fenòmens meteorològics extrems faci que augmenti l'exposició d'obres d'infraestructura i habitatges davant dels riscos d'inundacions, allaus i esllavissades (ONERC, 2009). El risc d'incendis forestals, a causa de l'elevació de la temperatura mitjana, podria resultar en un augment de processos controlats per la gravetat, com ara l'erosió, les esllavissades i els esfondraments. A més, l'augment de les temperatures i la modificació dels fluxos subterranis també podrien desestabilitzar els sòls. Als Pirineus, l'augment de les esllavissades s'associa amb les pluges torrencials i la desaparició de la vegetació, o la substitució de la vegetació autòctona per una altra menys arrelada. Els plans d'ordenació urbana són, per tant, una eina important per a l'adaptació a l'augment d'aquests fenòmens.

Situación a escala de los Pirineos

A escala de los Pirineos, se han analizado las condiciones climáticas y geomorfológicas para explicar la ocurrencia de deslizamientos (Lorente et al., 2002), pero poco se ha hecho hasta la fecha sobre la cuestión de la evolución futura de estos fenómenos en relación con el cambio climático. Se espera que la mayor frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos aumente la exposición de obras de infraestructura y viviendas a los riesgos de inundaciones, avalanchas y deslizamientos (ONERC, 2009). El riesgo de incendios forestales, debido a la elevación de la temperatura media, podría resultar en un aumento de procesos controlados por la gravedad tales como erosión, deslizamientos y derrumbes. Además, el aumento de las temperaturas y la modificación de los flujos subterráneos también podrían desestabilizar los suelos. En los Pirineos, el aumento de los deslizamientos se asocia con las lluvias torrenciales y la desaparición de la vegetación, o la sustitución de la vegetación autóctona por otra con menor arraigo. Los planes de ordenación urbana son por lo tanto una herramienta importante para la adaptación al aumento de estos fenómenos.

(71) <http://uicn.fr/solutions-fondees-sur-la-nature/>

ENQUADRAMENT 3.4.3. EL PROJECTE SAMCO: "ADAPTACIÓ PER FER FRONT ALS RISCOS DE MUNTANYA EN UN CONTEXTE DE CANVI GLOBAL"

En el projecte SAMCO es va dur a terme una anàlisi a escala local (municipi de Cauterets - França) de l'evolució d'esllavissades a causa del canvi climàtic. Aquest tipus d'anàlisi es pot considerar com una estratègia d'adaptació. Des del portal DRIAS (<http://www.drias-climat.fr>) es van recuperar dos escenaris (RCP 4.5 i 8.5., Model climàtic - ALADIN) les projeccions dels quals mostren una tendència a l'augment d'esdeveniments extrems de precipitacions a curt i llarg termini. Per als punts més alts, les projeccions indiquen un augment de precipitacions totals. Per als punts més baixos, s'anticipa un lleuger augment a curt termini i una petita disminució a llarg termini. Per a les temperatures, les projeccions indiquen un augment significatiu de temperatura a curt (+1,5 °C) i a llarg termini (+4 °C), el que modificarà l'equilibri entre neu i pluja. Les anàlisis de riscos de lliscament s'han fet amb el programari Alice (Baillis et al., 2011; Sedan et al., 2013). El model integra l'anàlisi de l'estabilitat de talussos en 2D i també considera la fluctuació diària de la capa freàtica, simulada amb el model GARDENIA (Nicolle et al., 2014). Per a l'escenari RCP 8.5, es projecta un augment significatiu del nivell freàtic mitjà, especialment entre 2071 i 2100. La Figura 3.4.2 mostra que s'espera un augment del contingut d'aigua del sòl, que indueix una reducció del FS a gran part de la zona estudiada (encara que no sigui un senyal uniforme a la zona), en particular amb el RCP 8.5.

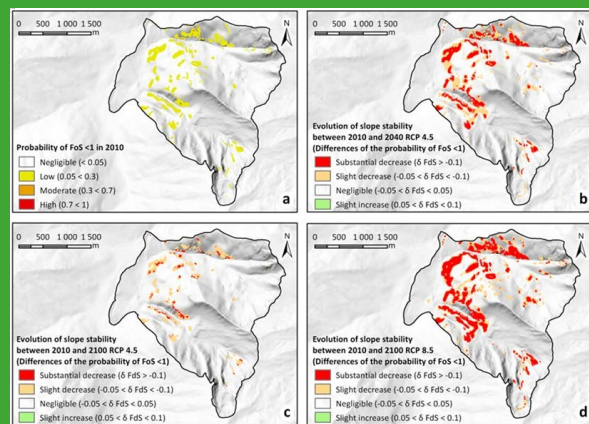


Figura 3.4.2. Evolució de la probabilitat d'esllavissades com a resultat d'un lliscament potencial d'una longitud de 20m i una profunditat d'entre 1 i 1,5m, a partir dels dos escenaris de canvi climàtic més importants diferents: el probable i el possible. La diferència de la probabilitat d'FS és entre 2010-2040 amb l'escenari RCP 4.5, el diferència de la probabilitat d'FS és entre 2010-2100 amb l'escenari RCP 4.5, el diferència de la probabilitat d'FS és entre 2010-2100 amb l'escenari RCP 8.5. Font: Propietat SAOIRIS, 2018.

3.4.4 Majors riscos relacionats amb la degradació del pergelisol

La presència de pergelisol (capes del sòl o del subsòl de 50 cm a 8 m de gruix, permanentment congelades) es deu a l'efecte combinat de diverses condicions: climàtiques (en particular: temperatura, precipitació, vent i radiació solar); topogràfiques ("efectes de barrera" o influència sobre el vent) i locals (mantell nival, cobertura vegetal, disponibilitat d'aigua i tipus de formacions pedogeològiques) (Gruber et al., [2017]). Allen et al. (2016) han cartografiat el pergelisol existent a les muntanyes de l'Himàlaia, districte de Kulluen el

Himachal Pradesh, i han demostrat que l'àrea coberta pel pergelisol és similar a la de les glaceres en la seva àrea d'estudi i que, per tant, els riscos associats amb el canvi climàtic per a aquest tipus de formació han de ser estudiats. La descongelaçió del pergelisol indueix un risc de desestabilització vinculat a la subsidència del sòl, provocada per la pèrdua del volum ocupat pel gel, així com per la ruptura de l'equilibri mecànic que controla el procés d'esllavissades o desprendiments de roques (en el cas de la fosa de les glaceres de roca), fins i tot a baix gradient (Gruber et al., 2017). Cal prendre aquest tipus de risc molt seriosament a l'Himàlaia, però també és important estudiar-lo a les muntanyes europees, a

causa del desenvolupament de les activitats recreatives i esportives a aquestes àrees (Kaab et al. [2005] i Boeckli et al. [2012]). La majoria dels estudis sobre aquest tipus de riscos a muntanyes d'Europa es refereixen als Alps. Ravanel i Delile (2011), seguits per Krautblatter et al. (2012) han registrat una sèrie d'esdeveniments on la caiguda de blocs està potencialment vinculada a la descongelaçió o degradació del pergelisol. Bodin et al. (2016) van estudiar la degradació d'una glacera de roca i el desencadenament de fluxos de lava torrencial associats. Keiler i Fuchs (2016) presenten una anàlisi retrospectiva sobre el vincle entre la fosa del pergelisol i l'exposició al risc als Alps austríacs. Magnin et al. (2017) van estudiar l'evolució de l'estat del pergelisol al massís del Mont Blanc, des de la Petite Edat de Gel (1300-1850) fins a l'actualitat; després van proposar una projecció per l'any 2100, on conclouen un augment en la freqüència de futurs grans esdeveniments d'enfonsament en entorns glacials.

Als Pirineus, el pergelisol és monitorat a petites extensions i a zones de més altitud (majoritàriament, per sobre dels 2700 m). Es pot observar in situ, però també indirectament, a través d'indicadors com ara les glaceres de roca (Serrano et al., 2009 i 2010, i González García, 2014). Serrano et al. (2009) han proposat un mapatge del pergelisol que combina les observacions in situ, la topografia, la radiació solar i la temperatura de l'aire al massís del Pirineu espanyol (.5.3). Aquest mapatge mostra les àrees (en altituds sempre per sobre dels 2000 m) on la formació de pergelisol és possible o probable per les condicions locals, segons l'orientació

dels massissos considerats (menys pergelisol a les parets orientades al nord que cap al sud). A la cara nord-oest de la muntanya Vignemale, on s'ha observat un augment d'esdeveniments d'enfonsament durant els últims anys, s'ha instal·lat un sistema de seguiment de l'evolució del pergelisol per comprendre la influència del clima local en els fenòmens de degradació i descongelaçió (Rico et al., 2017).

3.4.5 Allaus

Les allaus varien des de petits esllavissaments que a penes afecten esquiadors, fins a fenòmens catastròfics que posen en perill comunitats o circuits de circulació de muntanya (EAWS, 2016). La formació d'una allau resulta d'interaccions complexes entre el terreny, el mantell nival i les condicions meteorològiques, que poden portar al lliscament de neu seca o humida (EEA, 2017a). Segons EEA (2017a), "l'activitat d'allau de neu seca o humida va augmentar entre 1952 i 2013, particularment durant la temporada de mitjan hivern i a alta altitud". La major part dels accidents mortals causats per allaus van ocórrer en territori no controlat (majorment accidents recreacionals); es reporten pocs decessos en territori controlat (urbanitzacions i corredors de transport) (EEA, 2017a). Als Alps, els decessos poden arribar a una mitjana de 100 casos cada hivern. A Catalunya, es reporta una mitjana d'1 a 2 casos mortals des de 1987, cosa que evidencia una tendència a la baixa que pot ser fruit de l'ús creixent d'equipament bàsic de seguretat personal



Figura 3.4.3. Presència, possible i probable, de pergelisol als Pirineus espanyols (modificat de Serrano et al., 2009).

(72) El factor de seguretat (FS) és un índex proporcionat per una simulació mecànica i utilitzat per a la caracterització de l'estabilitat de talussos. Per a FS < 1, el pendent es considera inestable; per a 1 < FS < 1.2, el pendent es considera potencialment inestable; i per a FS > 1.2, el pendent es considera estable.

per a activitats de muntanya (Martin - Vide, 2016). Es va utilitzar la dendrogeomorfologia per a la datació i reconstrucció d'allaus, el que va demostrar que l'hivern de 1995-1996 va ser el més extraordinari en termes d'ocurrència d'allaus de gran magnitud als Pirineus Orientals (Muntan et al., 2009). Un increment estadístic d'aquestes últimes allaus va ser reportat per García-Sellés et al. (2010) i, especialment, d'esdeveniments amb neu humida (Oller et al., 2015) a la mateixa regió. L'evolució futura dependrà de canvis en les característiques del mantell nival i la seva correlació amb allaus. Tal com ho reporta EEA (2017), "la correlació entre freqüència i magnitud de les allaus i el canvi climàtic és encara imprecisa. En general, s'assumeix que els canvis possibles en freqüència d'allaus i magnitud estan correlacionats amb canvis en nivositat, amb una probable reducció dels riscos d'allau a baixes i mitjanes altituds (per causa de l'increment de temperatures a l'hivern), tot i que una major freqüència de fenòmens de precipitació forta pugui contrarestar aquesta tendència (PLANALP, 2016)". Castebrunet et al. (2014) van projectar un augment probable de les allaus d'hivern als Alps Occidentals per sobre dels 2500 m, causat pel possible augment de la freqüència de fortes precipitacions. A l'àrea d'esquí de la regió francesa de Nova Aquitània, la persistència del mantell nival es podria reduir de 3 a 2 mesos a la fi del segle XXI (Li Treut, 2013). Per al mateix horitzó temporal, la freqüència de fenòmens de fortes caigudes de neu podria disminuir per sota de 2000 m i augmentar per sobre d'aquesta altitud, segons López-Moreno et al. (2011).

Per a fins de planificació d'adaptació, les observacions d'allaus (com ara sèries temporals dendrogeomorfològiques, censos poblacionals i aprofitament de dades històriques) es poden usar amb models estadístic-dinàmics amb confiança raonable per a la predicció de distàncies de recorregut d'allaus amb alts períodes de retorn (Schläpky et al., 2014). No obstant això, la incertesa sobre el canvi climàtic futur requereix d'una gestió de riscos activa, juntament amb una combinació de mesures de protecció permanents i temporànies (EEA, 2017a).

3.4.6. Dissenyar una estratègia d'adaptació als riscos naturals en el futur

La capacitat d'adaptació caracteritza la capacitat d'ajust d'un territori al canvi climàtic (que inclou la variabilitat climàtica i els esdeveniments extrems)

per tal de mitigar els danys potencials, aprofitar les oportunitats o afrontar les conseqüències. Adaptar-se a perills futurs associats amb esdeveniments naturals requereix combinar mesures de reducció dels perills actuals i mesures per afrontar els impactes del clima sobre la seva evolució futura. Tot i que s'identifiquen generalment bé els perills actuals en documents de planificació, pocs d'ells consideren la seva evolució futura.

Alguns projectes 73 estan estudiant les interaccions entre els processos ambientals i socials en els territoris pirinencs, en el context de transformacions territorials i canvi climàtic. Els Pirineus han patit importants transformacions territorials (disminució de la demografia i de les activitats agropastorals, desenvolupament del turisme). Això planteja la qüestió de la forma en què les comunitats locals perceben aquests canvis i la relació que estableixen entre perills naturals i canvi climàtic. Els resultats preliminars d'una enquesta a les valls d'Aspe i d'Ossau (Béarn, FR) mostren que els canvis ambientals són fets establerts per a la majoria dels entrevistats (autoritats, habitants), el que demostren utilitzant indicadors com ara escurçament del període de neu, augment de les tempestes o episodis de sequera, o, fins i tot, la presència considerada inusual en altura d'espècies animals i vegetals. No obstant això, vincular el canvi climàtic i els riscos naturals no és tan fàcil per als representants electes entrevistats. De fet, la major part del temps tendeixen a fer-se ressò de les incerteses científiques. Així, la qüestió de l'adaptació continua sent marginal en els plans per a la prevenció dels riscos naturals de muntanya previsibles (PPR), que, a més, són sovint disputats (inclosos els límits de zonificació i la metodologia utilitzada) pels assentaments i els residents afectats. No obstant això, a Andorra, els documents de planificació tenen en compte les situacions extremes, com ara la zonificació oficial del risc de fluxos de deixalles, on es pren com a referència l'escenari de pitjor cas de canvi climàtic

3.4.7 Conclusions i recomanacions

Reptes principals

Els coneixements actuals sobre la possible influència del canvi climàtic sobre els perills associats amb els principals riscos naturals que poden trobar-se al Pirineu han estat presentats en aquest capítol. Aquests

coneixements encara es veuen afectats per una incertesa considerable, especialment relacionada amb la funció decisiva de l'evolució futura de la urbanització i de les polítiques de turisme, l'ocupació i l'ús dels sòls, la localització i l'exposició de les infraestructures. En general, semblen existir poques iniciatives de nivell regional o local en relació amb els riscos naturals que incloguin sistemàticament el concepte d'adaptació al canvi climàtic. Això podria explicar-se, d'una banda, per la manca de coneixement dels fenòmens considerats i, d'altra banda, pel fet que les mesures d'adaptació es troben moltes vegades integrades dins de mesures d'abast més general (protecció de les poblacions, producció d'aliments, manteniment o enfortiment de l'activitat econòmica i industrial a les zones de muntanya) (OPCC, 2013).

Recomanacions

De manera general, es recomana enfocar l'adaptació a l'escala de gestió dels interessos afectats pel tipus de risc natural considerat (OPCC, 2013). A aquestes escales (generalment locals), l'enfocament ha d'incloure la caracterització de la vulnerabilitat actual del territori (importància i ubicació de les poblacions i les infraestructures exposades) al risc natural considerat i la seva evolució futura (Fuchs et al., 2017). El projecte Climadapt proporciona un catàleg d'exemples 75 de mesures d'adaptació, algunes de les quals es refereixen a esdeveniments extrems i alts nivells d'aigua i inundacions, encara que cap d'elles s'apliqui al context específic de muntanya. La Comissió Europea recomana sotmetre les mesures adoptades a un test de "revisió climàtica", per assegurar que la seva adequació a les futures condicions climàtiques sigui satisfactòria. També promou el concepte de "presa de decisió robusta" (Lempert et al., 2003), que la considera com a tal si ofereix bons resultats, independentment del possible futur i de les incerteses. Les mesures robustes poden ser: 1) mesures "sense remordiments" (que proporcionen beneficis en tots els casos, i, sovint, a curt termini); 2) mesures amb "marges de seguretat", que poden ser abandonades o ampliades sense pèrdua de la inversió inicial (com ara la construcció d'un dic fàcilment desmuntable); 3) mesures "flexibles i reversibles", com la implementació de sistemes d'alerta, que poden adaptar-se en funció de les conseqüències dels esdeveniments observats; 4) mesures "toves" (descrites més avall); i 5) mesures per "reduir l'horitzó de temps" (preferir les infraestructures de curta durada). Això implica que un pla d'adaptació que consisteix en

ENQUADRAMENT 3.4.4. GUIA D'ACOMPANYAMENT: "EL CLIMA: ACONSEGUIR UN CANVI REEXITAT"⁷⁴

Els membres del Grup de Reflexió i Acció per a l'Adaptació als efectes del Canvi Climàtic (GRAACC), animat per Rhône-Alpes Energia Ambiental, han publicat un document que presenta les principals etapes d'execució d'un projecte territorial d'adaptació al canvi climàtic per a les regions alpestres. Després d'una explicació sintètica dels impactes previstos en el marc de l'estudi MEDCIE (2008), s'identifiquen les principals oportunitats i amenaces per a la regió Rhône-Alps, així com les orientacions aplicades per a l'adaptació. Després, la guia documenta en detall un enfocament per a la construcció d'aquestes estratègies, fins i tot arribant a proposar models de plecs d'especificacions per als contractistes que estarien a càrrec de la caracterització de la vulnerabilitat del territori als canvis climàtics. Finalment, es discuteix la definició de l'estratègia d'adaptació, recordant els principis bàsics i assenyalant els elements essencials per a la seva aplicació.

una sola mesura pot ser menys robust que un pla que incorpora una diversitat de mesures, encara que aquest últim sigui més costós.

Mesures soft⁷⁶

Les mesures no-estructurals (soft) aprofiten pràctiques i polítiques d'informació, divulgació i educació, evitant construccions físiques. El pla PNACC (MEDDTL, 2011), per exemple, convida a millorar el coneixement de l'impacte del canvi climàtic sobre els riscos naturals i, en particular, a dur a terme un inventari de les mesures existents de prevenció d'inundacions; a elaborar mapes de riscos naturals; a crear eines d'ajuda a la decisió i, al mateix temps, a integrar les projeccions climàtiques. També és recomanable substituir els valors de referència per al clima de la normativa vigent, o els períodes de retorn per a esdeveniments (en l'actualitat, basats en 30 anys d'estadístiques), per valors que representin el context del clima futur, amb l'ajuda d'eines de modelització (CGET, 2015). Cal mantenir, ampliar o optimitzar els sistemes d'observació dels diferents riscos naturals per monitorar millor en altituds i/o zones de difícil accés, que seran més fortament afectats per l'augment de la temperatura (entorns

(73) El programa Cesar - programa d'adaptació i canvi ambiental a la regió, i el programa en curs RiTTA - Riscos i Transformacions Territorials a Aquitània han estat finançats pel Consell Regional de Nova Aquitània.

(74)

<http://orecc.auvergnerhonealpes.fr/fr/publications/outils-et-methodes/guide-climat-reussir-le-changement.html>

(75) <http://climate-adapt.eea.europa.eu/knowledge/tools/sat>

peri-nivo-glacials). Els sistemes de monitoratge també han de permetre obtenir dades amb més resolució temporal i precisió (monitoratge continu i en temps real) i sobre els compartiments físics en els quals tenen lloc els processos (per exemple, temperatura i humitat als sòls). Així mateix, el càlcul mitjançant modelació de valors llinars en què es basen els sistemes d'alerta primerenca també ha de considerar-les projeccions climàtiques. Els operadors d'aquests sistemes de vigilància i alerta han de sistematitzar el recull de l'experiència dels esdeveniments registrats, per tal de millorar els procediments. Els territoris han de poder tenir accés a serveis climàtics que proporcionin informació detallada i sintètica, rellevant per a la seva situació futura (CGET, 2015). Finalment, la distribució futura de la població i de les infraestructures en un territori també ha de limitar la seva exposició als riscos naturals. Sobre les activitats d'esplai a les muntanyes: per a una millor prevenció per a les poblacions que les practiquen, sembla necessari, en llocs turístics, exposar mapes d'informació sobre l'estat actual i futur dels perills (pluges extremes, inundacions, esllavissades, allaus i llaus, desprendiments de roques i els fenòmens relacionats amb la degradació de la criosfera). També seria útil compilar localment inventaris d'estructures essencials per a l'ús públic que presenten una vulnerabilitat. Això implica el desenvolupament d'una cultura del risc, i de fer-la extensiva a tots els nivells de gestió: col·lectivitats, barris i zones d'activitats comercials i industrials, empreses i fonts d'ocupació, entorns educatius (ONERC, 2007). Aquesta cultura del risc ha d'integrar les incerteses sobre l'evolució d'esdeveniments futurs, preparar-se per a ells, si és possible, mitjançant l'aplicació d'enfocaments robustos de presa de decisions.

Mesures verdes ⁷⁷

Les mesures verdes (basades en solucions naturals, NBSs) es defineixen com les solucions que són "inspirades i mantingudes per la natura, rendibles, que proporcionen beneficis alhora ambientals, socials i econòmics, i que contribueixen a enfortir la resiliència" (UE, 2015). En l'actualitat, poques mesures d'aquest

tipus s'apliquen als riscos naturals i a les regions de muntanya. Entre elles, es poden utilitzar els boscos que estableixen les formacions superficials generadores d'inundacions torrencials i esllavissades de terra (exemple de la reducció de fenòmens torrencials i esdeveniments de flux de deixalles mitjançant el repoblament i/o la reforestació en els Apenins centrals d'Itàlia (Gariano i Guzzetti, 2016). En termes de control d'inundacions, el PNUE (2014) recomana augmentar la capacitat d'emmagatzematge de l'aigua (conques i zones urbanes), augmentar la capacitat de cabal dels canals (reducció de la velocitat de propagació de les avingudes), ampliar els tampons riberencs, fer servir el repoblament i/o la reforestació i conservar els boscos, reconnectar els rius a les planes al·luvials, restaurar/conservar i crear zones humides i establir desviaments d'inundació. L'AAE (2017a) també recomana afavorir el desbordament en certes seccions dels rius, amb l'objectiu de reduir l'alçada d'inundació total o d'allunyar els dics de la llera del riu. Per al control del vessament pluvial urbà, el PNUE també recomana teulades verdes, espais verds (permetent bioretenció i infiltració), recol·lecció d'aigua i paviments permeables (mesures "grises", que han de, però, afavorir els ecosistemes aquàtics). El portal de la Direcció General de Medi Ambient de la UE 78 presenta els beneficis d'algunes d'aquestes mesures. Per acabar, el projecte PHUSICOS, un projecte europeu que es va iniciar l'any 2018, recopilarà, desenvoluparà i experimentarà NBSs, per reduir riscos hidrometeorològics a zones de muntanya. Aquest projecte contribuirà a proposar mesures verdes adequades al context pirinenc, ja que alguns dels seus casos d'estudi estan localitzats als Pirineus francesos i espanyols.

Mesures grises ⁷⁹

Les solucions infraestructurals "grises" de protecció davant els riscos naturals són atractives, ja que poden brindar impactes immediats i d'alta visibilitat. No obstant això, també presenten inconvenients, ja que la seva construcció, operació, manteniment i reemplaçament pot resultar costós. D'altra banda, poden desviar i ampliar el risc natural cap a altres

(76) Les mesures soft o mesures no estructurals per reduir o pal·liar els efectes negatius del canvi climàtic. Aquesta categoria de mesura està típicament representada pels estudis d'investigació enfocats a cobrir llacunes de coneixement o per enriquir les bases de coneixement sobre el canvi climàtic, els seus impactes i els sectors més vulnerables. També trobem en aquesta categoria el desenvolupament de metodologies i sistemes específics per reduir riscos derivats del canvi climàtic (p. e. desenvolupament d'un early warning system transfronterer per a la gestió de les onades de calor al massís).

(77) Les mesures verdes o basades en serveis ecosistèmics inclouen totes les mesures, bones pràctiques, estudis o iniciatives que tinguin com a principi l'ús dels serveis ecosistèmics que ofereixen els diferents recursos naturals per pal·liar els efectes negatius del canvi climàtic (p. e. pràctiques silviculturals conservadores per augmentar la capacitat dels boscos dels Pirineus per reduir els riscos hidrogeològics).

ubicacions que no estiguin preparades per afrontar-lo, o poden conduir a la degradació dels ecosistemes (per exemple, desconnectar els rius de les planes) (PNUE, 2014). Les mesures estructurals impliquen la construcció de defenses físiques (per exemple, murs, pilons, drenatges, conques de retenció), que s'han dissenyat tenint en compte el tipus i la magnitud del perill considerat i un període de retorn de referència per a l'esdeveniment anticipat. Les infraestructures defensives existents, ja siguin simples (per exemple, un mur de retenció, un embassament o un drenatge) o múltiples (per exemple, un sistema de barreres/dics de retenció o un conjunt de drenatges en un pendent o un conjunt de dics de contenció en una conca de captació) poden requerir modificacions per tal d'adequar-se a les condicions climàtiques futures projectades (Gariano i Guzzetti (2016)). Pot ser necessari, per exemple, elevar els dics, ampliar les superfícies d'expansió d'avingudes o crear grans estanys de retenció o, fins i tot, adaptar els sistemes de depuració d'aigües residuals dels municipis grans per als nivells més alts de precipitació. També poden adoptar-se mesures intermèdies, com ara la neteja de clavegueres i cunetes. Normalment, el període de retorn, o la freqüència d'ocurrència esperada per a l'esdeveniment considerat, es determina suposant una sèrie de temps estacionària d'esdeveniments (com ara un registre d'esllavissades de terra o d'inundacions) o de desencadenadors (com ara un registre d'esdeveniments de precipitació o desglaç). En el marc d'un clima en evolució, la hipòtesi estacionària pot no ser vàlida. D'aquesta manera, Gariano i Guzzetti (2016) recomanen l'adopció d'un enfocament pragmàtic per resoldre problemes, basant-se en l'experiència (registres històrics), les informacions existents i noves (monitoratge) i els mitjans moderns de càlcul i de modelització que incloguin la incertesa inherent als escenaris climàtics futurs. Finalment, també es pot considerar l'ús d'incentius econòmics, per exemple, per limitar la implantació d'infraestructures i poblacions en zones de risc, per exemple, vinculant les primes d'assegurança amb l'exposició al risc. Un informe de l'EEA del 2017 (EEAb, 2017) ofereix diversos exemples de finançament per a accions basades en la naturalesa o en els ecosistemes i altres accions d'adaptació, incloent-hi fonts de finançament convencionals i innovadores com ara els bons verds i el *crowdfunding*.

(78) <http://nwrn.eu/measures-catalogue>

(79) Les mesures Grey o infraestructurals, són totes les mesures que basen la seva acció pal·liativa en la construcció o implantació d'elements infraestructurals concrets (com per exemple, la construcció de dics a les zones habitades amb un elevat risc d'inundacions torrencials)

IDES CLAU

En un horitzó de temps difícil de determinar amb precisió (entre 2030 i el final del segle), el territori pirinenc podria haver d'adaptar-se a les situacions següents:

- Augment de temperatures màximes i mínimes, onades de calor i episodis de sequera, que seran potencialment més llargs i més intensos;
- Augment de l'ocurrència de pluges intenses i de la intensitat dels episodis de calamarsa;
- Augment del risc associat a les inundacions, tot i que el senyal encara no s'ha definit amb certesa i depèn del probable augment de la vulnerabilitat de les poblacions i les infraestructures, especialment a les zones turístiques costaneres i als cursos d'aigua contigus;
- Possible debilitació de l'estabilitat de pendents, producte de l'evolució futura de les precipitacions, combinada a la de la temperatura, i per la fusió o degradació del pergelisol;
- Possible disminució de l'ocurrència de les allaus en altures baixes i mitjanes, a causa de l'augment de la temperatura;

En termes d'adaptació a aquestes situacions futures, es recomana incloure en els documents de planificació i/o d'adaptació els coneixements existents sobre els impactes del canvi climàtic sobre els riscos naturals i una estimació de la vulnerabilitat del territori a aquests riscos. En la mesura del possible, també es recomana sotmetre les accions que es planifiquin a una revisió climàtica, que n'asseguri l'adequació al context climàtic futur. Els plans d'adaptació s'han de concebre amb l'objectiu de permetre una presa de decisions robusta, incorporant i/o combinant diferents tipus de mesures, soft, verdes i grises, en funció del context geogràfic i de les incerteses associades al canvi climàtic sobre el territori considerat.

Bibliografia

1 Clima i Variabilitat Climàtica als Pirineus

1.1 El clima del període glacial i la deglaciació

- Bartolomé, M., Moreno, A., Sancho, C., Stoll, H.M., Cacho, I., Spötl, C., Belmonte, A., Edwards, R.L., Cheng, H., Hellstrom, J.C., 2015. Hydrological change in Southern Europe responding to increasing North Atlantic overturning during Greenland Stadial 1. PNAS. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1503990112>.
- Cisneros, M., Cacho, I., Frigola, J., Canals, M., Masqué, P., Martrat, B., Casado, M., Grimalt, J.O., Pena, L.D., Margaritelli, G., Lirer, F., 2016. Sea surface temperature variability in the central-western Mediterranean Sea during the last 2700 years: a multi-proxy and multi-record approach. *Clim. Past* 12, 849–869.
- CLIVAR Report: Pérez, F.; Boscolo, Roberta (eds.). 2010. Climate in Spain: past, present and future. Regional climate change assessment report. [Madrid] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN), 83 pp.
- Corella, J.P., Valero-Garcés, B.L., Vicente-Serrano, S.M., Brauer, A., Benito, G., 2016. Three millennia of heavy rainfalls in Western Mediterranean: frequency, seasonality and atmospheric drivers. *Scientific Reports* 6. 38206; doi: 10.1038/srep38206
- Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y., Braucher, R., Bourlès, D. 2011. Palaeogeography and 10Be exposure age chronology of Middle and Late Pleistocene glacier systems in the northern Pyrenees: implications for reconstructing regional palaeoclimates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 305, 109–122. Doi: 10.1016/j.palaeo.2011.02.025.
- García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Peña-Monné, J.L., Sancho, C., Rhodes, E.J., Valero-Garcés, B., González-Sampériz, P., Moreno, A. 2013. Glacial and fluvial deposits in the Aragón Valley, Central-Western Pyrenees: Chronology of the Pyrenean late Pleistocene glaciers- *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography* 95, 15–32. Doi: 10.1111/j.1468-0459.2012.00478.x.
- Giralt, S., Moreno, A., Cacho, I., Valero-Garcés, B.L. 2017. A comprehensive overview of the last 2,000 years Iberian Peninsula climate history, CLIVAR Exchanges No. 73, 5–10.
- González-Sampériz, P., Valero-Garcés, B.L., Moreno, A., Jalut, G., García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Delgado-Huertas, A., Navas, A., Otto, T., Dedoubat, J.J. 2006. Climate variability in the Spanish Pyrenees during the last 30,000 yr revealed by the El Portalet sequence. *Quaternary Research* 66, 38–52. Doi : 10.1016/j.qres.2006.02.004.
- González-Sampériz, P.; Aranbarri, J.; Pérez-Sanz, A.; Gil-Romera, G.; Moreno, A.; Leunda, M.; Sevilla-Callejo, M.; Corella, J.P.; Morellón, M.; Oliva, B.; Valero-Garcés, B. 2017. Environmental and climate change in the southern Central Pyrenees since the Last Glacial Maximum: A view from the lake records. 2017. *Catena* 149, 668 – 688.
- Leunda, M. González-Sampériz, P., Gil-Romera, G. Aranbarri J., Moreno, A., Oliva-Urcia, B., Sevilla-Callejo M., y Valero-Garcés, B. 2017. The Late-Glacial and Holocene Marboré Lake sequence (2612 m a.s.l., Central Pyrenees, Spain): Testing high altitude sites sensitivity to millennial scale vegetation and climate variability *Global and Planetary Change* 157: 214–231
- Lewis, C.J., McDonald, E.V., Sancho, C., Peña, J.L., Rhodes, E.J. 2009. Climatic implications of correlated Upper Pleistocene glacial and fluvial deposits on the Cinca and Gállego Rivers (NE Spain) based on OSL dating and soil stratigraphy. *Global and Planetary Change* 61, 300–312. Doi:10.1016/j.gloplacha.2009.01.001.
- López Moreno, J.I. (2000). Los glaciares del alto valle del Gállego (Pirineo Central) desde la Pequeña Edad del Hielo. Implicaciones en la evolución de la temperatura. *Geoforma Ediciones, Logroño*, 77 pp.
- Millet L., D. Rius,, D. Galop, O. Heiri, S.J. Brooks 2012. Chironomid-based reconstruction of Lateglacial summer temperatures from the Ech palaeolake record (French western Pyrenees). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 315–316: 86–99
- Morellón, M., Pérez-Sanz, A., Corella, J.P., Büntgen, U., Catalán, J., González-Sampériz, P., González-Trueba, J.J., López-Sáez, J.A., Moreno, A., Pla-Rabes, S., Saz-Sánchez, M.Á., Scussolini, P., Serrano, E., Steinhilber, F., Stefanova, V., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B., 2012. A multi-proxy perspective on millennium-long climate variability in the Southern Pyrenees. *Clim. Past* 8, 683–700.
- Moreno, A., Pérez, A., Frigola, J., Nieto-Moreno, V., Rodrigo-Gámiz, M., Martrat, B., González-Sampériz, P., Morellón, M., Martín-Puertas, C., Corella, J.P., Belmonte, Á., Sancho, C., Cacho, I., Herrera, G., Canals, M., Grimalt, J.O., Jiménez-Espejo, F., Martínez-Ruiz, F., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B.L., 2012. The Medieval Climate Anomaly in the Iberian Peninsula reconstructed from marine and lake records. *Quaternary Science Reviews* 43, 16–32.
- Oliva, M., J. Ruiz-Fernández, M. Barriendos, G. Benito, J.M. Cuadrat, F. Domínguez-Castro, J.M. García-Ruiz, S. Giralt, A. Gómez-Ortiz, A. Hernández, O. López-Costas, J.I. López-Moreno, J.A. López-Sáez, A. Martínez-Cortizas, A. Moreno, M. Prohom, M.A. Saz, E. Serrano, E. Tejedor, R. Trigo, B. Valero-Garcés, S.M. Vicente-Serrano. 2018. The Little Ice Age in Iberian mountains. *Earth-Science Reviews* 177 (2018) 175–208.
- Palacios, D., García-Ruiz, J.M., Andrés, N., Schimmelpfennig, I., Campos, N., Leanni, L., ASTER Team 2017. Deglaciation in the

- central Pyrenees during the Pleistocene-Holocene transition: Timing and geomorphological significance. *Quaternary Science Reviews* 162, 111–127. Doi:10.1016/j.quascirev.2017.03.007.
- Pallàs, R., Rodés, A., Braucher, R., Bourlès, D., Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y. 2010. Small, isolated glacial catchments as priority targets for cosmogenic surface exposure dating of Pleistocene climate fluctuations, southeastern Pyrenees. *Geology* 38, 891–894. Doi: 20.1130/G31164.1.
- Pla, S., Catalan, J., 2011. Deciphering chrysophyte responses to climate seasonality. *J Paleolimnol* 46, 139–150
- Rius, D., Vannièrre, B. and Galop, D. 2012. Holocene history of fire, vegetation and land use from the central Pyrenees (France). *Quaternary Research* 77: 54–64.

1.2 El clima actual

1.3 Projeccions de canvi climàtic als Pirineus

- Balseinte, R. 1966. Climats montagnards et stations climatiques d'altitude en France. Ministère de l'Éducation Nationale et CNRS. Paris
- Bartolomé, M., Moreno, A., Sancho, C., Stoll, H.M., Cacho, I., Spötl, C., Belmonte, A., Edwards, R.L., Cheng, H., Hellstrom, J.C., 2015. Hydrological change in Southern Europe responding to increasing North Atlantic overturning during Greenland Stadial 1. PNAS. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1503990112>.
- Böhm, R., Auer, I., Schöner, W., Ganekind, M., Gruber, C., Jurkovic, C., Orlik, A. and Ungersböck, M. 2009. Eine neue Webseite mit instrumentellen Qualitäts Klimadaten für den Grossraum Alpen zurück bis 1760. *Wiener Mitteilungen Band 216: Hochwässer: Bmessung, Risikoanalyse und Vorhersage*.
- Bordonau, J.; Serrat, D. y Vilaplana, J.M. (1992): Las fases glaciares cuaternarias en los Pirineos. In: Cearreta, A. y Ugarte, F.M. (eds.): The Late Quaternary in the Western Pyrenean Region. Servicio Editorial Universidad del País Vasco, Bilbao, pp. 303–312.
- Brunet, M., Casado M. J., Castro, M., Galán, M. P., López, J. A., Martín, J. M., Torres, L. 2008. Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. Ministerio de Medio Ambiente Medio Rural y Marino. 158 pp.
- Brunet, M., Jones, P., Sigró, J., Saladié, O., Aguilar, E., Moberg, A., Della-Marta, P.M., Lister, D., Whalther, A. and López, D. 2007. Temporal and spatial temperature variability and change over Spain during 1850–2005. *Journal of Geophysical Research*, 112: D12117.
- Bücher, A. and Dessens J. 1991. Secular trend of surface temperature at an elevated observatory in the Pyrenees. *J. Clim.* 4: 859–868.
- Buisan, S.; Saz, M.A.; López-Moreno, J.I., 2015. Spatial and temporal variability of winter snow and precipitation days in the western and central Spanish Pyrenees. *International Journal of Climatology* 35: 259–274.
- Cisneros, M., Cacho, I., Frigola, J., Canals, M., Masqué, P., Martrat, B., Casado, M., Grimalt, J.O., Pena, L.D., Margaritelli, G., Lirer, F., 2016. Sea surface temperature variability in the central-western Mediterranean Sea during the last 2700 years: a multi-proxy and multi-record approach. *Clim. Past* 12, 849–869. doi:10.5194/cp-12-849-2016
- CLIVAR Report: Pérez, F.; Boscolo, Roberta (eds.). 2010. Climate in Spain: past, present and future. Regional climate change assessment report. [Madrid] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN), 83 pp.
- Copons, R., Bordonau, J. 1997: El registro glaciar correspondiente a la Pequeña Edad del Hielo en la Península Ibérica. En: Ibañez, J.J., Valero Garcés, B.L. i Machado, C. (Eds.): El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación. *Geoforma ediciones, Logroño*, p. 295–310.
- Corella, J.P., Valero-Garcés, B.L., Vicente-Serrano, S.M., Brauer, A., Benito, G., 2016. Three millennia of heavy rainfalls in Western Mediterranean: frequency, seasonality and atmospheric drivers. *Scientific Reports* 6. doi:10.1038/srep38206
- Creus, J. 1983. El clima del alto Aragón occidental. Instituto de Estudios Pirenaicos, 109. 421 pp.
- Cuadrat, J.M., Serrano, R., Saz, M.A., Tejedor, E., Prohom, M., Cunillera, J., Esteban, P., Soubeyroux, J.M., Deaux, N. 2013. Creación de una base de datos homogeneizada de temperaturas para los Pirineos (1950–2010). *Geographicalia*, 64: 63–74.
- Deaux, A.; Soubeyroux, J.M.; Cuadrat, J.M.; Cunillera, J.; Prohom, M. 2014. Homogénéisation transfrontalière des températures sur le massif des Pyrénées. *Rev. Climatologie*, vol 24 pp: 67–78.
- Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y., Braucher, R., Bourlès, D. 2011. Palaeogeography and 10Be exposure age chronology of Middle and Late Pleistocene glacier systems in the northern Pyrenees: implications for reconstructing regional palaeoclimates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 305, 109–122. Doi: 10.1016/j.palaeo.2011.02.025.
- Durand, Y., Giraud, G., Goetz, D., Malou, M. and Payen, V. 2012. Modeled snow cover in Pyrenees mountains and cross-comparisons between remote-sensed and land-based observation data. *Proceedings, 2012 International Snow Science Workshop, Anchorage*.
- El-Kenawy, A., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., 2011. Recent changes in daily temperature extremes in Northeastern Spain: 1960–2006. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11: 1–21.

- Espejo, F., Ferraz, J. y Palomo, M. 2008. Tendencias recientes en las series de temperatura del Pirineo Central y Occidental. IV Congreso Internacional de la AEC, serie A (6): 99-108.
- Esteban, P., Jones P.D., Martin-Vide, J. and Mases, M. 2005. Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra. Pyrenees. *Int J Climatol* 25:319–329.
- Esteban, P., Prohom, M. y Aguilar, E. 2012. Tendencias recientes e índices de cambio climático de la temperatura y la precipitación en Andorra. *Pirineos* (1935–2008). *Pirineos* 167: 87–106.
- García-Ruiz J.M., López-Moreno, J.I. Serrano-Vicente S., Beguería, S. and Lasanta, T., 2011. Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth Science Reviews* 105 (3-4): 121-139.
- García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Peña-Monné, J.L., Sancho, C., Rhodes, E.J., Valero-Garcés, B., González-Samperiz, P., Moreno, A. 2013. Glacial and fluvial deposits in the Aragón Valley, Central-Western Pyrenees: Chronology of the Pyrenean late Pleistocene glaciers- *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography* 95, 15-32. Doi: 10.1111/j.1468-0459.2012.00478.x.
- García-Ruiz, J.M.; Palacios, D.; González-Sampériz, P.; de Andrés, N.; Moreno, A.; Valero-Garcés, B.; Gómez-Villar, A. 2016. Mountain glacier evolution in the Iberian Peninsula during the Younger Dryas. *Quaternary Science Reviews*; vol: 138: 16 – 30
- Gascoin, S., Hagolle, O., Huc, M., Jarla, L., Dejoux, J.F., Szczypta, C., Marti, R. and Sánchez, R. 2015. A snow cover climatology for the Pyrenees from MODIS snow products. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19: 2337–2351.
- Gilaberte, M., López-Martín, F., Pino-Otín, M. R., and López-Moreno, J. I. 2014. Impacts of climate change on ski industry. *Environmental Science and Policy*, 44:51-61.
- Giralt, S., Moreno, A., Cacho, I., Valero-Garcés, B.L. 2017. A comprehensive overview of the last 2,000 years Iberian Peninsula climate history, *CLIVAR Exchanges* No. 73,5-10.
- González-Sampériz, P., Valero-Garcés, B.L., Moreno, A., Jalut, G., García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Delgado-Huertas, A., Navas, A., Otto, T., Dedoubat, J.J. 2006. Climate variability in the Spanish Pyrenees during the last 30,000 yr revealed by the El Portalet sequence. *Quaternary Research* 66, 38-52. Doi : 10.1016/j.qres.2006.02.004.
- González-Sampériz, P.; Aranbarri, J.; Pérez-Sanz, A.; Gil-Romera, G.; Moreno, A.; Leunda, M.; Sevilla-Callejo, M.; Corella, J.P.; Morellón, M.; Oliva, B.; Valero-Garcés, B. 2017. Environmental and climate change in the southern Central Pyrenees since the Last Glacial Maximum: A view from the lake records. 2017. *Catena* 149, 668 – 688.
- Gottardi F. 2009. Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne. Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement. Application aux grands massifs montagneux français. Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, 261 p.
- Gutiérrez, J.M., Maraun, D., Widman, M., Huth, R., Hertig, E., Benestad, Pagé, C. 2017. An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: Results from the VALUE perfect predictor cross-validation experiment. *Int. J. Climatol.* (en prensa).
- IPCC: Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Leunda, M. González-Sampériz, P., Gil-Romera, G. Aranbarri J., Moreno, A., Oliva-Urcia, B., Sevilla-Callejo M., y Valero-Garcés, B. 2017. The Late-Glacial and Holocene Marboré Lake sequence (2612 m.a.s.l., Central Pyrenees, Spain): Testing high altitude sites sensitivity to millennial scale vegetation and climate variability. *Global and Planetary Change* 157: 214-231
- Lewis, C.J., McDonald, E.V., Sancho, C., Peña, J.L., Rhodes, E.J. 2009. Climatic implications of correlated Upper Pleistocene glacial and fluvial deposits on the Cinca and Gállego Rivers (NE Spain) based on OSL dating and soil stratigraphy. *Global and Planetary Change* 61, 300-312. Doi:10.1016/j.gloplacha.2009.01.001.
- López Moreno, J.I. 2000. Los glaciares del alto valle del Gállego (Pirineo Central) desde la Pequeña Edad del Hielo. Implicaciones en la evolución de la temperatura. *Geoforma Ediciones, Logroño*, 77 pp.
- López Moreno, J.I., Goyette, S. and Beniston, M. 2008. Climate change prediction over complex areas: spatial variability of uncertainties and prediction over the Pyrenees from a set of regional climate models. *Int. J. Climatol.* 28 (11): 1535–1550.
- López Moreno, J.I., Goyette, S., Vicente Serrano, S. and Beniston, M. 2011. Effects of climate change on the intensity and frequency of heavy snowfall events in the Pyrenees. *Climatic Change*, 105 (3-4): 489-508.
- López-Moreno, J.I. 2005. Recent variations of snowpack depth in the Central Spanish Pyrenees. *Artic, Antarctic, and Alpine Research*, 37 (2): 253-260.
- López-Moreno, J.I. and Serrano-Vicente, S.M. 2006. Atmospheric circulation influence on the interannual variability of snowpack in the Spanish Pyrenees during the second half of the twentieth century. *Nordic Hydrology* 38 (1):38-44.
- López-Moreno, J.I. and Vicente-Serrano, S.M. 2007. Atmospheric circulation influence on the interannual variability of snowpack in the Spanish Pyrenees during the second half of the twentieth century. *Nord. Hydrol.* 38 (1): 38–44.
- López-Moreno, J.I., Goyette, S., Beniston, M. 2009. Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. *Journal of Hydrology* 374 (3-4), 384-396.
- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano S.M., Morán-Tejeda E., Lorenzo J., Kenawy, A. and Beniston, M. 2011. NAO effects on combined temperature and precipitation winter modes in the Mediterranean mountains: Observed relationships and

- projections for the 21st century. *Global and Planetary Change* 77: 72-66.
- Maris, M., Giraud, G., Durand, Y., Navarre, J. P. and Mérindol, L., 2009. Results of 50 years of climate reanalyses in the French Pyrenees (1958-2008) using the SAFRAN and CROCUS models. Davos: International Snow Science Workshop, Proceedings.
- Mestre, O., Domonkos, P., Picard, F., Auer, I., Robin, S., Lebarbier, E., Böhm, R., Aguilar, E., Guijarro, J., Vertachnik, G., Klancar, M., Gubuisson, B. and Stepanek, P. 2013. HOMER: a homogenization software – methods and applications. *Quart. Jour. of the Hungarian Meteorological Service* 117: 47-67.
- Millet L., D. Rius, D. Galop, O. Heiri, S.J. Brooks 2012. Chironomid-based reconstruction of Lateglacial summer temperatures from the Ech palaeolake record (French western Pyrenees). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 315–316: 86–99
- Miquel C., 2012. Étude préliminaire sur les changements climatiques dans le massif des Pyrénées. Caractérisation et effets prévisibles sur la ressource en eau. Mémoire présenté pour l'obtention du titre d'Ingénieur, Polytech' Montpellier. Université de Montpellier II, 152 p.
- Morellón, M., Pérez-Sanz, A., Corella, J.P., Büntgen, U., Catalán, J., González-Sampériz, P., González-Trueba, J.J., López-Sáez, J.A., Moreno, A., Pla-Rabes, S., Saz-Sánchez, M.Á., Scussolini, P., Serrano, E., Steinhilber, F., Stefanova, V., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B., 2012. A multi-proxy perspective on millennium-long climate variability in the Southern Pyrenees. *Clim. Past* 8, 683–700. doi:10.5194/cp-8-683-2012
- Moreno, A., Pérez, A., Frigola, J., Nieto-Moreno, V., Rodrigo-Gámiz, M., Martrat, B., González-Sampériz, P., Morellón, M., Martín-Puertas, C., Corella, J.P., Belmonte, Á., Sancho, C., Cacho, I., Herrera, G., Canals, M., Grimalt, J.O., Jiménez-Espejo, F., Martínez-Ruiz, F., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B.L., 2012. The Medieval Climate Anomaly in the Iberian Peninsula reconstructed from marine and lake records. *Quaternary Science Reviews* 43, 16–32.
- Oliva, M., J. Ruiz-Fernández, M. Barriendos, G. Benito, J.M. Cuadrat, F. Domínguez-Castro, J.M. García-Ruiz, S. Giralt, A. Gómez-Ortiz, A. Hernández, O. López-Costas, J.I. López-Moreno, J.A. López-Sáez, A. Martínez-Cortizas, A. Moreno, M. Prohom, M.A. Saz, E. Serrano, E. Tejedor, R. Trigo, B. Valero-Garcés, S.M. Vicente-Serrano. 2018. The Little Ice Age in Iberian mountains. *Earth-Science Reviews* 177 (2018) 175–208.
- Palacios, D., García-Ruiz, J.M., Andrés, N., Schimmelpfennig, I., Campos, N., Leanni, L., ASTER Team 2017. Deglaciation in the central Pyrenees during the Pleistocene-Holocene transition: Timing and geomorphological significance. *Quaternary Science Reviews* 162, 111-127. Doi:10.1016/j.quascirev.2017.03.007.
- Pallàs, R., Rodés, A., Braucher, R., Bourlès, D., Delmas, M., Calvet, M., Gunnell, Y. 2010. Small, isolated glacial catchments as priority targets for cosmogenic surface exposure dating of Pleistocene climate fluctuations, southeastern Pyrenees. *Geology* 38, 891-894. Doi: 20.1130/G31164.1.
- Peral, C., Navascués, B. y Ramos, P. 2017. Serie de precipitación diaria en rejilla con fines climáticos. Nota técnica de AEMET, nº 24. http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/NT_24_AEMET/NT_24_AEMET.pdf.
- Pérez-Zanón, N., Sigró, J. and Ashcroft, L. 2017. Temperature and precipitation regional climate series over the central Pyrenees during 1910–2013. *Int J Climatol* 37:1922-1937.
- Pla, S., Catalan, J., 2011. Deciphering chrysofyte responses to climate seasonality. *J Paleolimnol* 46, 139. doi:10.1007/s10933-011-9529-6
- Pons, M. López-Moreno, J.I., Rosas-Casals, M. and Comas, J. 2015. The vulnerability of Pyrenean ski resorts to climate-induced changes in the snowpack. *Climatic change*, 131 (4): 591-605.
- Pons, M., Johnson, A., Rosas-Casals, M., Sureda, B. and Jover, E. 2012. Modeling climate change effects on winter ski tourism in Andorra. *Clim. Res.* 54(3):197–207.
- Renssen H, Seppä H, Crosta X, et al. (2012) Global characterization of the Holocene Thermal Maximum. *Quat Sci Rev* 48:7–19. doi: 10.1016/j.quascirev.2012.05.022.
- Rius, D., Vannièrre, B. and Galop, D. 2012. Holocene history of fire, vegetation and land use from the central Pyrenees (France). *Quaternary Research* 77:54-64.
- Soubeyroux J.-M., Jourdain S., Grimal D., Espejo F., Esteban P., Merz T., 2011. Approche transfrontalière pour l'inventaire et la valorisation des données climatologiques sur le Massif des Pyrénées. Colloque SHF « Eaux en montagne », Lyon, 7 p.
- Soubeyroux, J.M., Jourdain S., Grimal, D., Espejo, F., Esteban, P. et Merz T. 2011. Approche transfrontalière pour l'inventaire et la valorisation des données climatologiques sur le Massif des Pyrénées. Colloque SHF « Eaux en montagne », Lyon, 7 p.
- Spagnoli, B., Planton, S., Mestre, O., Déqué, M. and Moisselin, J. M., 2002. Detecting climate change at a regional scale: the case of France. *Geophys. Res. Lett.*, 29-10: 91-94.
- Verfaillie et al., 2017. The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, *GMD*, 10, 4257-4283. doi : 10.5194/gmd-10-4257-2017.
- Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., Lejeune, Y. y Morin, S., 2018. Multi-components ensembles of future meteorological and natural snow conditions in the Northern French Alps, *The Cryosphere*, <https://doi.org/10.5194/tc-2017-267>
- Vicente-Serrano, S.M. y López-Moreno, J. 2008. The nonstationary influence of the North Atlantic Oscillation on European precipitation. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*. 113, D20120.

- Vicente-Serrano, S.M.; López-Moreno, J. y Beguería, S. 2007. La precipitación en el Pirineo español: diversidad espacial en las tendencias y escenarios futuros. *Pirineos*, 162: 43-69.

2 L'Impacte del CC en els sectors biofísics

2.1 El canvi climàtic durant l'Holocè

- Beguería, S., López-Moreno, J.I., Lorente, A., Seeger, M., García-Ruiz, J.M. 2003. Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *Ambio* 32: 283-286.
- Benito, G., Thorndyraft, V.R., Rico, M., Sánchez-Moya, Y., Sopeña, A., 2008. Palaeoflood and floodplain records from Spain: evidence for long-term climate variability and environmental changes. *Geomorphology* 101, 68-77.
- Camarero, J.J., García-Ruiz, J.M., Sangüesa-Barreda, G., Galván, J.D., Alla, A.Q., Sanjuán, Y., Beguería, S., Gutiérrez, E. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 47 (4): 773-783.
- Corella J.P. B.L. Valero-Garcés, F. Wang, A. Martínez-Cortizas, C.A. Cuevas, A. Saiz-Lopez., 2017. 7 00 years reconstruction of mercury and lead atmospheric deposition in the Pyrenees (NE Spain) *Atmospheric Environment* 155: 97-107
- Corella, J.P., Stefanova, V., El Anjoumi, A., Rico, E., Giral, S., Moreno, A., Plata-Montero, A., Valero-Garcés, B.L., 2013. A 2500-year multi-proxy reconstruction of climate change and human activities in northern Spain: The Lake Arreo record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 386, 555-568.
- Corella, J.P., Valero-Garcés, B.L., Vicente-Serrano, S.M., Brauer, A., Benito, G., 2016. Three millennia of heavy rainfalls in Western Mediterranean: frequency, seasonality and atmospheric drivers. *Scientific Reports* 6, 38206; doi: 10.1038/srep38206
- Galop, D., Rius D., Cugny, C. i Mazier, F. 2013. A history of long-term Human – Environment interactions in the French Pyrenees inferred from pollen data. In Lozny L.R. (ed). *Continuity and Change in cultural adaptation to mountain environments*. Studies in Human Ecology and Adaptation 7. Springer, p : 19-30.
- Gil-Romera G., González-Sampériz P. Lasheras-Álvarez L., Miguel Sevilla-Callejo M., Moreno A. Valero-Garcés B., López-Merino, L., Carrión, J., Pérez Sanz A., Aranbarri J., García-Prieto Fonce, E. 2014. Biomass-modulated fire dynamics during the last glacial-interglacial transition at the Central Pyrenees (Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 402 : 113 - 124
- García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Lasanta, T., Vicente-Serrano, S.M., González-Sampériz, P., Valero-Garcés, B.L., Sanjuán, Y., Beguería, S., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., Gómez-Villar, A. 2015. Los efectos geoecológicos del Cambio Global en el Pirineo Central español: Una revisión a distintas escalas espaciales y temporales. *Pirineos* 170, e012. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2015>.
- García-Ruiz, J.M., Palacios, D., De Andrés, N., Valero-Garcés, B.L., López-Moreno, J.I., Sanjuán, Y. 2014. Holocene and 'Little Ice Age' glacial activity in the Marboré Cirque, Monte Perdido Massif, Central Spanish Pyrenees. *The Holocene* 24: 1439-1452.
- García-Ruiz, J.M.; Palacios, D.; González-Sampériz, P.; de Andrés, N.; Moreno, A.; Valero-Garcés, B.; Gómez-Villar, A. 2016. Mountain glacier evolution in the Iberian Peninsula during the Younger Dryas. *Quaternary Science Reviews*, 138: 16-30
- Giral, S., Moreno, A., Cacho, I. i Valero-Garcés, B.L. 2017. A comprehensive overview of the last 2,000 years Iberian Peninsula climate history, *CLIVAR Exchanges* No. 73, 5-10
- González-Sampériz, P.; Aranbarri, J.; Pérez-Sanz, A.; Gil-Romera, G.; Moreno, A.; Leunda, M.; Sevilla-Callejo, M.; Corella, J.P.; Morellón, M.; Oliva, B.; Valero-Garcés, B. 2017. Environmental and climate change in the southern Central Pyrenees since the Last Glacial Maximum: A view from the lake records. *Catena* 149 : 668-688.
- Leunda, M., González-Sampériz, P.; Gil-Romera, G.; Aranbarri, J.; Moreno, A.; Oliva-Urcia, B.; Sevilla, M.; Valero-Garcés, B.L. 2017. The Late-Glacial and Holocene Marboré Lake sequence (2612 m a.s.l., Central Pyrenees, Spain): Testing high altitude sites sensitivity to millennial scale vegetation and climate variability. *Global and Planetary Change* 157: 214-231 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.08.008>)
- López-Moreno, J. I., Revuelto, J., Rico, I., Chueca-Cía, J., Julián, A., Serreta, A., Serrano, E., Vicente-Serrano, S. M., Azorín-Molina, C., Alonso-González, E., and García-Ruiz, J.M., 2016 : Thining of the Monte Perdido Glacier in the Spanish Pyrenees since 1981. *The Cryosphere* 10, 681-694.
- Mayewski PA, Rohling EE, Stager JC et al. 2004. Holocene climate variability. *Quaternary Research* 62: 243-255.
- Montserrat, J. 1992. Evolución glacial y postglacial del clima y la vegetación en la vertiente sur del Pirineo: Estudio palinológico. Instituto Pirenaico de Ecología, Zaragoza, 147 pp.
- Morellón, M., Pérez-Sanz, A., Corella, J.P., Büntgen, U., Catalán, J., González-Sampériz, P., González-Trueba, J.J., López-Sáez, J.A., Moreno, A., Pla-Rabes, S., Saz-Sánchez, M.Á., Scussolini, P., Serrano, E., Steinhilber, F., Stefanova, V., Vegas-Vilarrúbia, T., Valero-Garcés, B., 2012. A multi-proxy perspective on millennium-long climate variability in the Southern Pyrenees. *Clim. Past* 8, 683-700.
- Morellón, M. Valero-Garcés, B., Vegas-Villarrubia, T., González-Sampériz, P., Romero, O., Delgado-Huertas, A., Mata, P., Moreno, A., Rico, Mayte, Corella, J.P. 2009. Lateglacial and Holocene palaeohydrology in the western Mediterranean region: The Lake Estanya record (NE Spain). *Quaternary Science Review*, 28 : 2582-2599

- Oliva-Urcia, B.; Leunda, M., Moreno, A.; Valero-Garcés, B., González-Sampériz, P., Gil-Romera, G., Mata, M. P., HORDA Group. 2018. Last deglaciation and Holocene environmental change at high altitude in the Pyrenees: the geochemical and paleomagnetic record from Marboré Lake (N Spain). *Journal of Paleolimnology* <https://doi.org/10.1007/s10933-017-0013-9>
- Oliva, M., J. Ruiz-Fernández, M. Barriendos, G. Benito, J.M. Cuadrat, F. Domínguez-Castro, J.M. García-Ruiz, S. Giral, A. Gómez-Ortiz, A. Hernández, O. López-Costas, J.I. López-Moreno, J.A. López-Sáez, A. Martínez-Cortizas, A. Moreno, M. Prohom, M.A. Saz, E. Serrano, E. Tejedor, R. Trigo, B. Valero-Garcés, S.M. Vicente-Serrano. 2018. The Little Ice Age in Iberian mountains. *Earth-Science Reviews* 177: 175-208
- Pérez-Sanz, A., P. González-Sampériz, A. Moreno, B. Valero-Garcés, G. Gil-Romera, M. Rieradevall, P. Tarrats, L. Lasheras-Álvarez, M. Morellón, A. Belmonte, C. Sancho, M. Sevilla-Callejo, A. Navas. 2013. Holocene climate variability, vegetation dynamics and fire regime in the Central Pyrenees: the Basa de la Mora sequence (NE Spain). *Quaternary Science Reviews* 73: 149-179
- Pla, S., Catalan, J., 2011. Deciphering chrysophyte responses to climate seasonality. *J Paleolimnol* 46, 139-150.
- Rius, D., Vannière, B. and Galop, D. 2012. Holocene history of fire, vegetation and land use from the central Pyrenees (France). *Quaternary Research* 77: 54-64
- Vicente-Serrano S.M. y Juan I. López-Moreno 2008: The nonstationary influence of the North Atlantic Oscillation on European precipitation. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*. 113, D20120, doi:10.1029/2008JD010382.

2.2 Biodiversitat de muntanya: fauna

- Alexander, Jake i Chalmandrier, Loïc i Lenoir, Jonathan i Burgess, Treena i Essl, Franz i Haider, Sylvia i Kueffer, Christoph i Mcdougall, Keith i Milbau, Ann i Nuñez, Martín i Pauchard, Anibal i Rabitsch, Wolfgang i Rew, Lisa i Sanders, Nathan i Pellissier, Loïc. (2017). Lags in the response of mountain plant communities to climate change. *Global Change Biology*. 24.10.1111/gcb.13976.
- Araújo, M. B., Alagador, D., Cabeza, M., Nogués-Bravo, D., i Thuiller, W. (2011). Climate change threatens European conservation areas. *Ecology letters*, 14(5), 484-492.
- Barrett, R. T. (2014). Has climate change resulted in a mismatch between the spring arrival of the Common Cuckoo *Cuculus canorus* and its hosts in North Norway?.
- Benadi, G., Hovestadt, T., Poethke, H. J., i Blüthgen, N. (2014). Specialization and phenological synchrony of plant-pollinator interactions along an altitudinal gradient. *Journal of Animal Ecology*, 83(3), 639-650.
- Bichet, C., Ferrandiz-Rovira, M., Claramunt, B., Figueroa, I. et al. Multiple geographic origins and high genetic differentiation of the Alpine marmots reintroduced in the Pyrenees. (2016) *Conservation Genetics*. DOI: 10.1007/s10592-016-0851-4
- Briedis, M., Beran, V., Hahn, S., i Adamík, P. (2016). Annual cycle and migration strategies of a habitat specialist, the Tawny Pipit *Anthus campestris*, revealed by geolocators. *Journal of Ornithology*, 157(2), 619-626.
- Buisan, S. T., Saz, M. A., i López-Moreno, J. I. (2015). Spatial and temporal variability of winter snow and precipitation days in the western and central Spanish Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 35(2), 259-274.
- Capdevila-Argüelles L., B. Zilletti i V.A. Suárez Álvarez (2011). Cambio climático y especies exóticas invasoras en España. Diagnóstico preliminar y bases de conocimiento sobre impacto y vulnerabilidad. Documento de síntesis. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid, 17 pág.
- Caruso, N. M., Sears, M. W., Adams, D. C., i Lips, K. R. (2014). Widespread rapid reductions in body size of adult salamanders in response to climate change. *Global Change Biology*, 20(6), 1751-1759.
- Catalan, J., Ninot, J. M., i Aniz, M. M. (2017). The High Mountain Conservation in a Changing World. In *High Mountain Conservation in a Changing World* (pp. 3-36). Springer, Cham.
- Charmantier, A., i Gienapp, P. (2014). Climate change and timing of avian breeding and migration: evolutionary versus plastic changes. *Evolutionary Applications*, 7(1), 15-28.
- Cubas, J., Martín-Esquivel, J. L., Nogales, M., Irl, S. D., Hernández-Hernández, R., López-Darias, M., ... i González-Mancebo, J. M. (2017). Contrasting effects of invasive rabbits on endemic plants driving vegetation change in a subtropical alpine insular environment. *Biological Invasions*, 1-15.
- Dastansara, N., Vaissi, S., Mosavi, J., i Sharifi, M. (2017). Impacts of temperature on growth, development and survival of larval Bufo (Pseudepidalea) viridis (Amphibia: Anura): implications of climate change. *Zoology and Ecology*, 1-7.
- de Pous, P., Montori, A., Amat, F., i Sanuy, D. (2016). Range contraction and loss of genetic variation of the Pyrenean endemic newt *Calotriton asper* due to climate change. *Regional environmental change*, 16(4), 995-1009.
- Flousek, J., Telenský, T., Hanzelka, J., i Reif, J. (2015). Population trends of Central European montane birds provide evidence for adverse impacts of climate change on high-altitude species. *PLoS one*, 10(10), e0139465.
- García-González, R., Aldezabal, A., Laskurain, N. A., Margalida, A., i Novoa, C. (2016). Factors affecting diet variation in the Pyrenean rock ptarmigan (*Lagopus muta pyrenaica*): Conservation implications. *PLoS one*, 11(2), e0148614.
- Garcia, R. A., Cabeza, M., Rahbek, C., i Araújo, M. B. (2014). Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. *Science*, 344(6183), 1247579.

- Green, D. M. (2017). Amphibian breeding phenology trends under climate change: Predicting the past to forecast the future. *Global change biology*, 23(2), 646-656.
- Gordo, O., i Sanz, J. J. (2005). Phenology and climate change: a long-term study in a Mediterranean locality. *Oecologia*, 146(3), 484-495.
- Herrera, J. M., Ploquin, E. F., Rodríguez-Pérez, J., i Obeso, J. R. (2014). Determining habitat suitability for bumblebees in a mountain system: a baseline approach for testing the impact of climate change on the occurrence and abundance of species. *Journal of biogeography*, 41(4), 700-712.
- Kolářová, E., Matiu, M., Menzel, A., Nekovář, J., Lumpe, P., i Adamík, P. (2017). Changes in spring arrival dates and temperature sensitivity of migratory birds over two centuries. *International journal of biometeorology*, 61(7), 1279-1289.
- Kourkgy, C., Garel, M., Appolinaire, J., Loison, A., i Toigo, C. (2016). Onset of autumn shapes the timing of birth in Pyrenean chamois more than onset of spring. *Journal of Animal Ecology*, 85(2), 581-590.
- McCarty, J. P., Wolfenbarger, L. L., i Wilson, J. A. (2017). Biological impacts of climate change. eLS.
- Martínez-Freiria, F. (2015). Assessing climate change vulnerability for the Iberian viper *Vipera seoanei*. *Basic and Applied Herpetology*, 29, 61-80.
- Miller-Struttman, N. E., Geib, J. C., Franklin, J. D., Kevan, P. G., Holdo, R. M., Ebert-May, D., ... i Galen, C. (2015). Functional mismatch in a bumble bee pollination mutualism under climate change. *Science*, 349(6255), 1541-1544.
- Møller, A.P., Rubolini, D., i Lehtikoinen, E. (2008). Populations of migratory birds that did not show a phenological response to climate change are declining. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 105: 16195–16200.
- Morán-Tejeda, E., López-Moreno, J. I., i Sanmiguel-Valladolid, A. (2017). Changes in climate, snow and water resources in the Spanish Pyrenees: observations and projections in a warming climate. In *High Mountain Conservation in a Changing World* (pp. 305-323). Springer, Cham.
- Morueta-Holme, N., Fløjgaard, C., i Svenning, J. C. (2010). Climate change risks and conservation implications for a threatened small-range mammal species. *PloS one*, 5(4), e10360.
- Novoa, C., Astruc, G., Desmet, J. F., i Besnard, A. (2016). No short-term effects of climate change on the breeding of Rock Ptarmigan in the French Alps and Pyrenees. *Journal of Ornithology*, 157(3), 797-810.
- Ornosa, C., Torres, F., i De la Rúa, P. (2017). Updated list of bumblebees (Hymenoptera: Apidae) from the Spanish Pyrenees with notes on their decline and conservation status. *Zootaxa*, 4237(1), 41-77.
- Pacifici, M., Foden, W. B., Visconti, P., Watson, J. E., Butchart, S. H., Kovacs, K. M., ... i Corlett, R. T. (2015). Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change*, 5(3), 215.
- Palomo, I. (2017). Climate change impacts on ecosystem services in high mountain areas: A literature review. *Mountain Research and Development*, 37(2), 179-187.
- Panuccio, M., Martín, B., Morganti, M., Onrubia, A., i Ferrer, M. (2017). Long-term changes in autumn migration dates at the Strait of Gibraltar reflect population trends of soaring birds. *Ibis*, 159(1), 55-65.
- Parmesan C. (2006) Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 37: 637–669. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100
- Pauchard, A., Milbau, A., Albiñ, A., Alexander, J., Burgess, T., Daehler, C., ... i Haider, S. (2016). Non-native and native organisms moving into high elevation and high latitude ecosystems in an era of climate change: new challenges for ecology and conservation. *Biological Invasions*, 18(2), 345-353.
- Petitpierre, B., McDougall, K., Seipel, T., Broennimann, O., Guisan, A., i Kueffer, C. (2016). Will climate change increase the risk of plant invasions into mountains?. *Ecological Applications*, 26(2), 530-544.
- Phillimore, A.B., Hadfield, J.D., Jones, O.R., Smithers, R.J. (2010). Differences in spawning date between populations of common frog reveal local adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 8292-8297.
- Piracés, V. J., López-Flores, R., i Pérez-Collazos, E. (2015). Estudio poblacional y biométrico del tritón pirenaico en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. *Lucas Mallada. Revista de Ciencias*, (17), 177-195.
- Pound, J.A., Bustamante, M.R., Coloma, L.A., Consuegra, J.A., Fogden, M.P.L., Foster, P.N., La Marca, E., Masters, K.L., Merino-Viteri, A., Puschendorf, R., Ron, S.R., Sanchez-Azofeifa, G.A., Still, C.J., Young, B.E. (2006). Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, 439, 161-167.
- Prodon, R., Geniez, P., Cheylan, M., Devers, F., Chuine, I., i Besnard, A. (2017). A reversal of the shift towards earlier spring phenology in several Mediterranean reptiles and amphibians during the 1998-2013 warming slowdown. *Global change biology*.
- Pysek, P., Genovesi, P., Pergl, J., Monaco, A., i Wild, J. (2013). Plant invasions of protected areas in Europe: An old continent facing new problems. In L. C.
- Rasmont, P., Franzén, M., Lecocq, T., Harpke, A., Roberts, S. P., Biesmeijer, J. C., ... i Gonseth, Y. (2015). Climatic risk and distribution atlas of European bumblebees (pp. 236-p). Sofia: Pensoft.
- Romo, H., García-Barros, E., Márquez, A. L., Moreno, J. C., i Real, R. (2014). Effects of climate change on the distribution of ecologically interacting species: butterflies and their main food plants in Spain. *Ecography*, 37(11), 1063-1072.

- Rousselet, J., Zhao, R., Argal, D., Simonato, M., Battisti, A., Roques, A., i Kerdelhué, C. (2010). The role of topography in structuring the demographic history of the pine processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera: Notodontidae). *Journal of biogeography*, 37(8), 1478-1490
- Sánchez-Fernández, D., Rizzo, V., Cieslak, A., Faille, A., Fresneda, J., i Ribera, I. (2016). Thermal niche estimators and the capability of poor dispersal species to cope with climate change. *Scientific reports*, 6, 23381.
- Schmitt, T., Habel, J. C., Rödder, D., i Louy, D. (2014). Effects of recent and past climatic shifts on the genetic structure of the high mountain Yellow-spotted ringlet butterfly *Erebia manto* (Lepidoptera, Satyrinae): a conservation problem. *Global change biology*, 20(7), 2045-2061.
- Schweiger, O., Settele, J., Kudrna, O., Klotz, S., i Kühn, I. (2008). Climate change can cause spatial mismatch of trophically interacting species. *Ecology*, 89(12), 3472-3479.
- Settele, J., Kudrna, O., Harpke, A., Kühn, I., Van Swaay, C., Verovnik, R., ... i Kühn, E. (2008). Climatic risk atlas of European butterflies (p. 710). Sofia-Moscow: Pensoft.
- Singer, M. C., i Parmesan, C. (2010). Phenological asynchrony between herbivorous insects and their hosts: signal of climate change or pre-existing adaptive strategy?. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 365(1555), 3161-3176.
- Thuiller W, Albert C, Araujo MB, Berry PM, Cabeza M, Guisan A, Hickler T, Midgley GF, Paterson J, Schurr FM, Sykes MT, Zimmermann NE (2008) Predicting global change impacts on plant species' distributions: future challenges. *Perspect Plant Ecol Evol Syst* 9:137–152. doi:10.1016/j.ppees.2007.09.004
- Thuiller W, Lavergne S, Roquet C, Boulangeat I, Lafourcade B, Araujo MB (2011) Consequences of climate change on the tree of life in Europe. *Nature* 470:531–534. doi:10.1038/nature09705
- Toigo, M., Barraquand, F., Barnagaud, J. Y., Piou, D., i Jactel, H. (2017). Geographical variation in climatic drivers of the pine processionary moth population dynamics. *Forest Ecology and Management*, 404, 141-155.
- Vitasse, Y., Signarbieux, C., i Fu, Y. H. (2018). Global warming leads to more uniform spring phenology across elevations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(5), 1004-1008.
- Walther, G. R. (2010). Community and ecosystem responses to recent climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1549), 2019-2024.
- Willisch, C. S., Bieri, K., Struch, M., Franceschina, R., Schnidrig-Petrig, R., i Ingold, P. (2013). Climate effects on demographic parameters in an un hunted population of Alpine chamois (*Rupicapra rupicapra*). *Journal of mammalogy*, 94(1), 173-182.
- Wilson, R. J., Gutiérrez, D., Gutiérrez, J., Martínez, D., Agudo, R., i Monserrat, V. J. (2005). Changes to the elevational limits and extent of species ranges associated with climate change. *Ecology Letters*, 8(11), 1138-1146.

2.3 Biodiversitat de muntanya: flora

- Adler P.B. et al., 2011. Productivity is a poor predictor of plant species richness. *Science* 333, 1750-1753.
- Araújo M.B. et al., 2011. Climate change threatens European conservation areas. *Ecology Letters* 14, 484- 492.
- Baudière A. i Gauquelin T., 2005. Évolution actuelle de la végétation des milieux supraforestiers oriento-pyrénéens. *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse*, 141-2 :5-14.
- Baron J.S. et al., 2009. Options for national parks and reserves for adapting to climate change. *Environmental Management* 44, 1033-1042.
- Beniston M. et al., 1996. The Impacts of Climate Change on Mountain Regions. In *Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Chapter 5, Cambridge University Press, 191-213.
- Bergamini A. et al., 2009. An elevational shift of cryophilous bryophytes in the last century—an effect of climate war-ming? *Diversity and Distributions* 15, 871-879.
- Bodin J. et al., 2013. Shifts of forest species along an elevational gradient in Southeast France: climate change or stand maturation? *Journal of vegetation science*, 24 (2), 269–283
- Bodin J., 2010. Observed changes in mountain vegetation of the Alps during the XXth century: role of climate and land-use changes. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré (Nancy 1), Vandoeuvre-lès-Nancy, FRA, Gottfried Wilhelm Leibniz University of Hanover, DEU. 210p.
- Bonhote J. i Vernet J.L., 1988. La « mémoire des charbonnières”. Essai de reconstitution des milieux forestiers dans une vallée marquée par la métallurgie (Aston, Haute-Ariège). *Revue forestière française*, 40 (3) :197-212.
- Braun-Blanquet, 1948. La végétation alpine des Pyrénées orientales. Etude de phytosociologie comparée, Ed. Instituto español de edafología, ecología y fisiología vegetal, Barcelona. 306 p.
- Brooker R.W., 2006. Plant–plant interactions and environmental change. *New Phytologist* 171, 271-284.
- Callaway R.M. et al., 2002. Positive interactions among alpine plants increase with stress. *Nature* 417, 844- 848.
- Colwell R.K. et al., 2008. Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science* 322,

- 258-261.
- Corriol G. i Mikolajczak A., 2014. Contribution au Prodrome des végétations de France : les Salicetea herbaceae Braun-Blanq. 1948. J. Bot. Soc. bot. France, 68 : 15-49.
 - Estiarte i Peñuelas 2015, Alteration of the phenology of leaf senescence and fall in winter deciduous species by climate change: effects on nutrient proficiency. *Glob Chang Biol.* 21(3):1005-17
 - Eynard M., 1978. Contribution à l'étude écologique de deux groupements végétaux à *Salix herbacea* des environs du col de l'Iseran. *Trav. Sci. Parc Nat. Vanoise* 9 : 25-51.
 - Gallien L. et al., 2016. Is There Any Evidence for Rapid, Genetically-Based, Climatic Niche Expansion in the Invasive Common Ragweed? *PLoS ONE* 11(4): e0152867. doi:10.1371/journal.pone.0152867
 - Galop D i Jalut G., 1994. Differential human impact and vegetation history in two adjacent valleys in the Ariege's basin, southern France, from 3000 BP to the present. *Vegetation History and Archeobotany*, 3, 225-244.
 - Gonin P. (coord.), Fady B., Musch B., Métaillé J.-P., Galop D., de Munnik N., Cunill R., Poublanc S., Abbe J.-L., Corriol G., Sajdak G., Delarue A., Valette P., Drenou Ch. : 2014 - Caractérisation génétique et origine du Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) de Ste Croix Volvestre (Ariège) et du massif pyrénéen. – PNR Pyrénées Ariégeoises, IDF, mai 2014, 160 p.
 - Gottfried M. et al., 2012. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature Climate Change*. DOI: 10.1038/NCLIMATE1329
 - Grabherr, 2003. Alpine vegetation dynamics and climate change - a synthesis of long-term studies and observation. In : Nagy L., Grabherr G., Körner C., Thompson DBA (eds), *Alpine Biodiversity in Europe*. Springer, Berlin, pp. 399-409.
 - Grime J.P. et al., 2000. The response of two contrasting limestone grasslands to simulated climate change. *Science* 5480, 762-765.
 - Grime J.P., 1973. Competitive exclusion in herbaceous vegetation. *Nature* 242, 344-347.
 - Harsch M.A. et al., 2009. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology Letters* 12, 1040-1049.
 - Heegaard et Vand-vik, 2004. Climate change affects the outcome of competitive interactions – an application of principal response curves. *Oecologia* 139 : 459-466.
 - Holzapfel A.M. i Vinebrooke R.D., 2005. Environmental warming increases invasion potential of alpine lake communities by imported species. *Global Change Biology* 11, 2009-2015.
 - Jolly W.M. et al., 2005. Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps. *Geophysical Research Letters* 32 L18409.
 - Jump A.S. et al., 2006. Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology* 12, 2163-2174.
 - Komac B. i Olicard L., 2014. Monitoring protocol for vegetation in the Pyrenees snowfields. *Mountain Research Initiative News*, 8, 16-17.
 - Komac B., Esteban P., Trapero L. i Caritg R., 2016. Modelization of the Current and Future Habitat Suitability of *Rhododendron ferrugineum* Using Potential Snow Accumulation. *PLoS ONE* 11(1):e0147324. doi:10.1371/journal.pone.0147324.
 - Le Bagousse-Pinguet Y., Maalouf J.P., Touzard B. i Michalet R., 2014. Importance, but not intensity of plant interactions relates to species diversity under the interplay of stress and disturbance. *Oikos*, 123: 777–785.
 - Le Treut H. (dir.), 2013, Les impacts du changement climatique en Aquitaine. Un état des lieux scientifique. Presses Universitaires de Bordeaux, LGPA Éditions, Pessac, 369 p.
 - Lefèvre F. i Collin E. (coord.), 2012. La Commission des ressources génétiques forestières (CRGF): regards sur 20 ans d'actions et nouveaux enjeux. *Rendez-vous techniques de l'Office national des forêts*, 36-37: 9-56.
 - Lenoir J. et al., 2010. Going against the flow: potential mechanisms for unexpected downslope range shifts in a warming climate. *Ecography* 33, 295-303.
 - Linderholm H.W., 2006. Growing season changes in the last century. *Agricultural and Forest Meteorology* 137, 1-14.
 - Lluent A., Anadon-Rosell A., Ninot J. M., Grau O. i Carrillo E., 2013, Phenology and seed setting success of snowbed plant species in contrasting snowmelt regimes in the Central Pyrenees, *Flora*, 208 : 220– 231.
 - Mäkinen H. et al., 2002. Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. *Forest Ecology and Management* 171, 243-259.
 - Malaval, S., Dupin, B. i Dantin, G., 2015. Conservation et restauration de la flore dans un contexte anthropisé, quelles solutions ? in : Rey, F., Dutoit, T., Cote, F., Lescourret, F. *Sciences Eaux & Territoires*, 16, 70-74.
 - Marcora P. et al., 2008. The performance of *Polylepis australis* trees along their entire altitudinal range: implications of climate change for their conservation. *Diversity and Distributions* 14, 630-636.
 - Martín-Vide J. (coord. cient.), 2016. Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya (TICCC). Generalitat de Catalunya i Institut d'Estudis Catalans, 626 p.
 - McCain C.M. i Colwell R.K., 2011. Assessing the threat to montane biodiversity from discordant shifts in temperature and precipitation in a changing climate. *Ecology Letters* 14, 1236-1245.

- Menzel A. et al., 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12, 1969-1976.
- Menzel A. i Fabian P., 1999. Growing season extended in Europe, *Nature* 397, 659.
- Michalet R. et al., 2006. Do biotic interactions shape both sides of humped-back models of species richness in plant communities? *Ecology Letters* 9, 767-773.
- Michalet R., Vitasse Y. i Delzon S., 2015. Rôle des interactions plante-plante dans la réponse des forêts au changement climatique : l'exemple des forêts de chêne sessile et de hêtre dans les Pyrénées occidentales. *Innovations Agronomiques* 47 (2015), 97-108.
- Moncorps S. (dir.), 2014. Panorama des services écologiques fournis par les écosystèmes français, étude de cas : les écosystèmes montagnards d'Aquitaine. UICN France, Paris, 40 p.
- Moncorps S. (dir.), 2015. Changement climatique et risques naturels dans les montagnes tempérées. UICN France, Paris, 40 p.
- Pauchard A. et al., 2016. Non-native and native organisms moving into high elevation and high latitude ecosystems in an era of climate change: new challenges for ecology and conservation. *Biol Invasions*, 18 (2), 345–353
- Pauli H. et al., 2004. The GLORIA Field Manual—Multi-Summit Approach (Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg,
- Pauli H. et al., 2012. Recent Plant Diversity Changes on Europe's Mountain Summits. *Science*, 336, 353-355.
- Peñuelas et al., 2013. Evidence of current impact of climate change on life: a walk from genes to the biosphere». *Global Change Biology*, 19, 2303-2338.
- Rivas-Ubach A., Sardans J., Pérez-Trujillo M., Estiarte M. i Peñuelas J., 2012. Strong relationship between elemental stoichiometry and metabolome in plants, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (11) 4181-4186.
- Savva Y. et al., 2006. Interannual growth response of Norway spruce to climate along an altitudinal gradient in the Tatra Mountains, Poland. *Trees - Structure and Function* 20, 735-746.
- Theurillat J.-P. i Guisan A., 2001. Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: A review. *Climatic change* 50, 77-109.
- Thomas C.D., 2010. Climate, climate change and range boundaries. *Diversity and Distributions* 16, 488-495.
- UICN, 2012, Catégories et Critères de la Liste rouge de l'UICN : Version 3.1, Deuxième édition. Gland, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni : UICN. vi + 32pp., Originellement publié en tant que IUCN Red List Categories and Criteria: Version 3.1, Second edition. (Gland, Switzerland and Cambridge, UK: IUCN, 2012).
- Valadon A., 2009. Effets des interventions sylvicoles sur la diversité génétique des arbres forestiers: analyse bibliographique. Office national des forêts, Paris. *Les dossiers forestiers*, 21, 157 p.
- Villar L. i Dendaletche C., 1994. . Pyrenees. France, Spain and Andorra. In Davis S.D., Heywood V. H. i Hamilton A.C. (eds.), *Centres of Plants Diversity. a Guide and Strategy for their Conservation*, Infonnation Press, Oxford, 1: 61-64.
- Vitasse Y. et al., 2009. Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: do within-species populations exhibit similar responses? *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 735-744.
- Vitasse Y. et al., 2010. Quantifying plasticity of leaf phenology in response to temperature for two temperate tree species using transplant experiments. *Functional Ecology* 24, 1211-1218.
- Winkler M. et al., 2016. The rich sides of mountain summits—a pan-European view on aspect preferences of alpine plants. *Journal of biogeography*, 43 (11), 2261–2273

2.4 Boscos

- Ameztegui, A., Coll, L., Brotons, L., i Ninot J.M. (2016) Land-use legacies rather than climate change are driving the recent upward shift of the mountain treeline in the Pyrenees. *Global Ecology and Biogeography* 25(3): 267-273.
- Améztegui, A., Brotons, L., i Coll, L. (2010). Land-use changes as major drivers of mountain pine (*Pinus uncinata* Ram.) expansion in the Pyrenees. *Global Ecology and Biogeography*, 19, 632–641.
- Aussenac, G. (2000). Interactions between forest stands and microclimate: ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science*, 57(3), 287-301.
- BADEAU V., DUPOUEY J.L., CLUZEAU C., DRAPIER J., 2005. Aires potentielles de répartition des espèces forestières d'ici 2100. *Forêt-entreprise*, 162, 25-29.
- Bertrand, R., Lenoir, J., Piedallu, C., Riofrio-Dillon, G., de Ruffray, P., Vidal, C., Pierrat, J.-C., i Gégout, J.-C. (2011). Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature*, 479, 517-520.
- Bontemps, J. D., Hervé, J. C., Leban, J. M., i Dhôte, J. F. (2011). Nitrogen footprint in a long-term observation of forest growth over the twentieth century. *Trees*, 25(2), 237-251.
- Bréda N, Huc R, Granier A, Dreyer E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science* 63: 625–644.
- Bréda, N., i Badeau, V. (2008). Forest tree responses to extreme drought and some biotic events: towards a selection according

- to hazard tolerance?. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(9-10), 651-662.
- Camarero, J. J., i Gutiérrez, E. (2004). Pace and pattern of recent treeline dynamics: response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees. *Climatic change*, 63(1-2), 181-200.
 - Camarero J.J., Bigler C, Linares J.C, Gil-Pelegrín E. (2011). Synergistic effects of past historical logging and drought on the decline of Pyrenean silver fir forests. *For Ecol Manag* 262:759-769
 - Camarero J.J., Gazol A, Sangüesa-Barreda, G, Oliva, J, Vicente-Serrano, S.M. (2015). To die or not to die: early warnings of tree dieback in response to a severe drought. *Journal of Ecology* 103, 44-57
 - Casals P, Baiges T, Bota G, Chocarro C, de Bello F, Fanlo R, Sebastià MT, i Taüll M. (2009). Silvopastoral systems in the Northeastern Iberian Peninsula. A Multifunctional Perspective. In: Rigueiro-Rodríguez A, McAdam JH, Mosquera-Losada MR (Eds) *Agroforestry in Europe: Current Status and Future Prospects*. Cap. 9, pp. 161-181 Springer-Berlag. ISBN 978-1-4020-8271-9.
 - Charru M. (2012) La productivité forestière dans un environnement changeant : caractérisation multi-échelle de ses variations récentes à partir des données de l'inventaire forestier national (IFN) et interprétation environnementale. Mémoire de thèse, INRA, France.
 - Chauvin S., Daubet B., Bertrand P. (2011) – Annexe technique de l'action « Evolutions climatiques et forêts de montagne ». Projet OPCC EFA 235/11.
 - Cheaib, A., Badeau, V., Boe, J., Chuine, I., Delire, C., Dufrene, E., François, C., Gritti, E. S., Legay, M., Pagé, C., Thuiller, W., Viovy, N. and Leadley, P. (2012), Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. *Ecology Letters*, 15: 533-544
 - Courbaud, B., Kunstler, G., Morin, X., i Cordonnier, T. (2010). Quel futur pour les services écosystémiques de la forêt alpine dans un contexte de changement climatique?. *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, (98-4).
 - Daubet, B., De Miguel Magaña, S., Maurette, A. (2007). Livre blanc des forêts pyrénéennes : Pour une gestion durable des Pyrénées. Projet INTERREG SILVAPYR. FORESPIR.
 - Dobbertin, M. (2005). Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *European Journal of Forest Research*, 124(4), 319-333.
 - Drénou, C., Giraud, F., Gravier, H., SABATIER, S., i Caraglio, Y. (2013). Le diagnostic architectural: un outil d'évaluation des sapinières déperissantes.
 - Ferretti, M., Nicolas, M., Bacaro, G., Brunialta, G., Calderisi, M., Croisé, L., Frati, L., Lanier, M., Maccherini, S., Santi, E., i Ulrich, E. (2014). Plot-scale modelling to detect size, extent, and correlates of changes in tree defoliation in French high forests. *Forest Ecology and management*, 311, 56-69.
 - Franceschini T., Charru M. et Constant T. (2012) L'estimation de la biomasse et de la productivité forestières à l'épreuve des changements environnementaux. *Revue Forestière Française*, Numéro1-2012, France.
 - Garcia-Pausas J, Romanyà J, Montané F, Ríos A, Tauli M., Rovira P, Casals P, 2017. Are soil carbon stocks in mountain grasslands compromised by land-use changes?. In Jordi Catalan, Josep M^a Ninot, Merce Aniz (Eds.) *High Mountain Conservation in a Changing World. Advances in Global Change Research 62*. Springer Open Chapter 9, pp. 207 -230
 - González-Olabarria, J. R., Mola-Yudego, B., i Coll, L. (2015). Different factors for different causes: analysis of the spatial aggregations of fire ignitions in Catalonia (Spain). *Risk analysis*, 35, 1197-1209.
 - Gonzalez, J. R., Palahi, M., Trasobares, A., i Pukkala, T. (2006). A fire probability model for forest stands in Catalonia (north-east Spain). *Annals of Forest Science*, 63, 169-176.
 - Gottfried, M., Pauli, H., Futschik, A., Akhalkatsi, M., Barančok, P., Alonso, J. L. B., ... i Krajčič, J. (2012). Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature Climate Change*, 2(2), 111.
 - Goudet, M. (2015). Réseau systématique de suivi des dommages forestiers, quelques informations sur l'état sanitaire de la forêt française. Paris, France: Département de la santé des forêts.
 - Gunderson, L. H. (2000). Ecological resilience—in theory and application. *Annual review of ecology and systematics*, 31(1), 425-439
 - Jump, A. S., Hunt, J. M., i Penuelas, J. (2006). Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology*, 12(11), 2163-2174
 - Kahle, H. P. (Ed.). (2008). *Causes and consequences of forest growth trends in Europe: Results of the recognition project (Vol. 21)*. Brill
 - Kullman, L. (2002). Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes. *Journal of ecology*, 90(1), 68-77
 - Lasanta, T., i Vicente-Serrano, S. M. (2007). Cambios en la cubierta vegetal en el Pirineo aragonés en los últimos 50 años. *Pirineos*, 162, 125-154.
 - Le Treut, H. (2013) Les impacts du changement climatique en Aquitaine. *Dynamiques environnementales*. Presses Universitaires de Bordeaux LGPA-Editions
 - Lebourgeois, F., Drénou, C., Bouvier, M., i Lemaire, J. (2015). Caractérisation de la croissance des chênaies pédonculées atlantiques déperissantes: effets des sécheresses et relation avec l'architecture des houppiers. *Revue Forestières Françaises*,

- 4-2015, 333-351.
- Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., De Ruffray, P., i Brisse, H. (2008). A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *science*, 320(5884), 1768-1771.
 - L. Matias 2012 Cambios en los límites de distribución de especies como consecuencia de las variaciones climáticas. *Ecosistemas* 21 [91-96] AEET, Asociación española de ecología terrestre.
 - Maaf, i IGN (2016). Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines, édition 2015, Résultats. Paris, France: Maaf-IGN.
 - Manion, P. D. (1981). *Tree disease concepts*. Prentice-Hall, Inc..
 - Martínez, I., González-Taboada, F., Wiegand, T., Camarero, J. J., i Gutiérrez, E. (2012). Dispersal limitation and spatial scale affect model based projections of *Pinus uncinata* response to climate change in the Pyrenees. *Global Change Biology*, 18(5), 1714-1724.
 - M.B. García, C.L. Alados¹, R. Antor, J.L. Benito Alonso, J.J. Camarero, F. Carmenta, P. Errea, F. Fillat, R. García-González, J.M. García-Ruiz, M. Gartzia, D. Gómez García, I. Gómez, P. González-Sampérez, E. Gutiérrez, J.J. Jiménez, J.I. López-Moreno, P. Mata, A. Moreno, P. Montserrat, P. Nuche, I. Pardo, J. Revuelto, M. Rieradevall (+), H. Sáiz, P. Tejero, S. Vicente-Serrano, E. Villagrasa, L. Villar, B. Valero-Garcés, (2016), Integrando escalas y métodos LTER para comprender la dinámica global de un espacio protegido de montaña: el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. *Ecosistemas* 25, [19-30]. AEET, Asociación española de ecología terrestre.
 - Montané, F., Casals, P., Tauli, M., Lambert, B., i Dale, M. R. (2009). Spatial patterns of shrub cover after different fire disturbances in the Pyrenees. *Annals of Forest Science*, 66, 1-8.
 - Moriondo, M., Good, P., Durao, R., Bindi, M., Giannakopoulos, C., i Corte-Real, J. (2006). Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area. *Climate Research*, 31, 85-95.
 - Montané F, Rovira P, Casals P. 2007. Shrub encroachment into mesic mountain grasslands in the Iberian peninsula: Effects of plant quality and temperature on soil C and N stocks. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, doi:10.1029/2006GB002853
 - Nageleisen, L.-M. (2014). Quelques indicateurs de la santé des forêts françaises (1989-2014). Paris, France: Département de la santé des forêts.
 - Nageleisen, L.-M., i Goudet, M. (2011). *Manuel de notation des dommages forestiers (symptômes, causes, état des cimes)*. Paris, France: Département de la santé des forêts.
 - Nageleisen, L.-M., i Taillardat, J. (2016). Histoire de la santé des forêts: surveillance sanitaire en forêt et naissance du réseau des correspondants observateurs du Département de la santé des forêts (DSF). Paris, France: Département de la santé des forêts.
 - Nellemann, C., i Thomsen, M. G. (2001). Long-term changes in forest growth: potential effects of nitrogen deposition and acidification. *Water, Air, and Soil Pollution*, 128(3-4), 197-205
 - N. Perez, A. Ferré, J. Carreras, X. Font (2011) Efectos del cambio climático sobre la distribución potencial de los hábitats subalpinos y alpinos del Pirineo Catalán y Andorrano. *Actes del IX coloqui Internacional de Botànica Pirenaica-Cantabrica à Ordino, Andorra*, 329-341
 - ONERC (2015) L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change.
 - Pardo, I., Camarero, J. J., Gutiérrez, E., i García, M. B. (2013). Uncoupled changes in tree cover and field layer vegetation at two Pyrenean treeline ecotones over 11 years. *Plant Ecology i Diversity*, 6(3-4), 355-364
 - Pauli, H., Gottfried, M., Dullinger, S., Abdaladze, O., Akhalkatsi, M., Alonso, J. L. B., ... i Ghosn, D. (2012). Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. *Science*, 336(6079), 353-355
 - Peñuelas, J., i Boada, M. (2003). A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global change biology*, 9(2), 131-140
 - Piedallu, C., Perez, V., Gégout, J. C., Lebourgeois, F., i Bertrand, R. (2009). Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Épicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France.
 - P. Regato (2008) *Adapting to Global Change, Mediterranean Forest*, IUCN, Gland, Switzerland and Malaga, Spain.
 - Rixen C. Wipf S. Non equilibrium in alpine plant assemblages: Shifts in Europe's summit floras. In Jordi Catalan, Josep M^a Ninot, Merce Aniz (Eds.) *High Mountain Conservation in a Changing World. Advances in Global Change Research 62*. Springer Open chapter 12, pp. 207 -230.
 - Roux A., Dhôte J.-F. (Coordinateurs), Achat D., Bastick C., Colin A., Bailly A., Bastien J.-C., Berthelot A., Bréda N., Cauria S., Carnus J.-M., Gardiner B., Jactel H., Leban J.-M., Lobianco A., Loustau D., Meredieu C., Marçais B., Martel S., Moisy C., Pâques L., Picart-Deshors D., Rigolot E., Saint-André L., Schmitt B. (2017). Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, INRA et IGN, 101 p. + 230 p. (annexes).
 - Rouyer, E., Marty, P., i Chauvin, S. (2014). Rapport technique OPCC: Evaluation de l'impact du changement climatique sur l'évolution des écosystèmes forestiers. Toulouse, France: Observatoire Pyrénéen des Changements Climatiques.
 - Ryan, M. G., Binkley, D., i Fownes, J. H. (1997). Age-related decline in forest productivity: pattern and process. In *Advances in ecological research (Vol. 27, pp. 213-262)*. Academic Press.

- Solberg, S., Dobbertin, M., Reinds, G. J., Lange, H., Andreassen, K., Fernandez, P. G., ... i de Vries, W. (2009). Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: a stand growth approach. *Forest Ecology and Management*, 258(8), 1735-1750.
- Spiecker, H., Mielikäinen, K., Köhl, M., i Skovsgaard, J. P. (1996). Growth Trends in European Forests—Studies From 12 Countries. European Forest Institute Research Report 5
- Soubeyroux, J. M., Kitova, N., Blanchard, M., Vidal, J. P., Martin, E., i Dandin, P. (2012). Caractérisation des sècheresses des sols en France et changement climatique: Résultats et applications du projet ClimSec. *La Météorologie*, 78, p-21.
- Thapa, B., Holland, S. M., i Absher, J. D. (2004). The relationship between wildfires and tourist behaviors in Florida: an exploratory study.
- Villiers, T. (2016). Guide de gestion des forêts Pyrénéennes à rôle de protection. Office National des Forêts. 9200-16-GUI-SAM-058.

2.5 Ecosistemes sensibles d'alta muntanya: llacs i torberes

- Arellano, L., P. Fernández, R. Fonts, N. L. Rose, U. Nickus, H. Thies, E. Stuchlík, L. Camarero, J. Catalan, and J. O. Grimalt. 2015. Increasing and decreasing trends of the atmospheric deposition of organochlorine compounds in European remote areas during the last decade. *Atmos. Chem. Phys.* 15:6069-6085.
- Bacardit, M. and L. Camarero. 2010. Modelling Pb, Zn and As transfer from terrestrial to aquatic ecosystems during the ice-free season in three Pyrenean catchments. *Science of The Total Environment* 408:5854-5861.
- Camarero, L., P. Masqué, W. Devos, I. Ani-Ragolta, J. Catalan, H. C. Moor, S. Pla, and J. A. Sanchez-Cabeza. 1998. Historical variations in lead fluxes in the Pyrenees (NE Spain) from a dated lake sediment core. *Water, Air, Soil Pollut.* 105:439-449.
- Camarero, L., Felip, M., Ventura, M., Bartumeus, F. i Catalan, J. (1999) The relative importance of the planktonic food web in the carbon cycle of an oligotrophic mountain lake in a poorly vegetated catchment (Redó, Pyrenees). *J.Limnol.*, 58, 203-212.
- Camarero, L. y J. Catalán. 2012. Atmospheric phosphorus deposition may cause lakes to revert from phosphorus limitation back to nitrogen limitation. *Nat Commun* 3:1118.
- Camarero, L. 2017. Atmospheric Chemical Loadings in the High Mountain: Current Forcing and Legacy Pollution. Pages 325-341 in J. Catalan, J. M. Ninot, and M. Aniz, editors. *High Mountain Conservation in a Changing World*. Springer International Publishing.
- Catalan, J.; Barbieri, M. G.; Bartumeus, F. [et al.] (2009). Ecological thresholds in European alpine lakes. *Freshwater Biology*, 54, p. 2494-2517.
- Catalan, J.; Pla, S.; Rieradevall, M. [et al.] (2002) Lake Redo ecosystem response to an increasing warming in the Pyrenees during the twentieth century. *Journal of Paleolimnology*, 28, p. 129-145.
- Catalan et al. 1993. Chemical composition of disturbed and undisturbed high mountain lakes in the Pyrenees: a reference for acidified sites. *Wat.Res.* 27:133-141.
- Catalan, et al 2006. High mountain lakes: extreme habitats and witnesses of environmental changes. *Limnetica* 25:551-584.
- Felip, M. i Catalan, J. (2000) The relationship between phytoplankton biovolume and chlorophyll in a deep oligotrophic lake: decoupling in their spatial and temporal maxima. *J.Plankton Res.*, 22, 91-105.
- Heras, P., Infante Sánchez, M., Pontevedra-Pombal, X i Novoa-Muñoz, J.C. 2017. Mires and Peatland of Europe. Spain
- Elser, J. J., T. Andersen, J. S. Baron, A.-K. Bergstrom, M. Jansson, M. Kyle, K. R. Nydick, L. Steger, and D. O. Hessen. 2009. Shifts in Lake N:P Stoichiometry and Nutrient Limitation Driven by Atmospheric Nitrogen Deposition. *Science* 326:835-837.
- Le Roux, G, S.V. Hansson, S.V. y Claust. A. 2016. Inorganic Chemistry in the Mountain Critical Zone: Are the Mountain Water Towers of Contemporary Society Under Threat by Trace Contaminants?. In: *Mountain Ice and Water*, p: 131-148. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63787-1.00003-2>
- Mata, M.P., Moreno, A., Oliva-Urcia, B., Valero-Garcés, B., Rico, M.T., 2013. Registro histórico de la contaminación atmosférica por Pb en el Lago de Marboré (PN de Ordesa y Monte Perdido). *Macla*.
- Miró, A., i Ventura, M. (2013). Historical use, fishing management and lake characteristics explain the presence of non-native trout in Pyrenean lakes: Implications for conservation. *Biological Conservation*, 167, 17-24.
- Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M. and Stringer, L. (Eds.) 2008. *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen. 206 p.
- Pla S. y Catalan J. (2005). Chrysophyte cysts from lake sediments reveal the submillennial winter/spring climate variability in the northwestern Mediterranean region throughout the Holocene. *Climate Dynamics*, 24: 263-278.
- Schneider, P. and S. J. Hook. 2010. Space observations of inland water bodies show rapid surface warming since 1985. *Geophys. Res. Lett.* 37:L22405.
- Sommaruga, R., B. Sattler, A. Oberleiter, A. Wille, S. Wögrath-Sommaruga, R. Psenner, M. Felip, L. Camarero, S. Pina, R. Gironés, and J. Catalan. 1999. An in situ enclosure experiment to test the solar UVB impact on plankton in a high-altitude mountain lake.

II. Effects on the microbial food web. *Journal of Plankton Research* 21:859-876.

- Ventura, M., Camarero, L., Buchaca, T., Bartumeus, F., Livingstone, D. M. i Catalan, J. (2000). The main features of seasonal variability in the external forcing and dynamics of a deep mountain lake (Redó, Pyrenees). *J.Limnol.*, 59, 97-108.

2.6 Cicle hidrològic i recursos hídrics

- ACA - Agència Catalana de l'Aigua (2015), Pla de Gestió del Districte de Conca Fluvial de Catalunya 2016-2021. Barcelona: Generalitat de Catalunya.
- AEAG - Agence de l'eau Adour-Garonne, (2011), Changements climatiques et Eaux souterraines. Etat des connaissances sur le bassin Adour-Garonne, 122 p.
- Agarwal, A., Angeles, M.S.D., Bhatia, R., Chéret, I., Davila-Poblete, S., Falkenmark, M., Villarreal, F.G., Jønch-Clausen, T., Kadi, M.A., Kindler, J., Rees, J., Roberts, P., Rogers, P., Solanes, M., Wright, A., 2000. *Integrated Water Resources Management*. Technical Advisory Committee Background Papers, 4. Stockholm, Sweden, Global Water Partnership.
- Agarwal, A., Angeles, M.S.D., Bhatia, R., Chéret, I., Davila-Poblete, S., Falkenmark, M., Villarreal, F.G., Jønch-Clausen, T., Kadi, M.A., Kindler, J., Rees, J., Roberts, P., Rogers, P., Solanes, M., Wright, A., 2000. *Integrated Water Resources Management*. Technical Advisory Committee Background Papers, 4. Stockholm, Sweden, Global Water Partnership.
- Agència Catalana del Aigua (ACA). (2009) *Aigua i canvi climàtic: Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Barcelona, Generalitat de Catalunya.
- Barnett, T. P., J. C. Adam, and D. P. Lettenmaier (2005), Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions, *Nature*, 438(11), 303-309.
- Batalla, R. J.; Gomez, C. M.; Kondolf, G. M. (2004). Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (Northeastern Spain). *Journal of Hydrology*, 290, p. 117-136.
- Beguería S., Campos P., Serrano R., Álvarez A. (2015) Producción, usos, renta y capital ambientales del agua en los sistemas forestales de Andalucía. En: *Biodiversidad, usos del agua forestal y recolección de setas silvestres en los sistemas forestales de Andalucía* (Campos P., Díaz M., eds). *Memorias científicas de RECAMAN*. Volumen 2. Memoria 2.2. Editorial CSIC, Madrid.
- Beguería S., Campos P., Serrano R., Álvarez A., 2015. Producción, usos, renta y capital ambientales del agua en los sistemas forestales de Andalucía. En: *Biodiversidad, usos del agua forestal y recolección de setas silvestres en los sistemas forestales de Andalucía* (Campos P., Díaz M., eds). *Memorias científicas de RECAMAN*. Volumen 2. Memoria 2.2. Editorial CSIC, Madrid.
- Beguería, S., López-Moreno, J. I., Lorente, A., Seeger, M., i García-Ruiz, J. M. (2003). Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 32(4), 283-286.
- Berger, L., R. Speare, H. B. Hines, et al. 2004. Effect of Season and Temperature on Mortality in Amphibians due to Chytridiomycosis. *Australian Veterinary Journal* 82(7):434-439.
- Blaustein, Andrew R., and Joseph M. Kiesecker. 2002. Complexity in Conservation: Lessons from the Global Decline of Amphibian Populations. *Ecology Letters* 5(4):597-608.
- Blaustein, Andrew R., and Joseph M. Kiesecker (2002). Complexity in Conservation: Lessons from the Global Decline of Amphibian Populations. *Ecology Letters* 5(4):597-608.
- Buendía, C., Batalla, R. J., Sabater, S., Palau, A., and Marcé, R. (2016) Runoff Trends Driven by Climate and Afforestation in a Pyrenean Basin. *Land Degrad. Develop.*, 27: 823-838. doi: 10.1002/ldr.2384.
- Buendía, C.; Bussi, G.; Tuset, J. [et al.] (2016). Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment. *Science of the Total Environment*. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.005.
- Caballero, Y., S. Voirin-Morel, F. Habets, J. Noilhan, P. LeMoigne, A. Lehenaff, and A. Boone (2007), Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change, *Water Resour. Res.*, 43, W07448, doi:10.1029/2005WR004192.
- Candela, I.; tamoh, K.; Olivares, G. (2012). «Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain)». *Science of the Total Environment*, 440, p. 253-260.
- Candela, L.; Tamoh, K.; Olivares, G. (2012). «Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain). *Science of the Total Environment*, 440, p. 253-260.
- Clare, Frances C., Julia B. Halder, Olivia Daniel, et al. (2016). Climate Forcing of an Emerging Pathogenic Fungus across a Montane Multi-Host Community. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 371(1709): 20150454.
- Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), 2015, *The Ebro Water Management Plan*. Zaragoza.
- CHE - Confederación Hidrográfica del Ebro (2005). *Evaluación preliminar de la incidencia del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del Ebro (Clave 2005-PH-22-1)*. Oficina de Planificación Hidrológica, Condeferación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza.
- de Mendoza Barberà, Guillermo. *Los macro-invertebrados lacustres y el gradiente altitudinal en los Pirineos*, 2013. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, Dept. de Ecología. <http://hdl.handle.net/2445/45523>.
- Dingman SL (2002) *Physical Hydrology*. 2nd ed. New Jersey, Prentice-Hall.

- Elsen, Paul R., and Morgan W. Tingley. 2015. Global Mountain Topography and the Fate of Montane Species under Climate Change. *Nature Climate Change* 5(8): 772–776.
- Gallart F and Llorens P (2003). Catchment Management under Environmental Change: Impact of Land Cover Change on Water Resources. *Water International*. 28: 334-340
- Gallart, F., Llorens, P., (2003). Catchment management under environmental change: Impact of land cover change on water resources. *Water International*, 28(3), p. 334-340.
- Gallart, F.; Delgado, J.; Beatson, S. J. V. [et al.] (2011). Analysing the effect of global change on the historical trends in water resources in the headwaters of the Llobregat and Ter river basins (Catalonia, Spain). *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, p. 655-661.
- Gallart, Francesc, and Pilar Llorens. "Catchment management under environmental change: impact of land cover change on water resources." *Water International* 28.3 (2003): 334-340.
- Gallart, Francesc, and Pilar Llorens. "Observations on land cover changes and water resources in the headwaters of the Ebro catchment, Iberian Peninsula." *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 29.11 (2004): 769-773.
- García Ruiz, J.M.; Beguería, S.; López-Moreno, J.I.; Lorente Grima, A.; Seeger, M. (2001) Los recursos hídricos superficiales del Pirineo aragonés y su evolución reciente. 192, Geoforma Ediciones, Logroño.
- García-Ruiz JM, López-Moreno JI, Vicente SM, Lasanta-Martínez T, Beguería S. (2011) Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth Science Reviews*, 105(3-4), 121–139.
- Giuntoli I. et Renard B. (2010). Rapport ONEMA–Cemagref: Identification des impacts hydrologiques du changement climatique: constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages.
- Gomà J, Rimet F, Cambra J, Hoffmann L, Ector L. (2005). Diatom Communities and Water Quality Assessment in Mountain Rivers of the Upper Segre Basin (La Cerdanya, Oriental Pyrenees). *Hydrobiologia*. 551(1): 209–225.
- Green, T. R., M. Taniguchi, H. Kooi, J. J. Gurdak, D. M. Allen, K. M. Hiscock, H. Treidel and A. Aureli (2011), Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater, *J. of Hydr.*, 405(3–4), 532-560, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.05.002.
- Habets, F., Boé, J., Déqué, M., Ducharne, A., Gascoin, S., Hachour, A., Martin, E., Pagé, C., Sauquet, E., Terray, L., Thiéry, D., Oudin, L., Viennot, P. (2013), Impact of climate change on the hydrogeology of two basins in northern France, *121 (4)*, 771-785.
- Hari, R.E., D.M. Livingstone, R. Siber, P. Burkhardt-Holm, i H. Güttinger, 2006. Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology*, 12: 10-26.
- Hauer, F. R., J. S. Baron, D. H. Campbell, K. D. Fausch, S. W. Hostetler, G. H. Leavesley, P.R. Leavitt, D. M. McKnight, and J. A. Stanford (1997), Assessment of climate change and freshwater ecosystems of the Rocky Mountains, USA and Canada, *Hydrol. Processes*, 11, 903-924.
- Healy RW i Cook PG (2002) Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal* 10: 91–109.
- Huerta-Fontela M, Galceran MT, Ventura F. (2008). Stimulatory drugs of abuse in surface waters and their removal in a conventional drinking water treatment plant. *Environmental Science and Technology*. 42(18):6809-16
- Hunt, R., Jardine, T., Hamilton, S., Bunn, S., Knowledge, T.R.C., Knowledge, T.R.C., (2012). Temporal and spatial variation in ecosystem metabolism and food web carbon transfer in a wet-dry tropical river. *Freshw. Biol.* 57, 435–450.
- Iglesias A, Garrote L, Flores F, Moneo M. (2007). Challenges to Manage the Risk of Water Scarcity and Climate Change in the Mediterranean. *Water Resources Management*. 21(5): 775–788
- IHOBE-Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco (2017). Colección KLIMATEK: Vulnerabilidad hídrica: de las tendencias del pasado reciente a las del futuro. Informe elaborado por el Grupo de Procesos Hidro-Ambientales de la Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU) (www.ihobe.eus/Publicaciones).
- J. Boé, L. Terray, E. Martin, F. Habets (2009). Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. *Water Resources Research* 45(8).
- J.I. López-Moreno, S.M. Vicente-Serrano, J. Zabalza, J. Revuelto, M. Gilaberte, C. Azorín-Molina, E. Morán-Tejeda, J.M. García-Ruiz, C. Tague. Respuesta hidrológica del Pirineo central al cambio ambiental proyectado para el siglo XXI. *Pirineos*, 169, dec. 2014. ISSN 1988-428.
- Jyrkama IM and Sykes JF (2007). The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed. *Journal of Hydrology* 338: 237–250.
- K. Stahl, H. Hisdal, J. Hannaford, L. Tallaksen, H. Van Lanen. (2010) Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 2367–2382.
- Kim, J. H.; Jackson, R. B. (2012). A global analysis of groundwater recharge for vegetation, climate, and soils. *Vadose Zone Journal*, 11(1). DOI: 10.2136/vzj2011.0021RA.
- Kovach RP, Gharrett AJ, Tallmon DA. Genetic change for earlier migration timing in a pink salmon population. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2012; 279(1743):3870-3878. doi:10.1098/rspb.2012.1158.
- Kuusisto E (1984) Snow accumulation and snow melt in Finland. Helsinki Finland, National Board of Waters, Publications of the Water Research Institute 55.
- Le Treut, H. (2013) Les impacts du changement climatique en Aquitaine: un état des lieux scientifique. Pessac: Presses

- Universitaires de Bordeaux: LGPA-Editions, 365 p. (Dynamiques environnementales, HS 2013).
- Le Treut, H. Les impacts du changement climatique en Aquitaine: un état des lieux scientifique. Presses universitaires de Bordeaux; 2013.
- Lee LJE, Lawrence DSL and Price M (2006) Analysis of water level response to rainfall and implications for recharge pathways in the Chalk aquifer, SE England. *Journal of Hydrology* 330: 604–620.
- Lespinas F, Ludwig W, Heussner S (2014) Hydrological and climatic uncertainties associated with modeling the impact of climate change on water resources of small Mediterranean coastal rivers. *Journal of Hydrology* 511:403–422.
- Lespinas, F., Ludwig, W. i Heussner, S. (2010). Impact of recent climate change on the hydrology of coastal Mediterranean rivers in Southern France. *Climatic Change* 99:425, <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9668-1>.
- López-Moreno, J. I. (2005). Recent variations of snowpack depth in the Central Spanish Pyrenees. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37(2), 253-260.
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Moran-Tejeda, E., Zabalza, J., Lorenzo-Lacruz, J., and García-Ruiz, J. M. (2011) Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the Ebro basin, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 311–322.
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Moran-Tejeda, E., Zabalza, J., Lorenzo-Lacruz, J., and García-Ruiz, J. M. (2011) Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the Ebro basin, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 311-322, <https://doi.org/10.5194/hess-15-311-2011>.
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Zabalza, J., Revuelto, J., Gilaberte, M., Azorín-Molina, C., Morán-Tejeda, E., García-Ruiz, J. M. i Tague, C. (2014). Respuesta hidrológica del Pirineo central al cambio ambiental proyectado para el siglo XXI. *Pirineos*, 169, e004.
- López-Moreno, J.I. (2005). Recent variations of snowpack depth in the Central Spanish Pyrenees. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37(2), 253–260.
- Lopez-Moreno, J.I., Goyette, S., Beniston, M. (2009). Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. *Journal of Hydrology*, 374(3–4), 384–396.
- Manzano, A. (2009a). Exemples de modelització hidrològica en règim mitjà dels rius catalans en escenaris futurs. In: *Aigua i canvi climàtic: Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Agència Catalana de l'Aigua, p. 127-141
- Marcarelli, A., Van Kirk, R., Baxter, C., 2010. Predicting effects of hydrologic alteration and climate change on ecosystem metabolism in a western U.S. river. *Ecol. Appl.* 20, 2081–2088.
- Martin-Vide, J.M. (coord.) (2016), Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya, Barcelona, Government of Catalonia, ISBN 978-84-9965-317-4, 615 p.
- Mas-Pla, J. (2005). «Recursos hídricos, dinámica hidrológica i canvi climàtic». A: Llebot, J.E. (ed.) *Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Barcelona: Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible: Institut d'Estudis Catalans, p. 485-516.
- Matthew J. Troia, Michael A. Denk, Keith B. Gido. Temperature-dependent performance as a driver of warm-water fish species replacement along the river continuum. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2016, 73:394-405, <https://doi.org/10.1139/cjfas-2015-0094>.
- Meaurio, M. (2017). Assessing the hydrological response from an ensemble of climate projection in the transition zone of the Atlantic region (Bay of Biscay). Evaluation of SWAT model performance in small and forested catchments (Tesis doctoral no publicada). University of the Basque Country.
- Murray, Kris A., Richard W. R. Retallick, Robert Puschendorf, et al. 2011. Assessing Spatial Patterns of Disease Risk to Biodiversity: Implications for the Management of the Amphibian Pathogen, *Batrachochytrium Dendrobatidis*: Spatial Patterns of Disease Risk. *Journal of Applied Ecology* 48(1): 163–173.
- Nogués-Bravo, D., M.B. Araújo, M.P. Errea, and J.P. Martínez-Rica. 2007. Exposure of Global Mountain Systems to Climate Warming during the 21st Century. *Global Environmental Change* 17(3–4): 420–428.
- Ortuño, f.; Jódar, J.; carrera, J. (2009). «Canvi climàtic i recàrrega d'aqüífers a Catalunya. A: agència catalana de l'aigua. Aigua i canvi climàtic. Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya. Barcelona: Generalitat de Catalunya: Agència Catalana de l'Aigua, p. 143-152.
- P. Quintana-Seguí, A. Ribes, E. Martin, F. Habets, J. Boé. (2010) Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. *Journal of Hydrology*, 383(1–2), 111–124.
- Pascual, D., Pla, E., Lopez-Bustins, J. A., et al. (2014). Impacts of climate change on water resources in the Mediterranean Basin. *Hydrological Sciences Journal*. DOI: 10.1080/02626667.2014.947290.
- Pérez-Zanón Nuria, Javier Sigró, Linden Ashcroft, (2017). Temperature and precipitation regional climate series over the central Pyrenees during 1910-2013. *International Journal of Climatology*; 37 (4): 1922 DOI: 10.1002/joc.4823
- Petrovic M, Ginebreda A, Acuna V, Batalla RJ, Elosegi A, Guasch H, de Alda ML, Marce R, Munoz I, Navarro-Ortega A et al. (2011). Combined scenarios of chemical and ecological quality under water scarcity in Mediterranean rivers. *Trac-Trends in Analytical Chemistry*. 30(8):1269-1278
- Piotrowski, Jeffrey S., Seanna L. Annis, and Joyce E. Longcore. 2004. Physiology of *Batrachochytrium Dendrobatidis*, a Chytrid

- Pathogen of Amphibians. *Mycologia* 96(1): 9.
- Plan Hidrológico del Ebro 2015-2021, Confederación Hidrográfica del Ebro, Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente. Real Decreto 1/2016, de 8 de enero, BOE» núm. 16, de 19 de enero de 2016, páginas 2972 a 4301. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Rutulis, M (1989) Groundwater drought sensitivity of southern Manitoba. *Canadian Water Resources Journal* 4: 18–33.
- Samper, J., García Vera, M.A., Pisani, B., Alvares, D., Varela, A., y Losada, J.A. (2005). Modelos hidrológicos y Sistemas de Información Geográfica para la estimación de los recursos hídricos: aplicación de GIS-BALAN a varias cuencas Españolas. En: VII Jornadas de Zona no Saturada, ZNS'05, Coruña, 269-274.
- Scheele, B. C., D. A. Driscoll, J. Fischer, et al. 2015. Landscape Context Influences Chytrid Fungus Distribution in an Endangered European Amphibian: Chytrid Fungus in Ephemeral Pond-Breeding Amphibians. *Animal Conservation* 18(5): 480–488.
- Schmeller, Dirk S., Adeline Loyau, Kunshan Bao, et al.(2018). People, Pollution and Pathogens – Global Change Impacts in Mountain Freshwater Ecosystems. *Science of The Total Environment* 622–623: 756–763.
- Sophocleous M (2002) Interaction between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal* 10: 52–67.
- Sutinen R, Hänninen P i Venäläinen A (2007) Effect of mild winter events on soil water content beneath snowpack. *Cold regions science and technology*. DOI:10.1016/2007.05.014.
- Thompson, R., M. Ventura i L. Camarero, 2009. On the climate and weather of mountain and sub-arctic lakes in Europe and their susceptibility to future climate change. *Freshwater Biology* 54:2433-2451.
- Val J, Chinarro D, Rosa Pino M, Navarro E. (2016a). Global change impacts on river ecosystems: A high-resolution watershed study of Ebro river metabolism. *Science of the Total Environment*. 569:774-783
- Val J, Muniz S, Goma J, Navarro E. (2016c). Influence of global change-related impacts on the mercury toxicity of freshwater algal communities. *Science of the Total Environment*. 540:53-62
- Val J, Pino R, Chinarro D. (2017). Development of a new methodology for the creation of water temperature scenarios using frequency analysis tool. *Sciences of the Total Environment*, in press, DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.06.064
- Val J, Pino R, Navarro E, Chinarro D. (2016b). Addressing the local aspects of global change impacts on stream metabolism using frequency analysis tools. *Science of the Total Environment*. 569:798-814
- Van der Kamp G and Maathuis H (1991) Annual fluctuations of groundwater levels as a result of loading by surface moisture. *Journal of Hydrology* 127: 137–152.
- Veijalainen N (2008) Climate change effects on water resources and regulation in Eastern Finland. *Nordic Hydrological Conference 2008*.
- Viviroli D., Weingartner R. (2008) “Water Towers”—A Global View of the Hydrological Importance of Mountains. In: Wiegandt E. (ed) *Mountains: Sources of Water, Sources of Knowledge*. *Advances in Global Change Research*, vol 31. Springer, Dordrecht.
- Wake, David B., and Vance T. Vredenburg. 2008. Are We in the Midst of the Sixth Mass Extinction? A View from the World of Amphibians. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(Supplement 1): 11466–11473.
- Walker, Susan F., Jaime Bosch, Virgilio Gomez, et al. (2010). Factors Driving Pathogenicity vs. Prevalence of Amphibian Panzootic Chytridiomycosis in Iberia. *Ecology Letters* 13(3): 372–382.
- Winter, T. C. (1999) Relation of streams, lakes, and wetland to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal* 7: 28–45.
- Woodhams, Douglas C., Ross A. Alford, Cheryl J. Briggs, Megan Johnson, and Louise A. Rollins-Smith. 2008. Life-History Trade-Offs Influence Disease in Changing Climates: Strategies of an Amphibian Pathogen. *Ecology* 89(6): 1627–1639.
- Yvan Caballero, Sophie Voirin-Morel, Florence Habets, Joël Noilhan, Patrick LeMoigne, Alain Lehenaff, Aaron Boone. (2007) Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resources Research*, 43, W07448.
- Zabaleta, A., Meaurio, M., Uriarte, J.A., Morales, T., Antigüedad, I., 2017. Hydric vulnerability: recent hydrologic trends in the Bay of Biscay. 2nd International colloquium on Climate Change in mountain areas PYRADAPT 2017. *Proceedings* 72-76 (<https://drive.google.com/file/d/1vBJ2pKzlvF-5X7E4lj2gCxSekqkoiz-K/view>).

3 Impacte del canvi climàtic en els sectors socioeconòmics

3.1 Turisme

- Chueca J, Julian A, Lopez-Moreno JI. 2007. Recent evolution (1981–2005) of the Maladeta glaciers, Pyrenees, Spain: extent and volume losses and their relation with climatic and topographic factors. *Journal of Glaciology* 53 (183): 547–557.
- Déqué, M., Martin, E., i Kitova, N. (2011). Response of the snow cover over France to climate change. *Res Atmospheric Ocean Model*, 41(7), 11-2.
- EEA, 2017. Climate change impacts and vulnerabilities in Europe 2016. An indicator-based report. No 1/2017
- ESPO Climate, 2011, Climate change and territorial effects on regions and local economies, Scientific Report, Institute of Spatial Planning (IRPUD), TU Dortmund University, Dortmund.

- Eurostat, 2015c, ‘Tourism statistics at regional level-Statistics explained’ (http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Tourism_statistics_at_regional_level).
- Del Rio, M., Rico, I., Serrano, E., Tejado, J.J. 2014. Applying GPR and Laser Scanner Techniques to Monitor the Ossoue Glacier (Pyrenees). *JEEG*, December 2014, Volume 19, Issue 4, pp. 239–248
- Franch, F. S., Villoslada, G. S., Bonet, F. V., i Sellés, C. G. (2015). Contribución al análisis nivométrico dLos Pirineos los Pirineos oriental: La Molina, periodo 1956-1996. In *Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio* (pp. 365-376).
- Gilaberte-Búrdalo, M., López-Moreno, J. I., Morán-Tejada, E., Jerez, S., Alonso-González, E., López-Martín, F., i Pino-Otín, M. R. (2017). Assessment of ski condition reliability in the Spanish and Andorran Pyrenees for the second half of the 20th century. *Applied Geography*, 79, 127-142.
- Houghton, J. T. (2001). *Climate change 2001: The scientific basis: Contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press.
- Keiler, M., Knight, J., iamp; Harrison, S. (2010). Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1919), 2461-2479.
- López-Moreno, J. I., Goyette, S., i Beniston, M. (2009). Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. *Journal of Hydrology*, 374(3), 384-396.
- López-Moreno JI, Pomeroy J, Revuelto J, Vicente-Serrano SM (2013) Response of snow processes to climate change: spatial variability in a small basin in the Spanish Pyrenees. *Hydrol Process* 27(18):2637–2650
- López-Moreno, J. I., Revuelto, J., Rico, I., Chueca-Cía, J., Julián, A., Serreta, A., ... i García-Ruiz, J. M. (2016). Thinning of the Monte Perdido Glacier in the Spanish Pyrenees since 1981. *The Cryosphere*, 10(2), 681-694.
- Nogués-Bravo, D., Araújo, M. B., Errea, M. P., i Martínez-Rica, J. P. (2007). Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century. *Global Environmental Change*, 17(3), 420-428
- Perrels, A., Heyndrickx, C., Pretenthaler, F., Kortschak, D., Ciari, F., Bösch, P., Kiviluoma, J., Azevedo, M., Ekholm, T., Crawford-Brown, D. and Thompson, A., 2015, Sectoral and cross-cutting multi-sector adaptation strategies for energy, transport and tourism, ToPDAd project, Deliverable 2.4
- Pons, M., Moreno, J. L., Esteban, P., Macià, S., Gavaldà, J., García, C., ... i Jover, E. (2014). Climate change influence on winter tourism in the Pyrenees. Experience from the NIVOPYR research project.
- Pons, M., López-Moreno, J. I., Rosas-Casals, M. and Jover, È., (2015), ‘The vulnerability of Pyrenean ski resorts to climate-induced changes in the snowpack’, *Climatic Change* 131(4), 591–605 (doi: 10.1007/s10584-015-1400-8).
- Raia, S., Alvioli, M., Rossi, M., Baum, R. L., Godt, J. W., iamp; Guzzetti, F. (2013). Improving predictive power of physically based rainfall-induced shallow landslide models: a probabilistic approach. *arXiv preprint arXiv:1305.4803*.
- René, P. 2017. *Les Glaciers des Pyrénées françaises Rapport d'étude 2016 - 2017*. Association Moraine
- Rickards, L., Howden, M., i Crimp, S. (n.d.). Channelling the future? The use of seasonal climate forecasts in climate adaptation. *Climate Change Impact and Adaptation in Agricultural Systems*, 233-252. doi:10.1079/9781780642895.0233
- Rico, I., Serrano, E., López Moreno, I., Revuelto, J., Atkinson, a., De San José, J.J. 2014. El glaciar de la maladeta (Pirineos): Evolución del frente y variabilidad ambiental (2010-2013) The Maladeta Glacier (Pyrenees): Front evolution and environmental variability. XIII Reunión Nacional de Geomorfología , Cáceres , 535–538.
- Rico, I., Serrano, E., San José, J.J. i Del Río, M., 2016. Responses to Climatic Changes since the Little Ice Age on La Paul Glacier (Central Pyrenees). *Krei*, 13: 105-116. <http://hdl.handle.net/10810/18801>.
- Rico, I., Izagirre, E., Serrano, E., López-Moreno, J. I. (2017). Current glacier area in the Pyrenees: an updated assessment 2016. *Pirineos*, 172, e029. doi:<http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2017.172004>
- Rico, I., F. Magnin, J.I. López-Moreno, E. Alonso, J. Revuelto i E. Serrano: First evidence of permafrost occurrence in a steep rock wall in the Pyrenees: The Vignemale North Face. VI Iberian Congress of the International Permafrost Association, June 2017 Mieres (Spain).
- Rixen, C., Teich, M., Lardelli, C., Gallati, D., Pohl, M., Pütz, M., i Bebi, P. (2011, 08). Winter Tourism and Climate Change in the Alps: An Assessment of Resource Consumption, Snow Reliability, and Future Snowmaking Potential. *Mountain Research and Development*, 31(3), 229-236. doi:10.1659/mrd-journal-d-10-00112.1
- Rodrigues, L. M. C., Freire-González, J., Puig, A. G., i Puig-Ventosa, I. Costes y beneficios de la adaptación al cambio climático en el sector del turismo de nieve en España1.
- Rutty, M., D. Scott, P. Johnson, E. Jover, R. Steiger, and M. Pons. (2015). Behavioural adaptation of skiers to climatic variability and change in Ontario, Canada. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*. doi: 10.1016/j.jort.2015.07.002
- Steiger, R., i Abegg, B. (2013). The sensitivity of Austrian ski areas to climate change. *Tourism Planning i Development*, 10(4), 480–493.
- Steiger, R., i Stötter, J. (2013, 11). Climate Change Impact Assessment of Ski Tourism in Tyrol. *Tourism Geographies*, 15(4), 577-600. doi: 10.1080/14616688.2012.762539
- Stewart, E. J., Wilson, J., Espiner, S., Purdie, H., Lemieux, C., i Dawson, J. (2016). Implications of climate change for glacier tourism. *Tourism Geographies*, 18(4), 377-398.

3.2 Cultius agrícoles i agropastoralisme de muntanya.

- ACAP (2017). Association des Chambres d'Agriculture des Pyrénées : <http://www.agriculturepyrenees.fr/l-agriculture-pyreneenne/chiffres-cles.html>
- Ainsworth, E. A., i Long, S. P. (2005). What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, 165(2), 351-372.
- Anderson, K., i Bows, A. (2008). Reframing the climate change challenge in light of post-2000 emission trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1882), 3863-3882.
- Arellano, J. V. G., Van Heerwaarden, C. C., i Lelieveld, J. (2012). Modelled suppression of boundary-layer clouds by plants in a CO₂-rich atmosphere. *Nature geoscience*, 5(10), 701.
- AVEMAC project; JRC., 2012
- Bassu, S., Brisson, N., Durand, J. L., Boote, K., Lizaso, J., Jones, J. W., ... i Basso, B. (2014). How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors?. *Global Change Biology*, 20(7), 2301-2320
- Bernabucci, U., Lacetera, N., Baumgard, L. H., Rhoads, R. P., Ronchi, B., i Nardone, A. (2010). Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants. *Animal*, 4(7), 1167-1183.
- Bernacchi, C. J., Kimball, B. A., Quarles, D. R., Long, S. P., i Ort, D. R. (2007). Decreases in stomatal conductance of soybean under open-air elevation of [CO₂] are closely coupled with decreases in ecosystem evapotranspiration. *Plant physiology*, 143(1), 134-144.
- Bernues, A., Rodríguez-Ortega, T., Ripoll-Bosch, R., i Alfnes, F. (2014). Socio-cultural and economic valuation of ecosystem services provided by Mediterranean mountain agroecosystems. *PloS one*, 9(7), e102479.
- Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F. X., i Huard, F. (2010). Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research*, 119(1), 201-212.
- Bonizzoni, M., Gasperi, G., Chen, X., i James, A. A. (2013). The invasive mosquito species *Aedes albopictus*: current knowledge and future perspectives. *Trends in parasitology*, 29(9), 460-468.
- Busqué, J., Rosa García, R., Celaya, R., Albizu, I., Aldai, N., Aldaz, J., ... i Bernués Jal, A. (2016). Integración de trabajos de investigación para la gestión sostenible de los pastos de montaña del Norte peninsular.
- Canals, R.M. (2018). Landscape in motion: revisiting the role of key disturbances for the preservation of mountain ecosystems. *Geographical Research Letters*, 45.
- Canals, R.M., San Emeterio, I., Durán, M., Múgica L. (2017). Plant-herbivory feedbacks and selective allocation of a toxic metal are behind the stability of degraded covers dominated by *Brachypodium pinnatum* in acidic soils. *Plant and Soil*, 415, 373-386.
- Canals R.M., Pedro, J., Rupérez, E., San Emeterio, L. (2014) Nutrient pulses after prescribed winter fires and preferential patterns of N uptake may contribute to the expansion of *Brachypodium pinnatum* (L.) Beauv in highland grasslands. *Applied Vegetation Science*, 17, 419-428
- Cantarel, A. A., Bloor, J. M., i Soussana, J. F. (2013). Four years of simulated climate change reduces above-ground productivity and alters functional diversity in a grassland ecosystem. *Journal of Vegetation Science*, 24(1), 113-126.
- Gaulty, M., Bollwein, H., Breves, G., Brügemann, K., Dänicke, S., Daş, G., ... i Lohölter, M. (2013). Future consequences and challenges for dairy cow production systems arising from climate change in Central Europe—a review. *Animal*, 7(5), 843-859.
- Chamorro, M., Miranda, L., Domínguez, P., Medina, J. J., Soria, C., Romero, F., ... i De los Santos, B. (2015). Evaluation of biosolarization for the control of charcoal rot disease (*Macrophomina phaseolina*) in strawberry. *Crop Protection*, 67, 279-286.
- Ciscar, J. C., Feyen, L., Soria, A., Lavalle, C., Raes, F., Pery, M., ... i Donatelli, M. (2014). Climate impacts in Europe-The JRC PESETA II project.
- Climfourrel (2011). <http://climfourrel.agropolis.fr/documents.html>
- Dalin, P., i Nylin, S. (2012). Host-plant quality adaptively affects the diapause threshold: evidence from leaf beetles in willow plantations. *Ecological Entomology*, 37(6), 490-499.
- De los Santos, B., Chamorro, M., Medina-Mínguez, J. J., Capote, N., Aguado, A., i Romero, F. (2016). 12 Emerging Diseases in Strawberry Crop: Charcoal Rot and Fusarium Wilt. *Strawberry: Growth, Development and Diseases*, 212.
- Diodato, N., i Bellocchi, G. (2010). MedREM, a rainfall erosivity model for the Mediterranean region. *Journal of Hydrology*, 387(1-2), 119-127.
- Donatelli, M., Srivastava, A. K., Duveiller, G., i Niemeyer, S. (2012). Estimating impact assessment and adaptation strategies under climate change scenarios for crops at EU27 scale
- Donatelli, M., Srivastava, A. K., Duveiller, G., Niemeyer, S., i Fumagalli, D. (2015). Climate change impact and potential adaptation strategies under alternate realizations of climate scenarios for three major crops in Europe. *Environmental Research Letters*, 10(7), 075005.
- Dumont, B., Andueza, D., Niderkorn, V., Lüscher, A., Porqueddu, C., i Picon-Cochard, C. (2015). A meta-analysis of climate change effects on forage quality in grasslands: specificities of mountain and Mediterranean areas. *Grass and Forage Science*, 70(2), 239-254.
- Estrada-Peña, A., Ayllón, N., i De La Fuente, J. (2012). Impact of climate trends on tick-borne pathogen transmission. *Frontiers in Physiology*, 3, 64.
- ESPON Project (2013). Greiving, S., Fleischhauer, M., Lindner, C., Lückenötter, J., Peltonen, L., Juhola, S., ... i Langeland, O. (2013).

- ESPON Climate—Climate change and territorial effects on regions and local economies. The ESPON.
- Funes, I., i Montserrat, R. S., Loscos, C. B., Vayreda, J., Domínguez, E. G. E., Aranda, X., i de Herralde Travería, F. (2014). El cultivo de la vid como sumidero de carbono en La Rioja. In *I Jornada del Grupo de Viticultura y Enología: Comunicaciones, Logroño*, 19 y 20 de noviembre, 2014 (pp. 193-199). SECH (Sociedad Española de Ciencias Hortícolas).
- Fraga, H., García de Cortázar Atauri, I., Malheiro, A. C., i Santos, J. A. (2016). Modelling climate change impacts on viticultural yield, phenology and stress conditions in Europe. *Global change biology*, 22(11), 3774-3788.
- Felten, B., Duru, M., Martin, G., Sautier, M., (2011). Changement climatique en Midi- Pyrénées et conséquences sur la croissance de l'herbe. *Projet Climfourrel, Midi- Pyrénées , Série Les Focus PSDR3*.
- Garibaldi, A., i Gullino, M. L. (2009, September). Emerging soilborne diseases of horticultural crops and new trends in their management. In *VII International Symposium on Chemical and Non-Chemical Soil and Substrate Disinfestation 883* (pp. 37-47).
- García, M. B., Alados, C. L., Antor, R., Alonso, J. L. B., Camarero, J. J., Carmena, F., ... i Gartzia, M. (2016). Integrando escalas y métodos LTER para comprender la dinámica global de un espacio protegido de montaña: el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido. *Ecosistemas*, 25(1), 19-30.
- García-Ruiz, J. M., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Lasanta-Martínez, T., i Beguería, S. (2011). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, 105(3-4), 121-139.
- Giannakopoulos, C., Le Sager, P., Bindi, M., Moriondo, M., Kostopoulou, E., i Goodess, C. M. (2009). Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 C global warming. *Global and Planetary Change*, 68(3), 209-224.
- Heffernan, J. B., Soranno, P. A., Angilletta, M. J., Buckley, L. B., Gruner, D. S., Keitt, T. H., ... i Harms, T. K. (2014). Macrosystems ecology: understanding ecological patterns and processes at continental scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(1), 5-14.
- Houghton, J. T. (2001). *Climate change 2001: The scientific basis: Contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press.
- Husaini, A. M., i Xu, Y. W. (2016). 14 Challenges of Climate Change to Strawberry Cultivation: Uncertainty and Beyond. *Strawberry: Growth, Development and Diseases*, 262.
- IEA (2016). https://www.iea.ad/images/iea/memories/Memoria_IEA_2016.pdf
- Iglesias, A., i Rosenzweig, C. (2009). Effects of climate change on global food production under special report on emissions scenarios (SRES) emissions and socioeconomic scenarios: data from a crop modeling study. Palisades, NY: Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), Columbia University.
- Iriso A, Bueno R, De las Heras E, Lucientes J, Molina R. (2017) Cambio climático en España y su influencia en las enfermedades de transmisión vectorial. *Salud ambient.*;17(1):70-86.
- Jacquet, S., Huber, K., Pagès, N., Talavera, S., Burgin, L. E., Carpenter, S., ... i Lhor, Y. (2016). Range expansion of the Bluetongue vector, *Culicoides imicola*, in continental France likely due to rare wind-transport events. *Scientific reports*, 6, 27247.
- Jones, H. P., Hole, D. G., i Zavaleta, E. S. (2012). Harnessing nature to help people adapt to climate change. *Nature Climate Change*, 2(7), 504.
- Klapwijk, M. J., Csóka, G., Hirka, A., i Björkman, C. (2013). Forest insects and climate change: long-term trends in herbivore damage. *Ecology and Evolution*, 3(12), 4183-4196.
- Lacetera, N., Segnalini, M., Bernabucci, U., Ronchi, B., Vitali, A., Tran, A., ... i Baylis, M. (2013). Climate induced effects on livestock population and productivity in the Mediterranean area. In *Regional assessment of climate change in the Mediterranean* (pp. 135-156). Springer, Dordrecht.
- Léger, E., Vourc'h, G., Vial, L., Chevillon, C., i McCoy, K. D. (2013). Changing distributions of ticks: causes and consequences. *Experimental and Applied Acarology*, 59(1-2), 219-244.
- Leip, A., Billen, G., Garnier, J., Grizzetti, B., Lassaletta, L., Reis, S., ... i Westhoek, H. (2015). Impacts of European livestock production: nitrogen, sulphur, phosphorus and greenhouse gas emissions, land-use, water eutrophication and biodiversity. *Environmental Research Letters*, 10(11), 115004.
- Lereboullet, A. L., Bardsley, D., i Beltrando, G. (2013). Assessing vulnerability and framing adaptive options of two Mediterranean wine growing regions facing climate change: Roussillon (France) and McLaren Vale (Australia). *EchoGéo*, (23).
- Long, S. P., Ainsworth, E. A., Leakey, A. D., Nösberger, J., i Ort, D. R. (2006). Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science*, 312(5782), 1918-1921.
- Luckabc*, M. Spackmand, A. Freemand, P. Tre_bickid, W. Griffiths, K. Finlayac and S. Chakrabortycf (2011). Climate change and diseases of food crops
- Manderscheid, R., i Weigel, H. J. (2007). Drought stress effects on wheat are mitigated by atmospheric CO₂ enrichment. *Agronomy for sustainable development*, 27(2), 79-87.
- Mardulyn, P., Goffredo, M., Conte, A., Hendrickx, G., Meiswinkel, R., Balenghien, T., ... i Gilbert, M. (2013). Climate change and the spread of vector-borne diseases: using approximate Bayesian computation to compare invasion scenarios for the bluetongue virus vector *Culicoides imicola* in Italy. *Molecular ecology*, 22(9), 2456-2466.
- Manici, L. M., i Caputo, F. (2009). Fungal community diversity and soil health in intensive potato cropping systems of the east Po valley, northern Italy. *Annals of Applied Biology*, 155(2), 245-258.

- Mereu, V., Iocola, I., Spano, D., Murgia, V., Duce, P., Cesaraccio, C., ... i Fischer, G. (2008). Land suitability and potential yield variations of wheat and olive crops determined by climate change in Italy. *CENTRO*, 4(8.3), 17-8.
- Moriondo, M., Stefanini, F. M., i Bindi, M. (2008). Reproduction of olive tree habitat suitability for global change impact assessment. *Ecological Modelling*, 218(1-2), 95-109.
- Moriondo, M., Jones, G. V., Bois, B., Dibari, C., Ferrise, R., Trombi, G., i Bindi, M. (2013). Projected shifts of wine regions in response to climate change. *Climatic change*, 119(3-4), 825-839.
- Nardone, A., Ronchi, B., Lacetera, N., Ranieri, M. S., i Bernabucci, U. (2010). Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. *Livestock Science*, 130(1-3), 57-69.
- Nettier, B., Dobremez, L., Coussy, J. L., i Romagny, T. (2010). Attitudes of livestock farmers and sensitivity of livestock farming systems to drought conditions in the French Alps. *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, (98-4).
- OCCC (2017). Oficina Catalana del Camvi Climàtic. Tercer Informe sobre el Cambio Climático en Cataluña (TICCC).
- Olesen, J. E., Trnka, M., Kersebaum, K. C., Skjelvåg, A. O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., ... i Micale, F. (2012). Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, 34(2), 96-112.
- Olesen, J. E., Trnka, M., Kersebaum, K. C., Skjelvåg, A. O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., ... i Micale, F. (2011). Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, 34(2), 96-112.
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., ... i Alewell, C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science i Policy*, 54, 438-447.
- Patz, J. A., i Olson, S. H. (2006). Climate change and health: global to local influences on disease risk. *Annals of Tropical Medicine i Parasitology*, 100(5-6), 535-549.
- Ponti, L., Gutierrez, A. P., Ruti, P. M., i Dell'Aquila, A. (2014). Fine-scale ecological and economic assessment of climate change on olive in the Mediterranean Basin reveals winners and losers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(15), 5598-5603.
- Randolph, S. E. (2008). To what extent has climate change contributed to the recent epidemiology of tick-borne diseases?. *Veterinary parasitology*, 167(2-4), 92-94.
- Rickards, L., Howden, M., i Crimp, S. (n.d.). Channelling the future? The use of seasonal climate forecasts in climate adaptation. *Climate Change Impact and Adaptation in Agricultural Systems*, 233-252.
- Roy, K. S., i Prakash, B. S. (2007). Seasonal variation and circadian rhythmicity of the prolactin profile during the summer months in repeat-breeding Murrah buffalo heifers. *Reproduction, Fertility and Development*, 19(4), 569-575.
- Savé, R., De Herralde, F., Aranda, X., Pla, E., Pascual, D., Funes, I., i Biel, C. (2012). Potential changes in irrigation requirements and phenology of maize, apple trees and alfalfa under global change conditions in Fluvia watershed during XXIst century: Results from a modeling approximation to watershed-level water balance. *Agricultural Water Management*, 114, 78-87.
- Sebastià, M. T. (2007). Plant guilds drive biomass response to global warming and water availability in subalpine grassland. *Journal of Applied Ecology*, 44(1), 158-167.
- Segnalini, M., Bernabucci, U., Vitali, A., Nardone, A., i Lacetera, N. (2013). Temperature humidity index scenarios in the Mediterranean basin. *International Journal of Biometeorology*, 57(3), 451-458.
- Stoekli, S., Hirschi, M., Spirig, C., Calanca, P., Rotach, M. W., i Samietz, J. (2012). Impact of climate change on voltinism and prospective diapause induction of a global pest insect—*Cydia pomonella* (L.). *PloS one*, 7(4), e35723.
- Tanmoy, D., Majumdar, M. H. D., Devi, R. K. T., i Rajesh, T. (2016). Climate change impacts on plant diseases. *SAARC Journal of Agriculture*, 14(2), 200-209.
- Tanasijevic, L., Todorovic, M., Pereira, L. S., Pizzigalli, C., i Lionello, P. (2014). Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 144, 54-68.
- Trnka, M., Hlavinka, P., i Semenov, M. A. (2015). Adaptation options for wheat in Europe will be limited by increased adverse weather events under climate change. *Journal of the Royal Society Interface*, 12(112), 20150721.
- Trnka, M., Brázdil, R., Dubrovský, M., Semerádová, D., Štěpánek, P., Dobrovolný, P., ... i Balek, J. (2011). A 200-year climate record in Central Europe: implications for agriculture. *Agronomy for sustainable development*, 31(4), 631-641.
- Trnka, M., Rötter, R. P., Ruiz-Ramos, M., Kersebaum, K. C., Olesen, J. E., Žalud, Z., i Semenov, M. A. (2014). Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. *Nature Climate Change*, 4(7), 637-643.
- Vitali, A., Segnalini, M., Bertocchi, L., Bernabucci, U., Nardone, A., i Lacetera, N. (2009). Seasonal pattern of mortality and relationships between mortality and temperature-humidity index in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 92(8), 3781-3790.
- Williams, H. W., Cross, D. E., Crump, H. L., Drost, C. J., i Thomas, C. J. (2015). Climate suitability for European ticks: assessing species distribution models against null models and projection under AR5 climate. *Parasites i Vectors*, 8(1), 440.
- Willerslev, E., Davison, J., Moora, M., Zobel, M., Coissac, E., Edwards, M. E., ... i Craine, J. (2014). Fifty thousand years of Arctic vegetation and megafaunal diet. *Nature*, 506(7486), 47.
- Yano, T., Aydin, M., i Haraguchi, T. (2007). Impact of climate change on irrigation demand and crop growth in a Mediterranean environment of Turkey. *Sensors*, 7(10), 2297-2315.
- Zwicke, M., Alessio, G. A., Thiery, L., Falcimagne, R., Baumont, R., Rossignol, N., ... i Picon-Cochard, C. (2013). Lasting effects of climate disturbance on perennial grassland above-ground biomass production under two cutting frequencies. *Global Change Biology*, 19(11), 3435-3448.

3.3 Energia

- Bangash, R. F., Passuello, A., Sanchez-Canales, M., Terrado, M., López, A., Elorza, F. J., ... i Schuhmacher, M. (2013). Ecosystem services in Mediterranean river basin: climate change impact on water provisioning and erosion control. *Science of the Total Environment*, 458, 246-255.
- Beniston, M., Stoffel, M., Clarvis, M. H., i Quevauviller, P. (2014). Assessing climate change impacts on the quantity of water in Alpine regions: Foreword to the adaptation and policy implications of the EU/FP7 "ACQWA" project. *Environmental Science i Policy*, 43, 1-4.
- Bloom, A., V. Kotroni and K. Lagouvardos (2008). "Climate change impact of wind energy availability in the Eastern Mediterranean using the regional climate model PRECIS." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8(6): 1249e1257.
- Crook, J. A., Jones, L. A., Forster, P. M., i Crook, R. (2011). Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. *Energy i Environmental Science*, 4(9), 3101-3109.
- Dowling, P. (2013). The impact of climate change on the European energy system. *Energy Policy*, 60, 406-417.
- Flörke, M., Bärlund, I., i Kynast, E. (2012). Will climate change affect the electricity production sector? A European study. *Journal of Water and Climate Change*, 3(1), 44-54.
- Gaetani, M., T. Huld, E. Vignati, F. Monforti-Ferrario, A. Dosio and F. Raes (2014). "The near future availability of photovoltaic energy in Europe and Africa in climate-aerosol modeling experiments." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38: 706e716.
- Hueging, H., Haas, R., Born, K., Jacob, D., i Pinto, J. G. (2013). Regional changes in wind energy potential over Europe using regional climate model ensemble projections. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(4), 903-917.
- Koch, H., Vögele, S., Hattermann, F. F., i Huang, S. (2015). The impact of climate change and variability on the generation of electrical power. *Meteorologische Zeitschrift*, 24, 173-188.
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Zabalza, J., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., i Morán-Tejeda, E. (2013). Hydrological response to climate variability at different time scales: A study in the Ebro basin. *Journal of hydrology*, 477, 175-188.
- López-Moreno, J. I., Pomeroy, J. W., Revuelto, J., i Vicente-Serrano, S. M. (2013). Response of snow processes to climate change: spatial variability in a small basin in the Spanish Pyrenees. *Hydrological Processes*, 27(18), 2637-2650.
- Mideksa, T. K., i Kallbekken, S. (2010). The impact of climate change on the electricity market: A review. *Energy Policy*, 38(7), 3579-3585.
- Morán-Tejeda, E., López-Moreno, J. I., i Sanmiguel-Valladolid, A. (2017). Changes in climate, snow and water resources in the Spanish Pyrenees: observations and projections in a warming climate. In *High Mountain Conservation in a Changing World* (pp. 305-323). Springer, Cham.
- Pereira-Cardenal, S. J., Madsen, H., Arnbjerg-Nielsen, K., Riegels, N., Jensen, R., Mo, B., ... i Bauer-Gottwein, P. (2014). Assessing climate change impacts on the Iberian power system using a coupled water-power model. *Climatic change*, 126(3-4), 351-364.
- Santos, J. A., Rochinha, C., Liberato, M. L. R., Reyers, M., i Pinto, J. G. (2015). Projected changes in wind energy potentials over Iberia. *Renewable Energy*, 75, 68-80.
- Van Vliet, M. T., Vögele, S., i Rübbecke, D. (2013). Water constraints on European power supply under climate change: impacts on electricity prices. *Environmental Research Letters*, 8(3), 035010.
- Van Vliet, M. T., Sheffield, J., Wiberg, D., i Wood, E. F. (2016). Impacts of recent drought and warm years on water resources and electricity supply worldwide. *Environmental Research Letters*, 11(12), 124021.

3.4 Riscos naturals

- Agence de l'Eau Adour-Garonne, (2014). Analyse post-crue des cours de la Garonne amont, de la Pique, des Nestes et l'amont du Gave de Pau. ftp://oai:oai@ftp.eau-adour-garonne.fr/oaidocuments/60739_GAR_PYR_32577_1_GeoDiag_AEAG-PostCrue_Rapport_2014.pdf
- CGEDD – Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (2015), Evaluation du plan national d'adaptation au changement climatique, Rapport n° 010178-01, 203 p.
- CGET (2015), L'adaptation des territoires au changement climatique, 210 p., http://www.cget.gouv.fr/sites/cget.gouv.fr/files/atoms/files/etude_changement-climatique.pdf
- Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver and M. Wehner, (2013): Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- DIACT (2008), *Changement climatique dans le massif alpin français : état des lieux et propositions pour le Commissariat*

- à l'Aménagement et au développement des Alpes, rapport rédigé par Philippe Langevin, Robert Mugnier et Emmanuelle Marcelpoil, 74 p., http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/etude_CADEPA_climat_cle055915.pdf
- EEA (2010), Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe. An overview of the last decade. EEA Technical report, No 13/2010, ISSN 1725-2237;
 - EEA (2017a), Climate change adaptation and disaster risk reduction in Europe. Enhancing coherence of the knowledge base, policies and practices, EEA Report No 15/2017, ISSN 1977-8449
 - EEA (2017b), Financing urban adaptation to climate change, EEA Report No 2/2017, European Environment Agency.
 - EU (2015), Towards an EU Research and Innovation policy agenda for Nature-Based Solutions i Re-Naturing Cities Final Report of the Horizon 2020 Expert Group on 'Nature-Based Solutions and Re-Naturing Cities, Directorate-General for Research and Innovation 2015 Climate Action, Environment, Resource Efficiency and Raw Materials EN (full version).
 - Hartmann, D.L., A.M.G. Klein Tank, M. Rusticucci, L.V. Alexander, S. Brönnimann, Y. Charabi, F.J. Dentener, E.J. Dlugokencky, D.R. Easterling, A. Kaplan, B.J. Soden, P.W. Thorne, M. Wild and P.M. Zhai, (2013): Observations: Atmosphere and Surface. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 - IPCC, (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX), Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 582 pp.
 - IPCC, (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
 - Lempert, R. J., Popper, S., W., Bankes, S., C., (2003). Shaping the next one hundred years: new methods for quantitative, long-term policy analysis. Rand Corporation, 187 p., https://www.rand.org/pubs/monograph_reports/MR1626.html
 - Martin-Vide, J.M. (coord.) (2016), Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya, Barcelona, Government of Catalonia, ISBN 978-84-9965-317-4, 615 p.
 - MEDCIE (2008), Etude des effets du changement climatique sur le Grand Sud-Est - Etape 1, 98 p. http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/MEDCIE_RapportSynthese_040608_cle0ac9a9.pdf
 - MEDDTL (2011), Plan national d'adaptation de la France aux effets du changement climatique (2011-2015), 187 p.
 - ONERC – Observatoire National sur les Effets du Changement Climatique, (2007), Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique, 85 p., La documentation Française, ISBN : 978-2-11-00-6618-0
 - ONERC, (2009), Changement Climatique : Coûts des impacts et pistes d'adaptation, Rapport au Premier ministre et au Parlement. La documentation Française.
 - OPCC (2013), Etude sur l'adaptation au changement climatique dans les Pyrénées: Analyse des démarches d'adaptation dans les Pyrénées. 45 p. www.opcc-ctp.org
 - Seneviratne, S. I., et al., (2012): Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [C. B. Field, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, pp. 109–230.
 - UNEP (2014), Green Infrastructure Guide for Water Management: Ecosystem-based management approaches for water-related infrastructure projects, pp. 76, ISBN: 978-92-807-3404-1

Tèsis

- Boudou, M., (2015). Approche multidisciplinaire pour la caractérisation d'inondations remarquables Enseignements tirés de neuf évènements en France. PhD Theses, Université Paul Valéry – Montpellier III. 184 pp.
- Copons, R. (2004): Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs rocosos a Andorra la Vella (Principat d'Andorra). Ph Thèses. Université de Barcelone, 244pp. +12 maps.
- González García, M. (2014). La alta montaña periglaciària en el Pirineo central español: procesos, formas y condiciones ambientales. PhD Thesis, Universidad de Málaga, Málaga, 900 pp.

Publicacions científiques

- Allen, S. K., Fiddes, J., Linsbauer, A., Randhawa, S. S., Saklani, B., and Salzmann, N. (2016) Permafrost studies in Kullu district, Himachal Pradesh, Curr. Sci., 111, 557–560, 2016
- Álvarez-Rodríguez, J., M.C. Llasat, T. Estrela, (2017). Analysis of geographic and orographic influence in Spanish monthly precipitation. International Journal of Climatology, DOI:10.1002/joc.5007
- Berthet, C., J. Dessens, J.L. Sanchez (2011), Regional and yearly variations of hail frequency and intensity in France, Atmospheric

Research, 100, 391–400.

- Bodin X., Krysiecki J.M., Schoeneich P., Le Roux O., Lorier L., Echelard T., Peyron M., Walpersdorf A. (2016). The collapse of the Bérard rock glacier (Southern French Alps) in 2006. Permafrost and Periglacial Processes. DOI: 10.1002/ppp.1887
- Boeckli, L., Brenning, A., Gruber, S., et Noetzli, J. (2012) – Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics. The Cryosphere 6, 807–820. doi:10.5194/tc-6-807-2012
- Bulygina, N., McIntyre, N., and Wheeler, H., (2009), Conditioning rainfall-runoff model parameters for ungauged catchments and land management impacts analysis, Hydrol. Earth Syst. Sci., 13, 893–904, doi:10.5194/hess-13-893-2009, 2009.
- Bulygina, N., McIntyre, N., and Wheeler, H. (2011): Bayesian conditioning of a rainfall-runoff model for predicting flows in ungauged catchments and under land use changes, Water Resour. Res., 47, W02503, doi:10.1029/2010WR009240, 2011.
- Crozier, M.J., (2010). Deciphering the effect of climate change on landslide activity: a review. Geomorphology 124, 260–267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.04.009>
- Dumas, P., Hallegette, S., Quintana-Segui, P., and Martin, E. (2013): The influence of climate change on flood risks in France – first estimates and uncertainty analysis, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, 809–821, doi:10.5194/nhess-13-809-2013, 2013.
- Forzieri G, Feyen L, Russo S, Voudoukas M, Alfieri L, Outten S, Migliavacca M, Bianchi A, Rojas R, Cid A., (2016), Multi-hazard assessment in Europe under climate change. Climatic Change 137:105–119
- García-Ruiz, J.M., White, S., Martí-Bono, C., Valero, B., Errea, M.P., i Gómez Villar, A. (2004): La avenida del Barranco de Arás y los riesgos hidrológicos en el Pirineo Central español, in Geografía física de Aragón. Aspectos generales y temáticos, J.L. Peña, L.A. Longares y M. Sanchez (eds), Universidad de Zaragoza e Institucion Fernando el Catolico, Zaragoza, ISBN: 84-96214-29-X.
- Gariano, S. L. and Guzzetti, F. (2016), Landslides in a changing climate, Earth-Science Reviews, 162, 227–252, <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>.
- Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T. R., Kriaučiūnienė, J., Kundzewicz, Z. W., Lang, M., Llasat, M. C., MacDonald, N., McIntyre, N., Mediero, L., Merz, B., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Neuhold, C., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Plavcová, L., Rogger, M., Salinas, J. L., Sauquet, E., Schär, C., Szolgay, J., Viglione, A., Blöschl, G., (2014), Understanding Flood Regime Changes in Europe: A state of the art assessment. Hydrol. Earth Syst. Sci. 18, 2735-2772.
- Huggel, S., Clague, J.J., Korup, O., (2012). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? Earth Surf. Process. Landf. 37, 77–91. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.2223>.
- Huggel, C., Gruber, S., Korup, O., (2013). Landslide hazards and climate change in high mountains. In: Shroder, J., James, L.A., Harden, C.P., Clague, J.J. (Eds.), Treatise on Geomorphology of Human Disturbances, Climate Change, and Natural Hazards 13. Academic Press, San Diego CA, USA, pp. 288–301.
- Hürlimann, M.; Copons, R.; Altimir, J. (2006): Detailed debris flow hazard assessment in Andorra: A multidisciplinary approach, Geomorphology, 78, 359-372.
- Jomelli, V. (2012). Alpine debris flows. Science and Technology, 4, 162-164
- Kääb, A., Reynolds, J. M., and Haeberli, W. (2005) Glacier and permafrost hazards in high mountains, in Global Change and Mountain Regions: An Overview of Current Knowledge, 225–234, 2005.
- Keiler, M. and Fuchs, S. (2016) Vulnerability and exposure to geomorphic hazards – some insights from mountain regions, in Geomorphology and society, edited by: Meadows, M. and Lin, J.-C., Springer, Tokyo, 165–180
- Krautblatter, M., Huggel, C., Deline, P., and Hasler, A.: Research Perspectives on Unstable High-alpine Bedrock Permafrost: Measurement, Modelling and Process Understanding, Permafrost Periglac., 23, 80–88, <https://doi.org/10.1002/ppp.740>, 2012.
- López-Moreno, J. I., Begueria, S., and Garca-Ruiz, J. M., (2006), Trends in high flows in the central Spanish Pyrenees: response to climatic factors or to land use change?, Hydrolog. Sci. J., 51, 1039–1050, doi:10.1623/hysj.51.6.1039,
- Llasat, M.C., (1993), Les inondations de 1940 en catalogne espagnole. Les inondations semblables pendant les cinquante années suivantes. L'aiguat del 40. Inundacions catastròfiques i polítiques de prevenció a la Mediterrània nord-occidental. Servei Geològic de Catalunya, 137-144. ISBN: 84-393-2642-4. D.L: B-29481-93. Barcelona, España.
- Llasat, M.C., M. Barriandos, Barrera, A., and Rigo, T., (2005), Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records. Journal of Hydrology. Special issue on Applications of palaeoflood hydrology and historical data in flood risk analysis, 313, 32-47
- Llasat, M. C., M. Llasat-Botija, O. Petrucci, A.A. Pasqua, J. Rosselló, F. Vinet, L. Boissier, (2013). Towards a database on societal impact of Mediterranean floods in the framework of the HYMEX project. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, 1–14
- Lorente, A., García-Ruiz, J.M., Beguería, S., Arnáez, J., (2002), Factors Explaining the Spatial Distribution of Hillslope Debris Flows. Mt. Res. Dev. 22. 32–39. doi:10.1659/0276
- Magnin, F., Josnin, J.-Y., Ravelin, L., Pergaud, J., Pohl, B., and Deline, P. (2017) Modelling rock wall permafrost degradation in the Mont Blanc massif from the LIA to the end of the 21st century, The Cryosphere, 11, 1813-1834, <https://doi.org/10.5194/tc-11-1813-2017>
- Mediero, L., Santillán, D., Garrote, L., and Granados, A. (2014), Detection and attribution of trends in magnitude, frequency and timing of floods in Spain, J. Hydrol., 517, 1072–1088, doi:10.1016/j.jhydrol.2014.06.040, 2014.
- Nicolle, P., R. Pushpalatha, C. Perrin, D. François, D. Thiéry, T. Mathevet, M. Le Lay, F. Besson, J.-M. Soubeyrou, C. Viel, F. Regimbeau, V. Andréassian, P. Maugis, B. Augéard, and E. Morice, (2014), Benchmarking hydrological models for low-flow

- simulation and forecasting on French catchments, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 2829–2857, doi:10.5194/hess-18-2829-2014
- Paranunzio, R., Laio, F., Chiarle, M., Nigrelli, G., Guzzetti, F., (2016). Climate anomalies associated to the occurrence of rockfalls at high-elevation in the Italian Alps. *Nat. Hazard Earth Sys. Sci. Discuss.* <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-2016-100>.
 - Ravanel, L., and Deline, P., (2011). Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: the North side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the Little Ice Age. *The Holocene*, 21, 357–365, <http://dx.doi.org/10.1177/0959683610374887>
 - Ravanel, L., Deline, P., (2015). Rockfall hazard in the Mont Blanc massif increased by the current atmospheric warming. In: Lollino, G., Manconi, A., Clague, J., Shan, W., Chiarle, M. (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory Climate Change and Engineering Geology 1*. Springer International Publishing, pp. 425–428
 - Renard, B., Lang, M., Bois, P., Dupeyrat, A., Mestre, O., Niel, H., Sauquet, E., Prudhomme, C., Parey, S., Paquet, E., Neppel, L., and Gailhard, J. (2008). Regional methods for trend detection: assessing field significance and regional consistency, *Water Resour. Res.*, 44, W08419, doi:10.1029/2007WR006268
 - Rojas, R., Feyen, L., Bianchi, A., and Dosio, A. (2012). Assessment of future flood hazard in Europe using a large ensemble of biascorrected regional climate simulations, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 117, D17109, doi:10.1029/2012JD017461
 - Sedan O., Desramaut N., Vandromme R., (2013) Logiciel ALICE version 7-Guide d'utilisateur, BRGM, RP-60004 (BRGM, Orléans, 2013).
 - Senatore, A., Mendicino, G., Smiatek, G., Kunstmann, H., (2011). Regional climate change projections and hydrological impact analysis for a Mediterranean basin in Southern Italy. *J. Hydrol.* 399, 70–92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.035>.
 - Serrano, E., Morales, C., González-Trueba, J., i Martín, R. (2009). Cartografía del permafrost de montaña en los Pirineos españoles. *Finisterra. Revista Portuguesa de Geografía*, 87, 45–54.
 - Serrano, E., Agudo, C., Delaloye, R., et Gonzales-Trueba, J.J. (2010), Permafrost distribution in the Posets massif, Central Pyrenees, *Norsk Geografisk Tidsskrift* 55(4), 245–252, DOI: 10.1080/00291950152746603
 - Stoffel, M., Beniston, M., (2006). On the incidence of debris flows from the early Little Ice Age to a future greenhouse climate: a case study from the Swiss Alps. *Geophys. Res. Lett.* 33, L16404. <http://dx.doi.org/10.1029/2006GL026805>.
 - Stoffel, M., Huggel, C., (2012). Effects of climate change on mass movements in mountain environments. *Prog. Phys. Geogr.* 36 (3), 421–439. <http://dx.doi.org/10.1177/0309133312441010>
 - Turco, M., M.C. Llasat, S. Herrera, J.M. Gutierrez, (2017). Bias Correction and Downscaling future RCM Precipitation Projections using a MOS-Analog Technique. *Journal of Geophysic Research-Atmospheres* 122, doi: 10.1002/2016JD025724.
 - Utasse, M., Jomelli, V., Leone, F., Grancher, D., Brunstein, D., Vermoux, C. (2016). Institutional and functional vulnerability assessment related to impacts of debris flows on roads in the French Alps. *International Journal of Disaster Risk Science*, 7, 186-197.
 - Wood, J.L., Harrison, S. Turkington, T. A. R., Reinhardt, L. (2016), Landslides and synoptic weather trends in the European Alps, *Climatic Change*, 136:297–308, DOI 10.1007/s10584-016-1623-3

Comunicacions a conferències

- Baills A., Vandromme R., Desramaut N., Sedan O., Grandjean G, (2011) Changing patterns in climate-driven landslide hazard: an alpine test site. *The Second World Landslides Forum*, Oct 2011, Rome, Italy
- Llasat, M.C., Llasat-Botija, M, Cortés, M, Vinet, F., Quintana-Seguí, P., Gilabert, J., Del Moral, A., (2017). Coping with floods in a climate change framework in the Pyrenees: from the November 1982 event to the June 2013 event. *2nd International colloquium on climate change in mountain areas, PYRADAPT 2017*.
- Rico, I., Magnin F, López-Moreno JI, Alonso E, Revuelto J, Serrano E. 2017. First evidence of permafrost occurrence in a steep rock wall in the Pyrenees: The Vignemale North Face. In: *Ambientes Periglaciares: avances de su estudio, valoración patrimonial y riesgos asociados*. Ed. Universidad de Oviedo, 282pp. Oviedo.

Col·laboradors

Comitè tècnic i Comitè executiu



Comitè de coordinació i socis del projecte OPCC2



Amb el suport de



El projecte ha estat cofinançat al 65% pel Fons Europeu de Desenvolupament Regional (FEDER) a través del Programa Interreg V-A Espanya-França-Andorra (POCTEFA 2014-2020). L'objectiu del POCTEFA és reforçar la integració econòmica i social de la zona fronterera Espanya-França-Andorra. La seva ajuda es concentra en el desenvolupament d'activitats econòmiques, socials i mediambientals transfrontereres a través d'estratègies conjuntes a favor del desenvolupament territorial sostenible.



El canvi climàtic als Pirineus: impactes, vulnerabilitats i adaptació

Bases de coneixement per a la futura estratègia
d'adaptació al canvi climàtic als Pirineus