

6 Riscos d'origen climàtic

Autors

Maria del Carme Llasat Botija

Jordi Corominas

Carles García Sellés

Pere Quintana Seguí

Marco Turco

Maria del Carme Llasat Botija és doctora en ciències físiques per la Universitat de Barcelona, de la qual és actualment professora titular, i desenvolupa les línies principals de recerca en l'estudi dels riscos hidrometeorològics i el canvi climàtic, concretament en la Mediterrània, des d'una perspectiva multidisciplinària. És membre del Consell Executiu del Grup d'Experts en Canvi Climàtic de Catalunya i consellera del Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible de la Generalitat de Catalunya, així com de diferents comitès d'experts internacionals. Ha participat en una quarantena de projectes de recerca i desenvolupament, dels quals ha liderat una gran part. Fruit de la recerca, també ha col·laborat en més d'un centenar d'articles en revistes d'impacte internacional i ha dirigit una dotzena de tesis doctorals. És revisora de nombroses revistes i ha estat revisora dels tres darrers informes del Grup Intergovernamental d'Experts en Canvi Climàtic (IPCC). Amb el seu equip, també desenvolupa una activitat divulgadora i sensibilitzadora notable respecte als riscos naturals i el desenvolupament sostenible.

Jordi Corominas és catedràtic d'enginyeria geològica de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Ha centrat la recerca en els riscos naturals i, en particular, en l'avaluació de la perillositat i del risc de les esllavissades. Ha participat en més de vint projectes de recerca

nacionals i europeus sobre anàlisi quantitativa de risc, desenvolupament de metodologies d'auscultació i caracterització geomecànica de roques. Ha preparat més de vuitanta informes professionals per a la construcció d'obres d'enginyeria, la protecció del medi ambient i la cartografia de perillositat i riscos per a administracions i empreses consultores. És autor de més de cent cinquanta articles en revistes indexades, llibres i actes de congressos, organitzador de diversos congressos nacionals i internacionals, editor associat de la revista *Landslides*, membre del Comitè Tècnic Conjunt 1 (JTC-1) de Pendents Naturals i Esllavissades de la Societat Internacional de Mecànica de Roques (ISRM), la Societat Internacional de Mecànica de Sòls i Enginyeria Geotècnica (ISSMGE) i l'Associació Internacional d'Enginyeria Geològica i Medi Ambient (IAEG) (2010-2014), i president del Centre Europeu de Riscos Geomorfològics (CERG) del Consell d'Europa (2009-2014).

Carles García Sellés és llicenciat en geografia i màster en climatologia aplicada per la Universitat de Barcelona. Actualment desenvolupa la tasca professional a l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, que consisteix en la predicció i la cartografia d'allaus al Pirineu de Catalunya. Les línies actuals d'investigació se centren en el coneixement del mantell nivall i l'evolució del perill d'allaus, en la climatologia d'alta muntanya i en els efectes del canvi climàtic

en el turisme de neu. Conseqüentment, ha publicat articles en diverses revistes d'impacte internacional, ha participat en projectes de recerca i desenvolupament i ha estat revisor en algunes revistes. Com a especialista en el dispositiu de predicció d'allaus, forma part del grup de treball del Servei Europeu de Previsió d'Allaus (EAWS). En l'àmbit de la divulgació, és formador en matèria de seguretat per allaus de diversos cossos professionals i ha impartit conferències a diverses universitats estatals i estrangeres.

Pere Quintana Seguí és llicenciat en física per la Universitat de Barcelona (2004) i doctor en oceà, atmosfera i superfícies continentals per la Universitat Paul Sabatier de Tolosa de Llenguadoc (2008). Des del 2008, és investigador de l'Observatori de l'Ebre (URL-CSIC), en el qual lidera una línia de recerca centrada en l'estudi del cicle hidrològic continental, la modelització i la relació amb el clima i el canvi climàtic. Sobretot se centra en l'estudi de la hidrologia mediterrània, amb un interès especial per l'Ebre i les altres conques ibèriques, incloent-hi les catalanes. En el camp de la modelització, treballa en la modelització física del conjunt sòl-vegetació-atmosfera i en l'ús de models hidrològics distribuïts de base física. Participa molt activament en el programa internacional HyMeX, ha participat en diversos projectes europeus i nacionals, ha contribuït a nombrosos congressos i tallers, i ha publicat a diverses revistes internacionals d'impacte.

Marco Turco és llicenciat en física per la Universitat de Torí i doctor en física per la Universitat de

Barcelona. Actualment és investigador al Barcelona Supercomputing Center, i centra la investigació en els impactes climàtics regionals sobre els ecosistemes i el cicle hidrològic, amb un interès especial per als mètodes de reducció d'escala, el medi ambient mediterrani, els extrems hidrometeorològics, els incendis forestals i la predicció estacional. És autor de catorze publicacions en revistes revisades indexades i el 2014 va rebre el jove guardó científic atorgat per MedCLIVAR per les investigacions sobre els impactes del canvi climàtic i la contribució a l'anàlisi de les precipitacions extremes.

Agraïments

Volem expressar el nostre agraïment a l'Agència Catalana de l'Aigua, al Servei Meteorològic de Catalunya i a l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, per la informació facilitada. Així mateix, volem agrair a Joan Gilabert i a Montserrat Llasat la col·laboració en l'estudi de les inundacions. També volem manifestar el nostre agraïment als projectes MEDEX, HYMEX i HOPE, en els quals s'ha desenvolupat part de la investigació sobre inundacions i pluges fortes. La investigació en allaus ha tingut el suport del projecte d'investigació CTP-2010, «Influència del canvi climàtic en el turisme de neu al Pirineu», finançat per la Comissió de Treball dels Pirineus i pels contractes del programa de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya des del 1993. Agraïm, també, la col·laboració de Nivorisk - Innovation & Solutions, SL, per la redacció i traducció al francès de la part relativa a les allaus.

Sumari

Síntesi	140
6.1. Introducció	141
6.2. Estimació de l'impacte del canvi climàtic en els riscos meteorològics a Catalunya	141
6.2.1. Onades de calor, onades de fred, nevades i gelades	143
6.2.2. Extremes pluviomètrics.....	144
6.2.3. Altres riscos meteorològics	145
6.3. Riscos socionaturals	146
6.3.1. Inundacions	146
6.3.2. Sequeres	148
6.3.3. Incendis forestals	149
6.4. Riscos geològics	150
6.4.1. Eslavissades.....	150
6.4.1.1. Observacions recents en la freqüència de desprendiments rocosos i esllavissaments superficials	151
6.4.1.2. Observacions recents en la freqüència de grans esllavissaments.....	152
6.4.2. Allaus de neu	152
6.5. Conclusions	154
6.6. Recomanacions	156
Referències bibliogràfiques.....	157

Síntesi

Aquest capítol se centra en els avançaments produïts des del *Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya* (SICCC) en el camp del coneixement de l'evolució dels principals riscos naturals d'origen meteorològic. Els estudis coincideixen a assenyalar un augment de les temperatures extremes, les onades de calor, les nits tropicals, les nits i els dies càlids i la durada de les ratxes càlides. Aquest augment és i continuarà essent més elevat a l'estiu i a les zones de muntanya. Dels extrems pluviomètrics, tan sols es detecta una tendència significativa en l'augment de la precipitació per dia de pluja, en la precipitació de caràcter convectiu i en la duració de les ratxes seques, i és molt probable que aquestes tendències s'agreugin en el futur. Aquests canvis són especialment notables a l'estiu. És possible que l'augment lleuger de les inundacions detectat principalment a l'estiu sigui conseqüència de l'augment de l'exposició i de la vulnerabilitat, però no es pot descartar completament un augment possible de les pluges d'intensitat elevada molt curtes i locals. Amb vista al futur, els escenaris no són concloents, però el possible augment de les precipitacions torrencials comportaria un increment del risc d'inundació. Hi ha indicis que la sequera podria estar augmentant en freqüència i en durada. L'augment de la temperatura estimula l'evapotranspiració; el mantell de neu disminueix i el desglaç s'avança. Això, juntament amb la reforestació de les capçaleres de moltes conques, causa una disminució dels cabals. Aquestes tendències continuaran en el futur i es veuran agreujades per la disminució de la precipitació. Així, doncs, les sequeres meteorològiques, hidrològiques i agrícoles seran més freqüents i duradores al llarg del segle XXI, i afectaran els recursos hídrics, la qualitat de l'aigua, els ecosistemes i els incendis. En els darrers quaranta anys (1970-2010) els incendis a Catalunya mostren una tendència decreixent. La modelització indica que, si no haguéssim dut a terme millores en la gestió i la prevenció d'incen-

dis, l'escalfament del clima hauria comportat una tendència positiva en el nombre d'incendis. Els escenaris de futur apunten cap a un augment en el nombre d'incendis si no s'introdueixen noves millores en el maneig del foc.

Pel que fa als riscos geològics d'origen meteorològic, l'interès dels experts i els cercadors electrònics han facilitat l'inventari d'esllavissades i de desprendiments rocosos, cosa que ha comportat la superació de la dificultat de treballar amb fenòmens dispersos pel territori. L'augment de la qualitat i la resolució de les observacions ha permès detectar un nombre elevat de casos de caràcter local, sovint amb una freqüència anual, i rebaixar lleugerament els llindars de pluja que els desencadenen. No s'han detectat canvis evidents en el comportament dels grans esllavissaments, més sensibles a la pluja estacional. S'ha observat una tendència temporal positiva anual en l'activitat de grans allaus, estadísticament significativa, des del decenni del 1970 fins al present. Respecte a la tipologia, s'ha enregistrat un augment de la magnitud i dels episodis d'allaus de neu humida, tot i que no hi ha prou dades per a parlar de tendències. En aquest sentit, destaquen els cicles de grans allaus humides a causa de la pluja dels últims hiverns, 2013-2014 i 2014-2015. En els darrers quaranta anys, al conjunt del Pirineu s'ha observat una correlació negativa, estadísticament significativa, entre l'ocurrència de cicles de grans allaus i l'índex de l'oscil·lació de l'Atlàntic Nord (NAO). Respecte a l'evolució de la sinistralitat per allaus des del darrer informe (SICCC, 2010), s'ha incrementat la mitjana anual d'accidents i de ferits; contràriament, el nombre de morts ha disminuït, probablement per un augment en l'ús de les mesures d'autoprotecció i la conscienciació.

Paraules clau

temperatures extremes, inundacions, sequeres, incendis forestals, esllavissades, allaus

6.1. Introducció

L'any 2010 es va presentar el *Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya* (SICCC; Llebot, 2010). En el capítol 6, sobre riscos associats al clima (Llasat *et al.*, 2010), es tractaven, a més dels conceptes vinculats amb els riscos naturals (com ara el risc, la vulnerabilitat o la prevenció), tots els riscos que tenien un component meteorològic o climàtic. Es presentaven la variabilitat, les tendències i les projeccions (si n'hi havia) dels riscos estrictament meteorològics (les onades de calor i les altes temperatures; les onades de fred, les nevades i les gelades; els temporals de vent i els tornados; la pedra, la calamarsa i les tempestes elèctriques, i les pluges fortes), que seguint la nomenclatura de l'Oficina de les Nacions Unides per a la Reducció del Risc de Desastres (UNISDR, 2009) es podrien qualificar de riscos socionaturals (les inundacions, les sequeres i els incendis forestals), i, finalment, els riscos geològics vinculats al clima (les esllavissades i les allaus de neu). A més dels trets característics, se n'analitzava la distribució temporal i espacial a Catalunya, les tendències observades i les consideracions per als escenaris futurs, tenint en compte els resultats presentats en els primers capítols del mateix informe i basats, principalment, en els treballs del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC).

Cinc anys després, i en vista del darrer informe del Grup Intergovernamental d'Experts en Canvi Climàtic (IPCC, 2013, 2014), aquest capítol no repeteix el mateix esquema, cosa que esdevindria redundant. Partint de les conclusions del capítol corresponent del SICCC, de la identificació d'incerteses, punts febles i temes que cal explorar, i de les propostes de millora, presenta les novetats assolides en aquests darrers anys pel que fa a les tendències i els escenaris, o, en el cas que no es disposi d'aquests darrers, una discussió basada en els nous escenaris de temperatura i precipitació. Es fa, també, una reflexió crítica que connecta amb les propostes que es van presentar al capítol del SICCC, i es mostren les mesures d'adaptació (en aquest cas, referides a la mitigació del risc i a la millora de la resiliència) que ja es duen a terme o que s'aconsellaria implantar. Igual que en el SICCC, els riscos climàtics relacionats amb el mar, com ara els temporals de mar i l'onatge, no es consideren en aquest capítol perquè ja formen

part del capítol 8. Així mateix, tan sols es fa una breu aproximació a la sequera, que és tractada sobretot al capítol 7. Respecte als altres riscos d'origen meteorològic, aquest capítol se centra en els avenços posteriors a la publicació del SICCC i evita qualsevol redundància bibliogràfica respecte del que ja es va presentar en l'informe anterior.

Cal tenir present que l'efecte del canvi climàtic sobre els riscos naturals també pot afectar la seguretat nacional i internacional, tal com s'ha reconegut en diversos documents de les Nacions Unides, l'OTAN o la Unió Europea, entre d'altres, i en els documents més recents presentats per l'IPCC (2012, 2014) o, en el cas de Catalunya, en el presentat el 2012 (Llasat *et al.*, 2012). En aquest context, l'impacte va més enllà de les fronteres, ja que s'han de tenir presents les conseqüències en altres regions que poden comportar moviments migratoris («refugiats climàtics») o confrontaments. Tanmateix, incloure'ls aquí allargaria massa el capítol, que ultrapassaria els objectius d'aquest INFORME. Tampoc no es tracten alguns riscos hidrometeorològics per als quals encara no hi ha prou evidències per a concloure res sobre la tendència ni els escenaris futurs o no s'ha produït cap avenç després del SICCC. Finalment, altres riscos, com ara els marítims, són tractats en altres capítols d'aquest INFORME.

Tenint en compte les consideracions damunt dites, el capítol es divideix en tres grans apartats: els riscos vinculats exclusivament amb les condicions meteorològiques i climàtiques, els riscos en què intervenen altres factors naturals i humans, i, finalment, els riscos geològics que depenen intensament de les condicions climàtiques o meteorològiques.

6.2. Estimació de l'impacte del canvi climàtic en els riscos meteorològics a Catalunya

En aquest capítol, l'evolució, les tendències i els escenaris dels extrems pluviomètrics i de temperatura s'han estudiat principalment a partir dels índexs d'extrems definits pel Grup d'Experts en Detecció del Canvi Climàtic i Índexs (ETCCDI) de l'Organització Meteorològica Mundial (OMM) (per a més detalls, vegeu <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDI> o WMO, 2009). Per a identificar-los, s'han

utilitzat les abreviacions angleses habituals (taula 6.1). Com a exemples, l'SDII donaria una certa idea de la intensitat de la precipitació, mentre que l'R90N es podria vincular amb el nombre de dies amb pluges fortes, i que un augment o una disminució de l'R95P ens indicaria un canvi més petit o més gran en els episodis de molta pluja, possiblement associats amb les inundacions. L'RX5DAY es relacionaria amb episodis de pluges fortes continuades, com els que es van produir entre el 6 i el 8 de novembre del 1982, o entre el 2 i el 5 d'octubre del 1987. Finalment, un augment de l'índex CDD apuntaria cap a una probabilitat més gran de sequeres, i les onades de calor es podrien relacionar amb el WSDI.

No sempre s'ha pogut disposar dels escenaris futurs. Quan això ha estat possible, els escenaris s'han obtingut a partir de l'aplicació d'un mètode

de disminució d'escala o downscaling estadístic (MOS) a les sortides de deu models climàtics regionals (RCM), els quals s'han seleccionat, per la simulació més bona, dels escenaris regionals generats en el context del projecte europeu ENSEMBLES (Linden *et al.*, 2009; Turco *et al.*, 2013c). Per tal de donar continuïtat als resultats presentats en el SICCC, s'ha treballat a una resolució de 20 x 20 km i s'ha utilitzat la base de dades actualitzada Spain02 per al període 1950-2008 (Herrera *et al.*, 2012) per a analitzar les tendències i validar les simulacions sobre Espanya i, particularment, sobre Catalunya, tant per a l'escenari 20C3M (període 1971-2000) com per a l'escenari A1B (2001-2100) (Turco *et al.*, 2015). Els RCM d'ENSEMBLES s'han alimentat amb les observacions proporcionades per la reanàlisi europea ERA-40 i per les projeccions dels models climàtics globals (GCM). Tal com mostra la figura 6.1, les simulacions a partir

TAULA 6.1. Índexs d'extrems utilitzats en aquest capítol

Abreviació	Unitat	Nom	Definició
SDII	mm/dia	Índex simple d'intensitat diària	Precipitació total per dia de pluja
R90N	dies	Nombre de dies amb precipitació superior al percentil 90	Nombre de dies amb precipitació superior a la recollida al 90 % del total dels dies
R95P	%	Percentatge de dies molt humits	Percentatge de precipitació causada per dies en què la pluja diària ha superat el percentil del 95 %
R95PTOT	%	Fracció de la precipitació total causada per dies molt humits	Percentatge de la precipitació total causada per dies molt humits
RX5DAY	mm	Precipitació màxima acumulada en un període de cinc dies	Precipitació màxima acumulada en un període de cinc dies amb precipitació superior o igual a 1 mm
β	%	Fracció de la precipitació convectiva respecte de la total	Fracció de precipitació amb intensitat en cinc minuts per sobre de 35 mm/h respecte de la precipitació total
CWD	dies	Durada màxima de ratxes humides	Nombre màxim de dies consecutius amb pluja > 1 mm
CDD	dies	Durada màxima de ratxes seques	Nombre màxim de dies consecutius sense pluja o amb precipitació diària per sota d'1 mm
Tx	°C	Temperatura màxima	Temperatura màxima diària per al període donat
Tn	°C	Temperatura mínima	Temperatura mínima diària per al període donat
TR	dies	Nits tropicals	Nombre de dies amb Tn > 20 °C
ES95pTx	°C	Percentil 95 de la Tx diària per a l'estiu ampliat	Percentil 95 de la temperatura màxima diària per al període comprès entre el maig i l'octubre
EW05pTn	°C	Percentil 95 de la Tn diària per a l'hivern ampliat	Percentil 95 de la temperatura mínima diària per al període comprès entre el novembre i l'abril
WSDI	dies	Ratxes càlides	Nombre de dies en què, com a mínim, hi ha sis dies consecutius amb Tx > 90 %
FD	dies	Dies de gelada	Nombre de dies amb Tn ≤ 0 °C

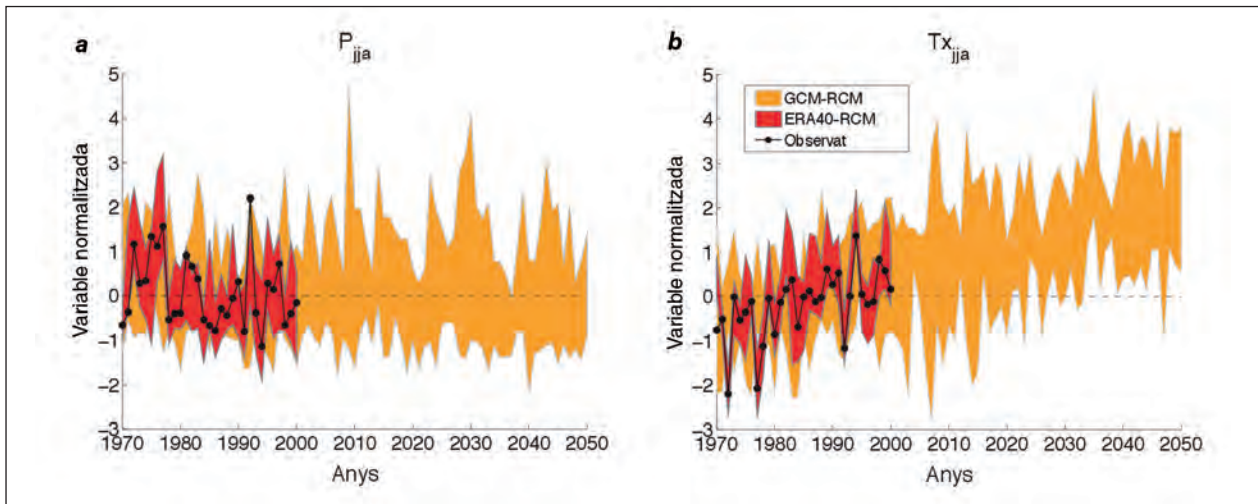


FIGURA 6.1. Evolució de la precipitació i la temperatura màxima estival (JJA) de Catalunya, normalitzades respecte al període 1970-2000. La línia negra representa les dades observades en aquest període; la banda vermella mostra els valors obtinguts a partir dels RCM alimentats amb les observacions de l'ERA-40. En el cas de la banda taronja, els models regionals s'han alimentat amb els escenaris generats pels GCM. L'amplitud de les bandes donen una idea del grau d'incertesa.

Font: Figura modificada a partir de Turco *et al.* (2014).

de la reducció d'escala dels RCM alimentats amb l'ERA-40 s'ajusten bastant bé a les observacions, així com els alimentats pels GCM, que a més conserven la variabilitat interanual (Turco *et al.*, 2013c, 2014).

Així mateix, s'han tingut presents les tendències i els escenaris proveïts en els capítols 4 i 5 d'aquest INFORME, i també el treball de Barrera-Escoda *et al.* (2014) per a la conca mediterrània nord-occidental. En aquest darrer, es va reduir l'escala a 10 km aplicant el WRF-ARW a les sortides d'extrems de temperatura i precipitació de l'IPCC-SRES, per als escenaris B1, A1B i A2, i per al període 1971-2050, cosa que també va ser validada amb la Spain02.

6.2.1. Onades de calor, onades de fred, nevades i gelades

Com ja s'ha comentat en els primers capítols i d'acord amb les constatacions del darrer informe de l'IPCC (2013), hi ha una confiança molt alta en un augment de les temperatures, que seria molt més marcat a l'estiu i per a les temperatures màximes (vegeu el capítol 4 d'aquest INFORME). Prenent com a exemple les observacions dels observatoris de l'Ebre i Fabra, s'ha constatat un augment de la durada de les ratxes càlides amb valors de +1,03 i +0,99 dies/decenni per als períodes 1905-2013 i 1914-2013, respectivament (BAIC, 2014). En el ca-

pítol 5 es mostra que l'augment projectat de la mediana de la temperatura a Catalunya és d'1,4 °C per al període 2031-2050, respecte del període de referència 1971-2000, un increment que passaria a ser d'1,8 °C a l'estiu. L'increment tèrmic observat i projectat, doncs, és particularment important per a poder estimar l'augment d'onades de calor en un futur immediat.

La figura 6.1 mostra l'evolució de la Tx estival (JJA) mitjana a Catalunya, obtinguda a partir de la base de dades Spain02 per al període 1970-2000, així com la modelitzada per al període 1970-2050. Les tendències observades mostren un augment de la Tx estival de 0,60 °C/decenni a 0,80 °C/decenni, amb una significança superior al 99 % (Turco *et al.*, 2014). Com il·lustra la figura, el 2050 la Tx estival es podria arribar a incrementar uns 3 °C.

En el cas de la conca mediterrània nord-occidental, Barrera-Escoda *et al.* (2014) troben un augment molt pronunciat per a tots els escenaris de la Tx del període maig-octubre entre el 2031 i el 2050, que arribaria a +3,5 °C en l'horitzó del 2050 i a +1,5 °C en el cas de la mínima. També hi ha acord entre els escenaris del 2050, pel que fa a l'ES95pTx, amb un augment de 5 °C. Per a l'índex equivalent, relatiu a les temperatures mínimes (EW05pTn), es troba una gran variabilitat interanual fins al 2030, a partir del qual l'augment arribaria a uns 2 °C el 2050, res-

pecte del període 1971-2000, i seria més marcat a les zones de muntanya. Mentre que el nombre anual de nits tropicals (TR), s'incrementaria en més de 25 dies/any, el nombre de dies de gelada (FD) podria decreïxer, també, en uns 25 dies/any.

6.2.2. Extremes pluviomètrics

D'acord amb les conclusions ja presentades en el SICCC, es pot continuar afirmant amb molta confiança (utilitzant el llenguatge de l'IPCC) que en els darrers seixanta anys no hi ha cap tendència significativa i generalitzada a tot o a gran part de Catalunya del nombre de dies de pluges fortes, ni de la màxima precipitació en vint-i-quatre hores, ni dels índexs de pluges fortes, ni del percentatge de precipitació total procedent dels episodis amb una precipitació superior al percentil 90 o 95 (Turco *et al.*, 2011; BAIC, 2014).

Quan es treballa amb les sèries llargues dels observatoris de l'Ebre i Fabra, l'SDII és l'únic índex que presenta una tendència positiva estadísticament significativa en ambdós casos (SMC, 2014). L'índex RX5DAY presenta una disminució significativa de -5 mm/decenni a l'estiu a l'Observatori de l'Ebre (Turco *et al.*, 2011). Per contra, anualment i per a la sèrie 1905-2013 es detecta un augment de $+2,26$ mm/decenni en aquesta estació, que seria de $+2,01$ mm/decenni segons l'Observatori Fabra, si bé cap dels dos són significatius al 95 %. Convé recordar que els primers decennis del segle xx van ser particularment secs. La precipitació total anual en els dies molt plujosos, P95pTOT, presenta una tendència positiva i estadísticament significativa de $+7,28$ mm/decenni segons l'Observatori Fabra (SMC, 2014).

Una altra novetat introduïda després del SICCC ha estat l'estudi de l'evolució de la precipitació convectiva a les conques internes de Catalunya a partir de les dades de cinc minuts de precipitació de quaranta-tres pluviògrafs del Sistema Automàtic d'Informació Hidrològica (SAIH) de l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA) (1996-2011) i del pluviògraf Jardí de l'Observatori Fabra (1928-1977) (Llasat *et al.*, en premsa). Aquest estudi aporta una llum nova a l'evolució de les precipitacions intenses a Catalunya, ja que mostra un augment generalitzat de la precipitació convectiva, un augment de la fracció de precipitació convectiva

respecte de la total i una disminució del nombre de dies i d'episodis convectius, principalment a l'estiu. Tenint en compte que, a més, no es detecta cap tendència de la precipitació generalitzada a l'estiu (figura 6.1), apuntaria cap a la hipòtesi d'un augment de la torrencialitat de la pluja, amb menys episodis però més intensos. Aquest comportament no es detectaria a l'Empordà, on el component convectiu de la precipitació disminueix i els episodis són menys intensos, sobretot a l'estiu i a la tardor.

Pel que fa als extrems inferiors de la pluja, és a dir, a les situacions que podrien ocasionar una manca de recursos, l'índex CDD a escala anual mostra una tendència coherent espacialment i temporalment, amb un augment de 0,6 a 0,7 dies/decenni des de principis del segle xx (SMC, 2014), un comportament que també es detecta per a les sèries més llargues dels observatoris de l'Ebre i Fabra, amb augments significatius al 99 % de 2,7 i 2,1 dies/decenni, respectivament, per al període 1951-2003 (Turco *et al.*, 2011). Aquesta tendència positiva és corroborada per altres treballs d'àmbit estatal, com el de López-Moreno *et al.* (2010). Tanmateix, quan es prenen les sèries 1905-2013 i 1914-2013 dels observatoris de l'Ebre i Fabra, respectivament, no es troba cap tendència significativa al 95 % (SMC, 2014).

Igual que succeeix amb les tendències, solament existeix un acord elevat entre els diferents escenaris regionals en el cas de l'índex CDD (figura 6.2). Per a l'horitzó 2011-2040, una gran part del país experimenta un augment superior al 25 % en la durada de les ratxes seques, sobretot a la primavera i a l'estiu, que s'estén espacialment i temporalment per als escenaris posteriors i arriba a afectar gairebé tot el país i totes les estacions de l'any en l'horitzó 2071-2100 (Turco *et al.*, 2015). Així, es pot assegurar, amb un nivell de confiança molt alt, que, amb excepció de l'hivern, totes les estacions de l'any experimenten un increment en l'índex CDD per a tots els horitzons futurs. Aquests resultats es correspondrien amb la disminució de la mediana de la precipitació al país, que arriba a ser propera al 7 % per a l'escenari 2031-2050, i superior al -9 % a totes les estacions de l'any amb excepció de l'hivern, com indiquen els autors del capítol 5 d'aquest INFORME.

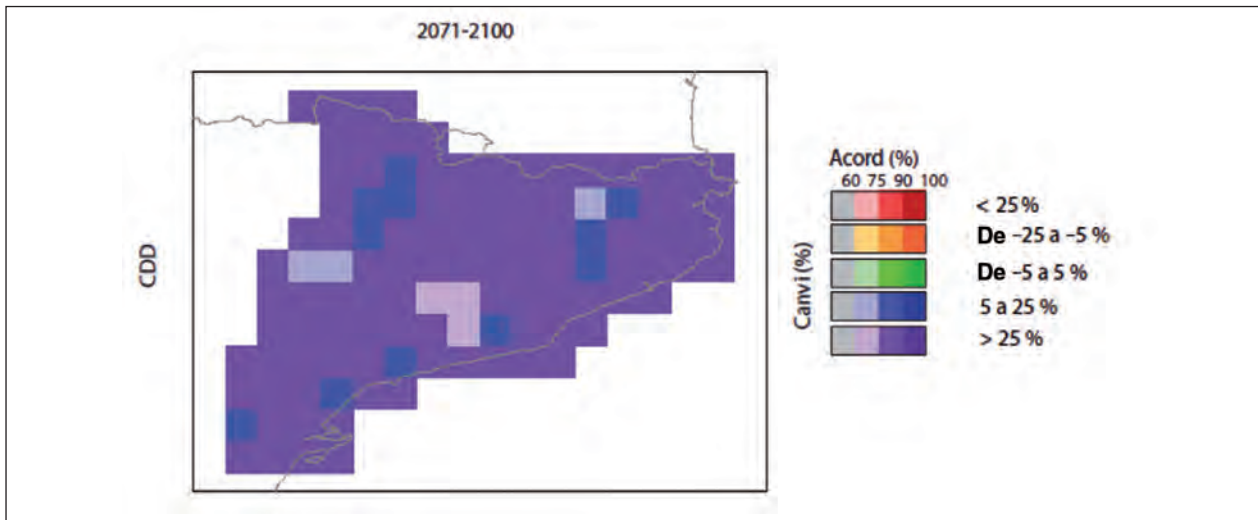


FIGURA 6.2. Projeccions futures de l'índex CDD per al període 2071-2100. S'indica el percentatge de canvi respecte de l'escenari base (1971-2000). L'acord es refereix al percentatge de models del conjunt analitzat que coincideixen en l'augment o en la disminució.

Aquests resultats referits exclusivament a Catalunya s'adeqüen als trobats per Barrera-Escoda *et al.* (2014) per al nord-oest de la Mediterrània: la distribució de probabilitats apunta cap a un augment de la freqüència de les precipitacions diàries per sobre dels 200 mm/24 h, tot i que es podria arribar a valors per sobre dels 500 mm/24 h. En el període instrumental solament ens consten valors d'aquesta magnitud o més: a Catalunya, en els episodis d'inundació de l'octubre del 1940 i del novembre del 1982, ambdós als Pirineus. El nivell d'acord per als altres índexs relacionats amb pluges fortes és baix a escala regional. Un augment del 5 % de l'índex R95P a la vall de l'Ebre i a algunes regions de l'interior del país és probable, i també del R95PTOT per a la costa i la vall de l'Ebre. Malgrat que no s'espera que l'índex CWP variï significativament, és més probable que no hi hagi una reducció d'uns cinc dies l'any al Pirineu occidental per al 2021-2050. Per contra, Barrera-Escoda *et al.* (2014) destaquen l'augment de l'índex CDD en més de deu dies l'any per a l'horitzó 2021-2050.

6.2.3. Altres riscos meteorològics

Respecte als episodis de nevades excepcionals, no n'hi ha cap tendència manifesta. Malgrat que s'han produït episodis anòmals de nevades a cotes baixes i en mesos poc freqüents, acompanyats fins i tot de tempestes, com el del març del 2010, la comparativa amb episodis anteriors no permet concloure'n cap increment (Bech *et al.*, 2012; Llasat *et al.*, 2014b). La disminució del nombre anu-

al de dies de neu (-0,16 dies/decenni) només és significativa a l'Observatori de l'Ebre (BAIC, 2014).

Pel que fa als temporals de vent, els temporals marítims, els tornados i els petits huracans mediterranis o medicans, no ens consta cap descobriment nou sobre l'impacte del canvi climàtic a Catalunya des que es va publicar el SICCC, en el qual es van tractar detingudament (Llasat *et al.*, 2010). Coincidint amb les conclusions de l'IPCC envers aquests riscos, els problemes principals rau en la incertesa elevada dels escenaris pel que fa al vent i en la poca robustesa de les evidències a causa de la curta longitud i l'heterogeneïtat de les sèries d'observació. És el cas dels tornados, per als quals ja es comentava que l'augment detectat seria conseqüència de l'augment de la percepció i de les observacions (Gayà *et al.*, 2011), tal com ha quedat palès en un estudi intensiu recent sobre els tornados a Espanya (Gayà, 2015). Sí que existeixen, per contra, nombrosos estudis de casos, com ara els de Pineda *et al.* (2011) o Bech *et al.* (2015).

Respecte a les pedregades, se segueix constatant que encara no es pot assegurar cap tendència, sobretot per la dificultat d'obtenir informació sobre els episodis i els impactes, i, consegüentment, sobre l'evolució, tal com ja indiquen alguns articles que tracten, més o menys a bastament, sobre la climatologia. Seria el cas de l'estudi de l'impacte social de les pedregades, la pluja i el vent (Barbería *et al.*, 2014) o de les característiques radar de les cèl·lules

convectives associades a les pedregades (Rigo *et al.*, 2016). En el cas de les tempestes elèctriques, si bé la xarxa de detecció de llamps del Servei Meteorològic de Catalunya disposa d'informació dels darrers anys, encara no existeix una sèrie prou llarga per a extreure conclusions significatives sobre la tendència.

Tant en el cas de precipitacions molt intenses com en el cas de temps rúfol, és necessari tenir present l'evolució dels ciclons o depressions mediterrànies, molt relacionats amb aquests episodis a la Mediterrània, com es va demostrar en el projecte MEDEX (Jansà *et al.*, 2014), finalitzat després de la publicació del SICCC. La freqüència màxima de ciclons es registra al nord-oest de la regió, i en el cas de Catalunya, les pluges fortes són molt afavorides per la presència d'una pressió baixa al mar catalanobalear (Campins *et al.*, 2006). El paper dels ciclons també és important en el desenvolupament dels temporals de vent, malgrat que a diferència de les pluges fortes, una gran part dels ciclons es forma fora de l'àrea mediterrània, majorment a l'Atlàntic. Per tant, els canvis que es puguin produir en el futur en la freqüència i la trajectòria dels ciclons seran fonamentals en ambdós tipus de fenòmens. Considerant alguns estudis que no es van incloure en el SICCC, s'observa una disminució en la freqüència dels ciclons, sobretot a l'hivern i a la primavera, a l'oest de la Mediterrània (Guijarro *et al.*, 2006). Respecte als escenaris, Tous *et al.* (2009) apunten cap a un augment de les dimensions dels ciclons a la Mediterrània, si bé la intensitat, el cicle de vida i el recorregut serien similars als actuals. Afegeixen, també, que si es descarten els episodis de curta durada i trajectòria, els escenaris apunten cap a una disminució del nombre de ciclons intensos i de les trajectòries més llargues i cap a un augment dels ciclons moderats. Cal dir que els ciclons mediterranis més intensos no necessàriament són els que s'associen a temps més adversos. De fet, el 77 % dels temporals de vent de la Mediterrània serien produïts per ciclons moderats o febles (Ulbrich *et al.*, 2013). D'altra banda, una configuració positiva de l'oscil·lació de l'Atlàntic Nord (NAO) habitualment és desfavorable a l'entrada de ciclons de l'Atlàntic que arribin a la Mediterrània occidental, així com als episodis de pluges intenses de tardor a Catalunya. Conse-

güentment, un augment de freqüència de la fase positiva de la NAO, tal com preveuen alguns models, comportaria una disminució d'aquest tipus de situacions de temps adversos.

6.3. Riscos socionaturals

6.3.1. Inundacions

Més del 40 % dels municipis de Catalunya presenten un risc d'inundació alt o molt alt, la major part dels quals a la costa, com ja es va veure al SICCC. Una actualització de l'estudi presentat al SICCC (Llasat *et al.*, 2009) ha mostrat que entre el 1981 i el 2010 (un període amb informació «homogènia») es van enregistrar 219 episodis d'inundació a Catalunya, el 71 % dels quals a comarques costaneres, sobretot al Maresme (48 % del total) i, ja a escala municipal, a Arenys de Mar (47 episodis) (Llasat *et al.*, 2014a). D'aquests 219 episodis, un 11 % va produir danys greus, amb una destrucció parcial o total d'infraestructures (denominats *catastròfics*), i un 53 %, danys importants (*extraordinaris*). La major part d'aquests episodis es van enregistrar a la tardor (48 %) i a l'estiu (32 %). En comparació amb l'estudi del període 1900-2007 que es va comentar al SICCC, l'estiu presenta una freqüència d'episodis extraordinaris referenciats (o coneguts) més gran, probablement a causa de la possible heterogeneïtat de la informació dels primers decennis del segle (en els quals no hauria quedat constància de tots els episodis) i dels canvis en les conques, però no podem descartar totalment un augment dels episodis torrencials de molt curta durada, com s'ha posat de manifest en l'apartat anterior. La figura 6.3 mostra el nombre d'episodis d'inundació anuals que han afectat Catalunya des del 1950. S'hi observa un augment amb el temps, que en part es pot deure a l'augment de la informació disponible des del 1981, motiu pel qual el càlcul de la tendència s'ha fet a partir d'aquesta data. Així, l'estudi de la tendència dins del període informativament homogeni (1981-2010) mostra un augment d'un episodi d'inundació/decenni amb una confiança del 95 %, que és molt més acusat que el presentat en el SICCC i que és conseqüència de l'augment de les inundacions extraordinàries. Aquest augment és de 0,8 episodis per decenni quan es refereix al període de juliol a setembre.

L'anàlisi de la sèrie d'inundacions enregistrades a Catalunya per al període 1301-2012 (Barrera-Escoda *et al.*, 2015) corrobora la variabilitat natural de les inundacions catastròfiques, molt vinculada a les oscil·lacions climàtiques i ja mostrada en el SICCC. L'estudi apunta cap a una relativa bona correlació entre aquestes inundacions i l'activitat solar per mitjà de l'impacte que podria tenir en la circulació general (Moffa-Sánchez *et al.*, 2014), un factor que caldria tenir present per a l'elaboració d'escenaris futurs. Per al mateix període, les inundacions extraordinàries mostren una lleugera tendència positiva, sobretot a partir de mitjan segle XIX, com ja s'havia mostrat en el SICCC per al període 1301-2002. Aquest augment sobretot és degut a les inundacions produïdes per aiguats costaners, principalment a conseqüència de l'augment estival. Tanmateix, és difícil conèixer les causes de les tendències (o no tendències) de les inundacions, ja que hi intervenen factors climàtics (com ara l'augment d'episodis de precipi-

tació intensa), hidrològics (com, per exemple, els canvis en els usos del sòl), hidràulics (com ara els embassaments), d'exposició (com, per exemple, l'augment de la població en zones inundables) i de vulnerabilitat (com ara la resistència de les infraestructures). Les mesures de mitigació, com ara les xarxes de drenatge i els dipòsits fluvials, també poden modificar qualsevol tendència natural. A més, existeix un augment de l'impacte econòmic de les inundacions que es deuria, principalment, a l'augment dels béns assegurats i del cost de la vida, tal com mostra un estudi realitzat a tot l'Estat espanyol (Barredo *et al.*, 2012). De fet, entre el 1971 i el 2010 el Consorci de Compensacions d'Assegurances va pagar 20.900.000 € en concepte de danys per inundacions.

Amb vista al futur, els escenaris no són concloents, però tenint en compte el possible augment de les precipitacions torrencials i, molt probablement, de l'exposició i la vulnerabilitat, tot apunta cap a

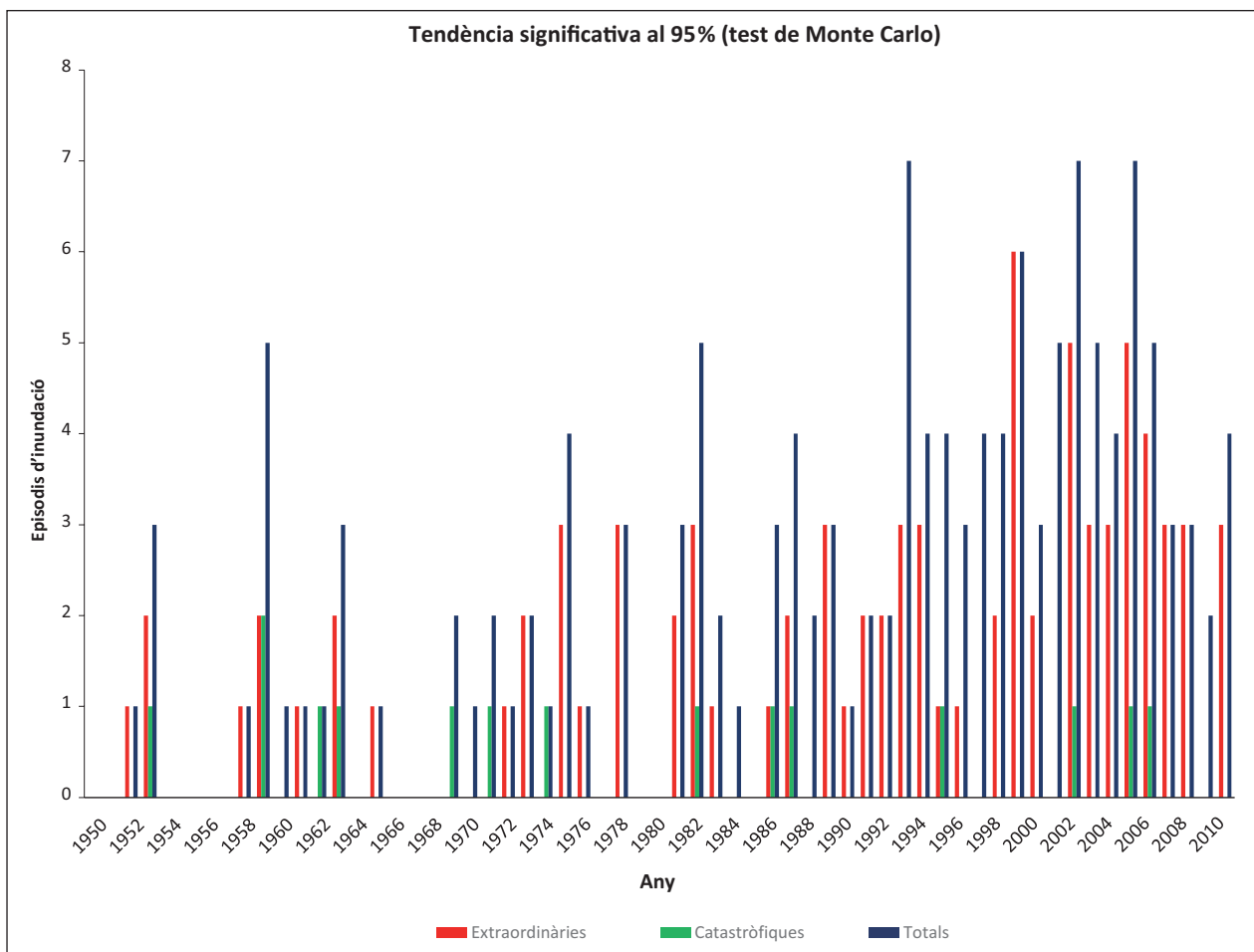


FIGURA 6.3. Evolució temporal dels episodis d'inundació a Catalunya, tenint en compte les diferents categories, per al període 1950-2010.

un increment significatiu del risc d'inundacions, el qual es podria mitigar mitjançant un augment de la previsió, la prevenció i la resiliència.

6.3.2. Sequeres

El coneixement que tenim sobre les sequeres a Catalunya ha progressat des del SICCC. Cada cop hi ha més dades de qualitat *in situ*, comprovades i homogeneïtzades. Es disposa de nous jocs de dades de satèl·lit que ens permeten tenir accés a dades difícils de mesurar. S'han fet nous progressos en el camp de la modelització del cicle de l'aigua continental, incloent-hi la creació d'una base de dades reticular d'alta resolució pensada per a forçar models de base física (SAFRAN, Quintana Seguí *et al.*, 2015) i la implementació d'un model físic distribuït (SURFEX) que permet estudiar els processos físics subjacents a alta resolució. Els models climàtics regionals han anat augmentant la resolució i, sobretot, acoblen cada cop més processos (com és el cas del Med-CORDEX, una iniciativa pel desenvolupament de models climàtics regionals per al Mediterrani).

Els resultats més recents mostren que la sequera augmenta en freqüència i esdevé més persistent a moltes àrees de la Mediterrània, incloent-hi parts de Catalunya (Sousa *et al.*, 2011; Vicente-Serrano *et al.*, 2014). Si bé meteorològicament no s'observen tendències anuals de precipitació, estacionalment la precipitació disminueix a la primavera (Luis *et al.*, 2010), com ja es va comentar al SICCC. També, com s'ha esmentat, s'observa un augment del nombre de dies secs consecutius en moltes zones del país (Turco *et al.*, 2011). Això s'uneix a l'augment observat de les temperatures tant a escala anual com estacional, que és especialment important a la primavera i a l'estiu (Río *et al.*, 2011; Kenawy, 2012). L'augment de la temperatura estimula l'evapotranspiració sobretot en els períodes en què el sòl encara és humit (com ara la primavera). També s'ha observat que el gruix del mantell de neu del Pirineu va disminuint (Morán Tejada *et al.*, 2012) i, per l'augment de les temperatures, el desglaç s'avança. Així, doncs, el període sec estival s'està allargant i les reserves d'aigua per a fer-hi cara disminueixen, fet que ens fa més vulnerables en els anys extremament secs. Als efectes purament climàtics s'han de sumar els canvis en els usos del sòl. L'augment de la massa forestal a les

capçaleres de molts rius estimula l'evapotranspiració, cosa que causa una disminució del cabal dels rius (Gallart *et al.*, 2011; López Moreno *et al.*, 2011). Aquest canvi redueix encara més l'aigua disponible per a fer cara als períodes extrems.

Pel que fa al cabal, també cal tenir en compte el grau important d'aprofitament de les aigües, fet que deixa poc marge de gestió. De fet, s'ha observat que, a causa de la suma dels processos mencionats, el cabal anual, hivernal i de primavera disminueix a la major part de les conques (Lorenzo Lacruz *et al.*, 2012; Martínez Fernández, 2013). L'augment de la temperatura i la prolongació del període sec estival provoca un augment de la demanda d'aigua dels cultius. Així, doncs, l'estrès hídric es pot veure afectat tant pel que fa a l'oferta com pel que fa a la demanda.

En el futur s'espera que les tendències observades continuïn, és a dir, que hi hagi una disminució del nombre total de dies de precipitació, que n'augmenti la variabilitat i que disminueixi a la primavera i a l'estiu, cosa que reforçaria els llargs períodes secs de l'estiu (López França *et al.*, 2014). La precipitació total anual podria disminuir, però en aquest aspecte hi ha més incertesa. L'increment de la temperatura seguirà comportant un augment de la demanda evaporativa de l'atmosfera, però la pèrdua d'aigua per evaporació i evapotranspiració dependrà de la massa vegetal i de l'aigua superficial disponible. La disminució de la coberta de neu, tant per la disminució de la precipitació com pel retrocés de les glaceres, afectarà els recursos hídrics de les conques amb un element important d'innivació, com és el cas de la conca l'Ebre. D'altra banda, s'esperen sequeres més freqüents i persistents, especialment cap a la meitat i el final del segle XXI (López Bustins *et al.*, 2013; Barrera Escoda *et al.*, 2013; Jenkins *et al.*, 2014; Forzieri *et al.*, 2014).

Respecte al cabal, l'estudi del CEDEX (2011) assenyalava una disminució de l'escorrentia anual a la conca de l'Ebre de prop del -14 % per a l'escenari A2 i per al període 2041-2070, respecte del període 1961-1990, que en el cas de les conques internes de Catalunya seria del -4 % (2041-2070). Tanmateix, l'impacte sobre el cabal i la sequera pot variar molt regionalment. De les conques que es poden

veure afectades més negativament destaquen les del Ter, el Fluvià i la Muga.

Els efectes de la sequera no solament tindran un impacte en la quantitat d'aigua disponible, sinó que també n'afectaran la qualitat a causa de l'augment de la temperatura i l'increment de la freqüència, la durada i la gravetat de les sequeres. Això és negatiu per als ecosistemes, ja que afectarà els serveis ecosistèmics que ens presten, i per a tots els usuaris de l'aigua. També és probable que la sequera tingui un impacte negatiu en els incendis forestals. Els impactes de la sequera no són només locals; les sequeres que es produeixen a altres indrets del món tenen impactes a Catalunya. Aquests impactes es poden manifestar de diverses maneres: per exemple, per mitjà del preu de l'aigua virtual importada (l'aigua utilitzada per a la producció dels productes i els serveis importats) o per mitjà dels efectes de la inestabilitat que la sequera pugui causar a altres països (com ara migracions o conflictes).

6.3.3. Incendis forestals

En el SICCC ja es va introduir el fet que el nombre d'incendis forestals i l'àrea cremada anualment estaven disminuint, cosa que es justificava per la millora de la prevenció i la gestió del risc. L'anàlisi detallada del període 1970-2010, portada a terme en col·laboració amb el Servei de Prevenció

d'Incendis Forestals de la Generalitat de Catalunya (SPIF), corrobora aquestes observacions (Turco *et al.*, 2013b). Amb l'objectiu d'eliminar l'heterogeneïtat de les sèries, a conseqüència del canvi de criteris en la recopilació d'informació, sols s'han considerat els incendis que han cremat una àrea superior a 0,5 ha. Per poder discriminar la influència dels factors climàtics de tota la resta (com ara la prevenció o l'extinció), es va construir un model de regressió multilinear (MLR) en funció de la precipitació i la temperatura, tant de l'estiu corresponent (figura 6.1) com dels mesos anteriors (particularment, la temperatura i la precipitació de dos anys anteriors).

Aquest model es va aplicar a les dades de la Spain02 (figura 6.4). Els resultats han permès descobrir que la tendència actual expressada en escala logarítmica i obtinguda com la mitjana de mil simulacions és de $-0,042$ incendis/any, però que hauria estat de $+0,016$ incendis/any a conseqüència del forçament climàtic (Turco *et al.*, 2014). Aquesta diferència revela la importància de les tasques d'extinció i de prevenció d'incendis, la millora de les quals ha comportat passar d'una tendència positiva associada al canvi climàtic a una tendència negativa pel que fa al nombre anual d'incendis (Turco *et al.*, 2013b, 2013a). En el cas de l'àrea cremada, en comptes de ser de $-0,049$ ha/any hauria estat de $-0,013$ ha/any (Turco *et al.*, 2014). El fet

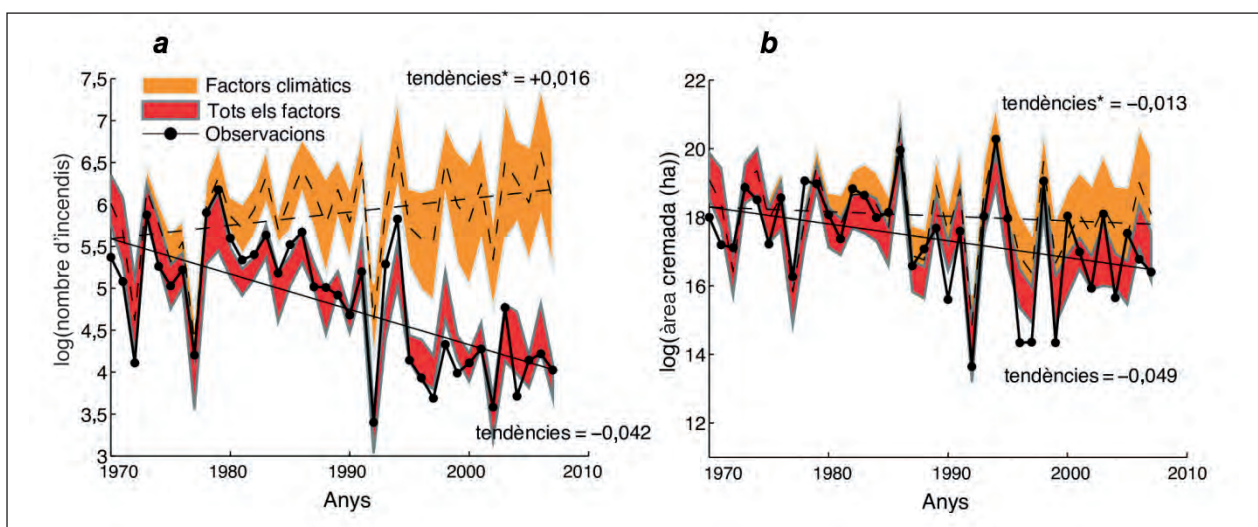


FIGURA 6.4. Evolució del nombre d'incendis forestals (a) i de l'àrea cremada (b) considerant solament la influència dels factors climàtics (banda taronja) i de tots els factors (banda vermella). L'amplitud de la banda dona una idea del grau d'incertesa i inclou el 90 % de l'interval de confiança de les simulacions fetes a partir dels diversos RCM. Les tendències tenen una significança del 95 % i s'expressen en escala logarítmica (logaritmes naturals).

Font: Figura modificada a partir de Turco *et al.* (2014).

que la tendència de la superfície cremada també sigui lleugerament negativa quan només es considera l'efecte climàtic implica que una inflamabilitat més gran del combustible quedi compensada per un canvi en l'estructura (com és el cas de la matèria fina morta).

Gràcies a aquesta modelització de la part més climàtica dels incendis, s'ha pogut estudiar la possible evolució futura a partir del *downscaling* fet a onze RCM per a l'escenari A1B, suposant que les condicions de prevenció i d'extinció es mantenen com ara (Turco *et al.*, 2014). La figura 6.5 mostra un augment del nombre d'incendis que, per contra, no es detecta en el cas de l'extensió de l'àrea cremada; suposant, en ambdós casos, que les mesures de prevenció i de gestió de l'emergència no canvien. També es mostra la incertesa associada a la dispersió generada pels onze RCM i la incertesa total estimada per mitjà de la realització de mil simulacions a cadascun dels models. La diferència entre ambdues és molt petita, cosa que indica que la dispersió és deguda, principalment, als models regionals. Cal dir que la incertesa és molt elevada quan es tracta dels escenaris de superfície cremada.

Finalment, cal considerar el possible desenvolupament de nous tipus d'episodi, ja sigui en zones on ara no són habituals (com ara els incendis de

mntanya) o bé fora del període d'estiu (com ara els incendis d'hivern i de primavera). Així mateix, el nombre d'episodis excepcionals (com, per exemple, els incendis del juliol del 1994) podria augmentar tenint en compte l'augment de les condicions crítiques a l'estiu. Aquests episodis quedarien dins de la banda d'incertesa ja comentada.

6.4. Riscos geològics

6.4.1. Esllavissades

Al SICCC es va posar de manifest la dificultat de disposar de registres complets de desprendiments rocosos i esllavissaments a causa del caràcter puntual i dispers al territori. Malgrat que aquesta restricció es manté, l'augment de l'accessibilitat al medi i l'existència d'un interès més gran dels experts, dels mitjans de comunicació i del públic en general provoquen que es disposi d'un coneixement més precís dels esdeveniments recents. Així, l'aiguat del 17 i el 18 de juny del 2013 a la Vall d'Aran va poder ser documentat d'una manera immediata pels tècnics de l'Institut Geològic de Catalunya, cosa que va donar com a resultat l'inventari de setanta-dos lliscaments superficials i corrents d'arrossegalls (Oller *et al.*, 2013). A més, les xarxes socials, la premsa comarcal i els cercadors electrònics faciliten l'accés a dades molt valuoses per a la reconstrucció dels esdeveniments, en particular, la documentació gràfica.

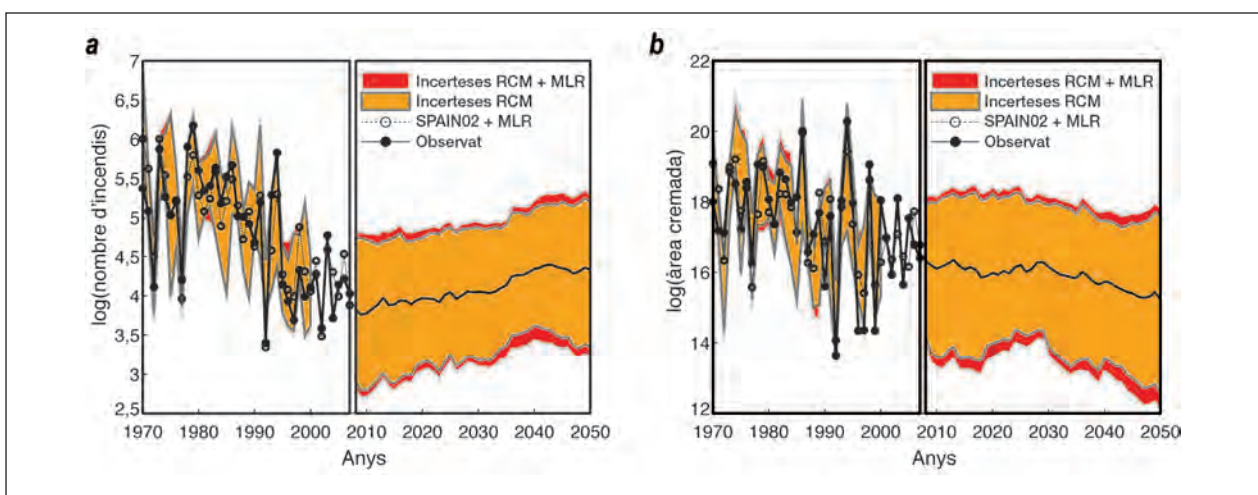


FIGURA 6.5. Evolució present i futura (a) del nombre d'incendis i (b) de l'àrea cremada a Catalunya. La línia negra amb rodones plenes correspon a les observacions i la de les rodones buides, a la modelització a partir de les dades de la Spain02.

La banda taronja mostra el conjunt de sortides del *downscaling* sobre els RCM amb el 90 % d'interval de confiança; la banda vermella mostra les sortides després d'aplicar mil simulacions a cada RCM, i la línia negra contínua és la mitjana mòbil per un interval de deu anys de la mitjana de tots els models.

Font: Figura modificada a partir de Turco *et al.* (2014).

En el mateix sentit, els darrers anys s'ha produït una millora de la qualitat i de la resolució de les observacions. Avui existeixen diverses conques amb instruments de mesurament instal·lats de manera permanent que permeten la detecció de processos i esdeveniments que abans passaven desapercebuts.

6.4.1.1. Observacions recents en la freqüència de desprendiments rocosos i esllavissaments superficials

Els desprendiments rocosos són molt freqüents a les serralades catalanes per la naturalesa de les roques que les componen. Cada any es produeixen diversos casos de caiguda de blocs aïllats i de masses rocoses de pocs centenars de metres cúbics. Nogensmenys, els darrers anys s'han produït desprendiments de cornises de dimensions insòlites, com ara els 20.000 m³ que es van desprendre al vessant nord de la serra de les Deveres, a Paüls, el febrer del 2009; els 5.000 m³ que van caure a la carretera que uneix la Riba amb Vilaverd, el maig del 2013, i els 10.000 m³ que es van desprendre sota el cap de la Fesa, a la cara nord de la serra del Cadí, el novembre del 2011, un volum que va ser àmpliament superat pel desprendiment ocorregut durant la primavera del 2012 al peu de la

serra dels Cortils, a la mateixa serralada, a prop de prats d'Aguiló. Tots aquests desprendiments han estat succeïts per altres de dimensions més petites. La relació entre els desprendiments rocosos i les condicions climàtiques existeix, però en els casos esmentats és molt difícil establir una causa concreta perquè en el desencadenament dels grans desprendiments intervenen altres factors d'una importància similar o superior.

Al segle passat, la presència d'esllavissaments superficials i corrents d'arrossegalls (*debris flows*) només s'havia evidenciat en connexió amb els grans aiguats, com ara els de l'octubre del 1940 i del novembre de 1982, que van deixar un reguitzell de milers de cicatrius de ruptura per tot el territori afectat. Al SICCC s'indicava una ciclicitat d'ordre multidecennal per als esllavissaments superficials, associada amb els grans aiguats i els períodes de pluja extraordinària. En aquests moments ens trobaríem immersos en un cicle d'una activitat relativament baixa d'esllavissades. Els darrers anys, la disponibilitat de nous equips per a l'observació de la Terra i d'instruments moderns de mesurament ha comportat una millora sensible en la quantitat, la qualitat i la resolució de les dades obtingudes. Això ha permès actualitzar i afinar el coneixement

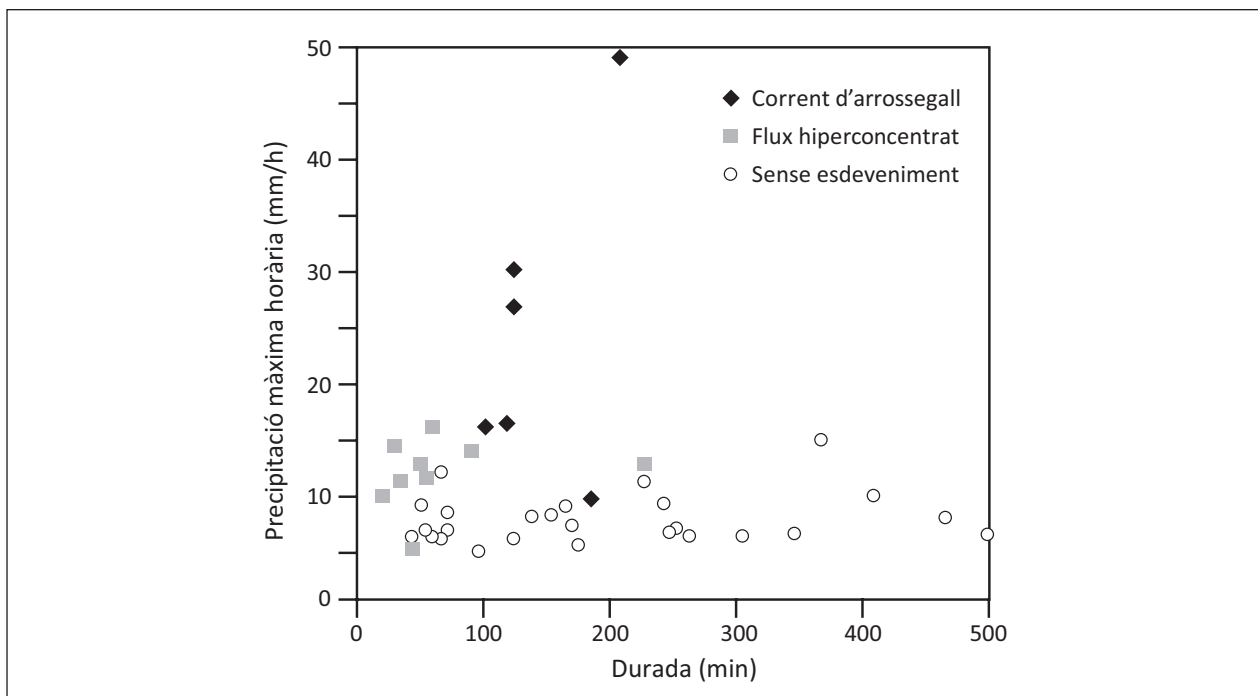


FIGURA 6.6. Esdeveniments de corrents d'arrossegalls, crescudes sobtades, detectats al barranc del Rebaixader, a Senet (Alta Ribagorça) entre l'agost del 2009 i l'agost del 2013.

Font: Figura modificada a partir de Hürlimann *et al.* (2015).

dels ritmes i les característiques de processos com els corrents d'arrossegalls. La instal·lació d'instruments de mesurament a diverses conques de la capçalera de la Noguera Ribagorçana (el barranc del Rebaixader, a Senet) i de la Noguera de Tor (el barranc d'Erill, a Erill la Vall) ha permès registrar esdeveniments de petites dimensions (entre 2.000 m³ i 16.000 m³). Poder disposar de pluviògrafs ha comportat, també, més precisió en la identificació de la intensitat de pluja necessària per a produir-los (figura 6.6). Es requereix un mínim de 10 mm/h per a desencadenar un corrent, si bé la major part es produeix a partir dels 15 mm/h i una durada superior als 90-100 minuts (Hürlimann *et al.*, 2014, 2015).

Aquests llindars de pluja, molt més baixos, confirmen que les primeres estimacions realitzades en aquest sentit (Hürlimann *et al.*, 2003) són coherents amb les anàlisis més recents (Oller *et al.*, 2013; Portilla, 2014) i expliquen, en part, l'augment del nombre d'esdeveniments de caràcter local observats.

6.4.1.2. Observacions recents en la freqüència de grans esllavissaments

Els grans esllavissaments mostren un comportament diferent. La naturalesa poc permeable dels materials, sovint argil·lites o pissarres, comporta que sobretot siguin sensibles als episodis plujosos

de caràcter estacional. A Catalunya no es disposa d'esllavissaments enregistrats que permetin analitzar l'evolució interanual i la tendència dels moviments. Una excepció n'és l'esllavissament de Vallcebre, al Berguedà (Corominas *et al.*, 2005), que és equipat amb un dispositiu d'auscultació des del 1996. La figura 6.7 mostra els desplaçaments acumulats en el període 1997-2012. El registre s'inicia en un any extraordinàriament humit (l'hivern del 1996-1997), i des de llavors la velocitat mitjana no mostra cap canvi de tendència evident, tot i que s'hi aprecien diversos episodis d'estabilització de durada anual, associats amb un dèficit de precipitació.

6.4.2. Allaus de neu

Les allaus són moviments de masses de neu per gravetat que arrenquen en vessants d'un pendent determinant (habitualment, entre 28° i 45°). L'inici de l'allau és degut a una desestabilització en el mantell nival, que tant pot ser superficial com interna, com a resultat del trencament de l'equilibri entre la capacitat de resistència i la sobrecàrrega sobrevinguda. Aquest binomi depèn de l'estratificació del mantell nival, definida pel tipus de gra de neu i el diàmetre, la densitat, la humitat i la duresa de les capes de neu que se superposen. Aquestes variables evolucionen contínuament segons les condicions atmosfèriques: bàsicament, el balanç

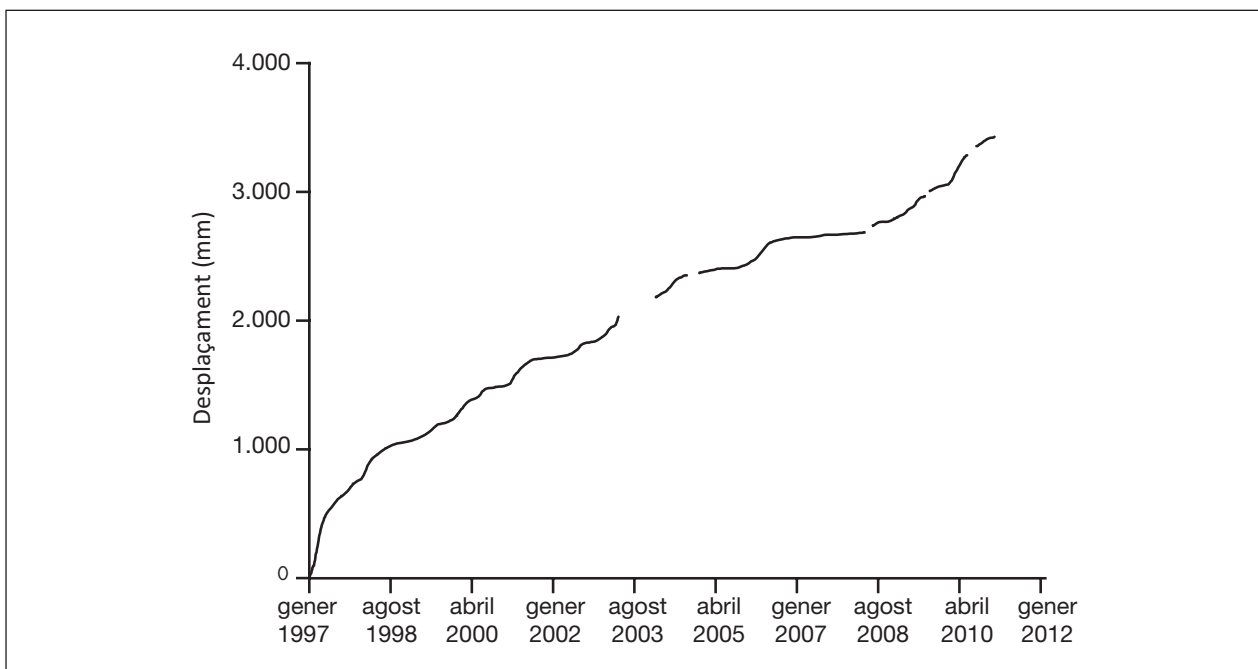


FIGURA 6.7. Desplaçaments acumulats de l'esllavissament de Vallcebre en el període 1996-2012.

energètic del mantell nival i els increments, positius i negatius, del gruix de neu a terra. Per tant, qualsevol canvi en les condicions meteorològiques i climàtiques implica un canvi en les condicions d'estabilitat del mantell nival i de l'ocurrència d'allaus.

El canvi climàtic pot afectar no solament l'ocurrència d'allaus, sinó també la tipologia. Respecte de l'ocurrència d'allaus, els estudis als Pirineus de Catalunya s'han basat en els registres d'activitat de les grans allaus (García-Sellés *et al.*, 2009), les que arriben al fons de la vall amb un caràcter destructiu fort, i s'han negligit les de dimensions mitjanes i petites per evitar heterogeneïtats en les sèries, derivades de la densitat variable de les xarxes observacionals al llarg del segle xx. Si bé en el SICCC (Llebot, 2010), amb les dades publicades fins llavors, no s'observava cap tendència clara pel que fa al nombre i la magnitud de les allaus, estudis recents aporten informacions noves. A partir de la dendrocronologia, d'enquestes a la població i de documentació històrica, s'ha obtingut una sèrie completa d'episodis de grans allaus entre el 1970 i el 2008 (Muntán *et al.*, 2009). Aquesta sèrie mostra una tendència temporal positiva a escala anual, estadísticament significativa, en l'ocurrència de grans allaus per al conjunt dels Pirineus de Catalunya (García-Sellés *et al.*, 2010).

Pel que fa a la tipologia de les allaus, és interessant observar què ha succeït en els darrers decennis i quins escenaris futurs es preveuen d'acord amb els canvis en les condicions climàtiques. La capa-

citada destructiva de les allaus en les infraestructures depèn del tipus de neu involucrada. Simplificant, podem parlar d'allaus de neu seca i d'allaus de neu humida. En els darrers dinou hiverns, i respecte al darrer informe, s'ha observat un augment del nombre i de la magnitud dels episodis d'allaus de neu humida (Oller *et al.*, 2015), tot i que no hi ha prou dades per a parlar de tendències pel que fa a les tipologies (figura 6.8). En aquest sentit, destaquen els cicles de grans allaus humides per pluja dels hiverns 2013-2014 i 2014-2015.

En el darrer quinquenni s'ha avançat en el coneixement de les condicions meteorològiques i climàtiques que desencadenen les grans allaus al Pirineu de Catalunya. A part de detectar-se condicions diferents del mantell nival entre el sector de domini oceànic i el mediterrani, s'ha observat que al sector mediterrani la desestabilització del mantell nival que predisposa a cicles de grans allaus depèn de seqüències de dies freds i secs alhora (ambdós dins del primer quartil), prèvies a nevades no sempre intenses (García-Sellés *et al.*, 2013). Si bé des dels anys setanta fins als noranta s'ha observat una disminució estadísticament significativa dels dies secs i freds, a partir dels anys noranta les condicions que afavoreixen les grans allaus a l'àmbit mediterrani s'han estabilitzat.

Respecte a l'evolució de la sinistralitat per allaus des del darrer informe (Llebot, 2010), en els darrers cinc anys la mitjana anual d'accidents ha pujat de 8,7 a 10 i el nombre de ferits també ha pujat de 2,7 a 4 per

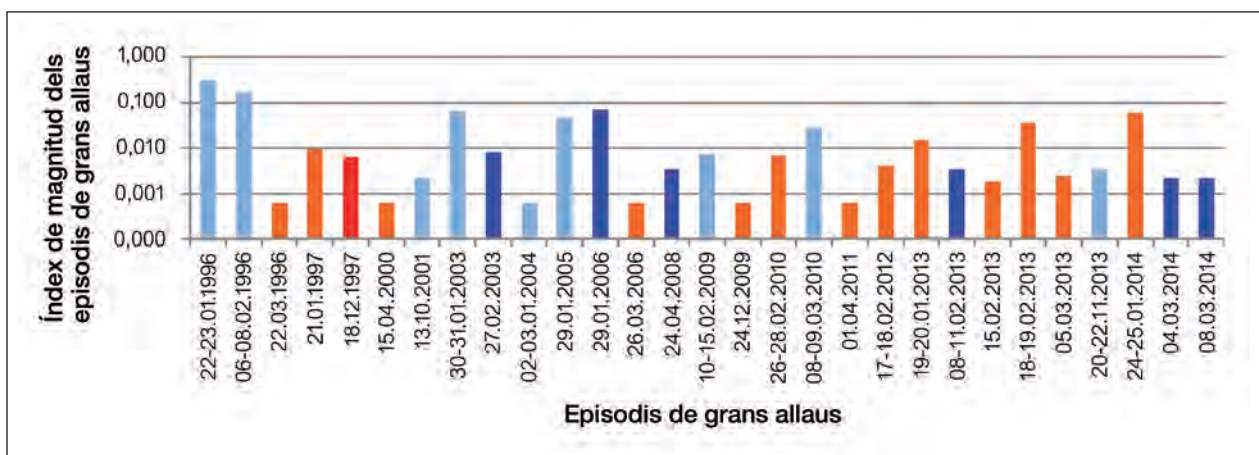


FIGURA 6.8. Evolució de l'índex de magnitud dels episodis de grans allaus observats en els darrers dinou anys i de la dinàmica de les allaus (blau cel: aerosols; blau marí: seca i mixta; vermell: colada de neu, i taronja: humida).

Font: Extret d'Oller *et al.* (2015).

any; contràriament, el nombre de morts ha disminuït d'1,5 a 0,6 per any (dades de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya). Aquesta disminució de la mortalitat es podria deure a un augment de l'ús del material bàsic de seguretat, que permet disminuir la durada del temps de rescat i, per tant, augmentar la probabilitat de sobreviure sota la neu.

Pel que fa a l'evolució futura del perill d'allaus, la relació entre aquest risc i el canvi climàtic es pot enfocar des del punt de vista de les modificacions previstes en la circulació general atmosfèrica per als propers decennis. Així, doncs, l'ocurrència de grans allaus s'ha relacionat amb patrons sinòptics de freqüència baixa per tal d'observar quins contextos atmosfèrics afavoreixen l'activitat de grans allaus. Al conjunt dels Pirineus, en els darrers quaranta anys s'ha observat una certa correlació negativa, estadísticament significativa, entre l'ocurrència de cicles de grans allaus i les fases negatives de la NAO (García-Sellés *et al.*, 2009, 2010). No obstant això, a escala regional s'aprecien respostes diverses, ja que el Pirineu més oriental, de domini climàtic mediterrani, manté aquest comportament de més activitat en fases negatives, mentre que el Pirineu més nord-occidental, de domini climàtic oceànic, no mostra cap relació entre l'activitat d'allaus i la NAO. Per tant, projeccions futures del comportament de la NAO poden indicar un possible augment o disminució de l'activitat de grans allaus depenent de la regió. En aquest sentit, durant els darrers decennis s'ha observat un augment de la freqüència de les fases positives de la NAO i, tanmateix, es manté a les sortides de la major part dels models de circulació general atmosfèrica, atès que una part significativa dels canvis observats és atribuïble al forçament antropogènic (IPCC, 2013).

Segons aquestes previsions, caldria pensar en una possible reducció dels cicles de grans allaus als Pirineus durant el segle XXI. No obstant això, a causa de la variabilitat interanual de la NAO s'han observat anys extrems en activitat d'allaus, tant en nombre com en dimensions, durant fases positives a escala decennal, a causa de l'ocurrència d'un hivern amb una fase negativa excepcional (com ara l'hivern del 1995-1996, amb una anomalia de dues desviacions estàndards). Per tant, la incertesa en l'activitat d'allaus futura és molt elevada i no s'han

de descartar anys extrems en activitat d'allaus en els propers decennis.

6.5. Conclusions

Es pot assegurar amb un nivell de confiança molt alt que l'augment de les temperatures extremes i les anomenades *onades de calor* són uns dels efectes del canvi climàtic en què coincideixen tots els escenaris, juntament amb l'augment de les nits tropicals, de les nits i els dies càlids i de la durada de les ratxes càlides. Aquest augment és més elevat a l'estiu i a les zones de muntanya, com també destaca el capítol 4 d'aquest INFORME. Atès que la resposta de les temperatures màximes al canvi climàtic és més marcada que la de les mínimes, hi ha un nivell de confiança alt en l'augment de l'amplitud tèrmica extrema, és a dir, en un desviament cap a un clima més continental.

D'acord amb les conclusions ja presentades en el SICCC, és important destacar amb molta confiança que no hi ha cap tendència significativa i generalitzada del nombre de dies de pluges fortes, ni de la precipitació màxima en vint-i-quatre hores, ni de qualsevol dels índexs relacionats. Per contra, segons les sèries llargues dels observatoris de l'Ebre i Fabra hi ha evidència d'un augment de la precipitació per dia de pluja (cosa que no implica, necessàriament, pluges molt intenses). Es conclou amb una confiança elevada que hi ha un augment de la durada de les ratxes seques, que afecta una gran part de Catalunya, i que és molt probable que aquesta tendència s'agreugi (els models regionals sobre Catalunya coincideixen en l'agreujament d'un 25 % de la tendència observada amb l'índex CDD). Molt probablement l'estació de l'any més castigada serà l'estiu, quan l'augment de les temperatures extremes i la disminució de la precipitació són més marcats, i la menys afectada, l'hivern. Considerant, també, l'evolució de la precipitació convectiva, es pot concloure que hi ha evidència d'un augment de la torrencialitat i de la freqüència dels dies amb pluges molt intenses, que és més probable que no hi hagi una reducció de ratxes de dies de pluja continuats i que és molt probable l'augment de la ratxa de dies seguits sense pluja. No hi ha cap evidència d'un augment o d'una disminució del nombre d'episodis de nevades excepcionals.

No hi ha cap evidència concloent que el nombre d'episodis que ocasionen inundacions importants estigui augmentant, però es pot concloure amb un nivell de confiança alt que el nombre d'episodis que produeixen inundacions locals augmenta des de mitjan segle XIX, probablement a causa de l'augment de l'exposició i la vulnerabilitat. Tanmateix, es detecta un augment recent del nombre d'episodis a l'estiu, que també es podria relacionar amb l'increment de la torrencialitat de la pluja, si bé encara no hi ha prou evidències. Amb vista al futur els escenaris no són concloents, però si es produís un augment de les precipitacions torrencials, juntament amb un augment de la vulnerabilitat, l'exposició i els canvis d'usos del sol, el risc d'inundacions s'incrementaria significativament.

Hi ha un nivell de confiança molt alt sobre el fet que la sequera augmenta i seguirà augmentant en freqüència, intensitat i durada al llarg del segle XXI. Els sòls seran més secs a la primavera i el període sec estival s'allargarà, cosa que afectarà els ecosistemes i l'agricultura. Els recursos hídrics disminuiran i n'augmentarà la variabilitat, de manera que es disposarà de menys eines per a fer cara a les sequeres. Hi haurà menys cabal disponible, el volum de neu emmagatzemada al Pirineu serà més petit i el desglaç s'avançarà. També és possible que augmenti la demanda d'aigua de l'agricultura durant els períodes secs, de manera que es produirà un increment de l'estrès causat per una oferta més petita de recursos i una demanda més gran. La qualitat de l'aigua també serà afectada per les sequeres futures.

Es conclou amb un nivell de confiança molt alt que el nombre d'incendis forestals per sobre de 0,5 ha disminueix, possiblement a causa d'una millora en les bones pràctiques, tant en la prevenció com en la predicció. Per contra, les condicions climàtiques i l'augment de la massa forestal afavoririen una tendència positiva. Tanmateix, i mantenint les mateixes mesures, les condicions més extremes de temperatura, humitat i precipitació previstes pels escenaris apunten cap a un augment del nombre d'incendis. L'augment de situacions excepcionals pot afavorir una freqüència més gran d'incendis de gran extensió (com, per exemple, el del juliol del 1994), així com l'existència d'incendis en zones on ara no són habituals (com ara els

incendis de muntanya) o fora del període d'estiu (com ara els incendis d'hivern i de primavera).

Es pot concloure amb un nivell de confiança alt que l'ocurrència d'esllavissades, desprendiments de roques i corrents d'arrossegalls d'abast local és un fenomen més freqüent del que es pensava, ja que en algunes conques té una periodicitat anual. A hores d'ara no es considera que aquest augment de freqüència sigui el resultat de cap variació en la intensitat i/o la durada de les pluges. L'augment de la freqüència d'esdeveniments enregistrats pot ser degut, en part, a l'interès de la premsa comarcal, especialment la que s'expressa en format digital, cosa que implica que l'increment notable de les referències a esllavissades i desprendiments no estigui relacionat necessàriament amb un increment de la freqüència d'aquests fenòmens. Cal afegir, també, que la instal·lació d'instruments a conques experimentals ha permès disposar d'una informació molt més precisa que permet modificar clarament a la baixa els llindars de pluja desencadenants d'esllavissades fins ara coneguts.

En els estudis sobre allaus endegats en els darrers cinc anys es pot concloure, tot i que d'una manera preliminar, que hi ha una evidència elevada d'una tendència cap a l'augment del nombre de cicles de grans allaus al Pirineu de Catalunya des del decenni del 1970, i que recentment també han augmentat les allaus de neu humida, especialment per episodis de pluges a la meitat de l'hivern. D'altra banda, es manté l'increment del nombre d'accidents per allaus, a causa d'un augment de l'exposició de persones en àmbits d'alta muntanya hivernals, tot i que disminueix el nombre de víctimes mortals. Probablement, la disminució de la mortalitat és deguda a una percepció més gran del risc per part dels practicants d'activitats d'oci i laborals a l'alta muntanya, que integren els protocols de seguretat i d'autoprotecció a les conductes, cosa que representa un avenç en les mesures d'adaptació respecte dels anys anteriors. Pel que fa a l'evolució del perill d'allaus, s'han identificat diferències regionals entre els àmbits de clima oceànic i mediterrani. Al conjunt dels Pirineus s'ha observat, en els darrers quaranta anys, una correlació negativa, estadísticament significativa, entre l'ocurrència de cicles de grans allaus i l'índex de la NAO, però aquesta correlació no existeix en

l'àmbit oceànic. Durant els darrers decennis s'ha observat un augment de la freqüència de les fases positives de la NAO, que, tanmateix, es manté segons la major part de models de circulació general atmosfèrica, fet que implicaria una disminució de l'activitat de grans allaus. No obstant això, a causa de la variabilitat interanual de la NAO s'han observat anys extrems en activitat d'allaus per l'ocurrència d'un hivern amb fase negativa durant fases positives d'escala decennal.

6.6. Recomanacions

El canvi climàtic pot tenir conseqüències directes, i alterar el grau de perillositat de la major part dels riscos d'origen meteorològic, o bé indirectes, i afectar la vulnerabilitat i el grau d'exposició. A més, es pot produir un efecte de retroalimentació. És necessari, per tant, desenvolupar una visió holística i considerar el canvi des d'una perspectiva global. Es proposa, entre altres mesures, la integració de l'adaptació al canvi climàtic, la reducció dels desastres en els processos de planificació territorial i sectorial, i l'establiment de comissions interdepartamentals per a la reducció del risc que assegurin la coordinació intersectorial de totes les parts interessades (un model conegut com a *multistakeholder*).

És necessari avançar en el coneixement de l'afectació present i futura del canvi climàtic als riscos naturals de Catalunya, millorar les observacions, completar les sèries de dades, analitzar les sinergies de diferents riscos (com, per exemple, la pujada del nivell del mar i les inundacions) i aplicar els escenaris més recents i la predicció decennal a fenòmens més complexos, com ara les inundacions, la sequera o els temporals de vent. Aquesta recerca exigeix una transferència de coneixement per a cobrir les mancances existents en matèria de gestió del risc dels sectors més sensibles a les variacions climàtiques, així com per a millorar la conscienciació i la corresponsabilitat de la població, utilitzant nous camins, com ara la ciència ciutadana. Els programes de sensibilització seran particularment importants en zones o sectors de la població molt vulnerables, com ara les zones inundables o la gent gran envers l'augment de les onades de calor.

És necessari millorar l'aplicació d'eines que han demostrat efectivitat als riscos que seran incre-

mentats pel canvi climàtic (com ara l'avaluació de la vulnerabilitat i el risc, els sistemes d'alerta primerenca, la planificació del territori o l'elaboració d'un codi de regulació i de mesures legals i institucionals). Un exemple del poder d'aquestes eines per a mitigar l'augment del risc causat pel canvi climàtic és el cas dels incendis forestals, que, malgrat això, a causa de l'agreujament de les condicions climàtiques també exigiran noves actuacions per a la millora de la prevenció i l'extinció.

Respecte al risc d'allaus, hi ha dues línies bàsiques de recomanacions. D'una banda, caldria avançar en el coneixement i l'evolució del fenomen per mitjà del manteniment i la potenciació del monitoratge, tant del mantell nival com de les condicions meteorològiques per sobre dels 2.000 m, en la predicció del fenomen. D'altra banda, cal avançar en la formació dels col·lectius exposats a aquest risc, tant la població fixa com la itinerant, mitjançant la pedagogia, la percepció del risc i la generació d'informació, sigui d'accés generalitzat o bé adreçada a les diferents necessitats de la presa de decisions (com ara l'urbanisme, la seguretat laboral, l'oci i el turisme).

Catalunya ha de seguir treballant en la millora dels mecanismes de governança i gestió de l'aigua per a evitar conflictes causats per sequeres més freqüents i intenses, que es produiran en un context en el qual hi haurà menys recursos hídrics disponibles. Per això, cal millorar el coneixement que tenim de les sequeres, tant les passades com les futures, de les propietats físiques i dels impactes socioeconòmics. Per a aconseguir-ho, calen una reanàlisi d'alta resolució del cicle de l'aigua continental i escenaris climàtics centrats en aquest cicle i la sequera. També cal treballar en nous estudis que tinguin la sequera com a objecte central i que integrin aproximacions des de dalt (*top-down*; com, per exemple, aproximacions a partir de la física) i des de baix (*bottom-up*; com, per exemple, a partir de consideracions socioeconòmiques), per tal d'obtenir una visió completa i integrada dels processos rellevants.

Cal intensificar l'ús de les eines d'observació de la Terra, en particular la interferometria radar i la fotogrametria digital, que permet detectar les deformacions i l'evolució amb una resolució elevada.

D'aquesta manera, es disposarà d'una imatge més real de l'activitat i la freqüència de les esllavissades. També cal millorar la documentació disponible sobre la distribució territorial i temporal dels desprendiments rocosos i les esllavissades, i promocionar i difondre bases de dades com ara el LLISCAT.

Els Pirineus, per l'augment de temperatures i la reducció del nombre de dies de gelada, i la vall de l'Ebre, per l'augment notable de nits tropicals i del perllongament de les ratxes seques, es podrien considerar «punts calents» (hot-spots) de l'impacte del canvi climàtic sobre els extrems climàtics a Catalunya. La franja costanera, sobretot les comarques més afectades habitualment per inundacions sobtades, també constitueix una zona d'especial interès tenint en compte l'increment de les precipitacions torrencials, principalment a l'estiu.

Referències bibliogràfiques

- BAIC 2013 = *Butlletí Anual d'Indicadors Climàtics: Any 2013* (2014) [en línia]. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat. Servei Meteorològic de Catalunya. Àrea de Climatologia. Equip de Canvi Climàtic. <http://static-m.meteo.cat/wordpressweb/wp-content/uploads/2014/11/19091941/00_BAIC2013_Complet.pdf> [Consulta: 17 febrer 2016].
- BARBERÍA, L.; AMARO, J.; ARAN, M. [et al.] (2016). «The role of different factors related to social impact of heavy rain events: Considerations about the intensity thresholds in densely populated areas». *Natural Hazards Earth Systems Sciences*, 14, p. 1843-1852
- BARREDO, J. I.; SAURÍ, D.; LLASAT, M. C. (2012). «Assessing trends in insured losses from floods in Spain 1971-2008». *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 12, p. 1723-1729.
- BARRERA-ESCODA, A.; GONÇALVES, M.; GUERREIRO, D. [et al.] (2014). «Projections of temperature and precipitation extremes in the North Western Mediterranean Basin by dynamical downscaling of climate scenarios at high resolution (1971-2050)». *Climatic Change*, 122, p. 567-582.
- BARRERA-ESCODA, A.; LLASAT, M. C. (2015). «Evolving flood patterns in a Mediterranean region (1301-2012) and climatic factors: The case of Catalonia». *Hydrology and Earth Systems Science*, 19, p. 465-483.
- BECH, J.; ARÚS, J.; CASTÁN, S. [et al.] (2015). «A study of the 21 March 2012 tornadic quasi linear convective system in Catalonia». *Atmospheric Research*, 158-159, p. 192-209.
- BECH, J.; PINEDA, N.; RIGO, T. [et al.] (2012). «Remote sensing analysis of a Mediterranean thundersnow and low altitude heavy snowfall event». *Atmospheric Research*, 123, p. 305-322.
- BENISTON, M.; UHLMANN, B.; GOYETTE, S. [et al.] (2011). «Will snow-abundant winters still exist in the Swiss Alps in an enhanced greenhouse climate?». *International Journal of Climatology*, 31, p. 1257-1263.
- CEDEX = CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS (2011). *Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural. Resumen ejecutivo. Encomienda de gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al CEDEX para el estudio del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua* [en línia]. <http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/publicaciones/publicaciones/Memoria_encomienda_CEDEx_tcm7-165767.pdf> [Consulta: 17 febrer 2016].
- COROMINAS, J.; MOYA, J.; LEDESMA, A. [et al.] (2005). «Prediction of ground displacements and velocities from level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees, Spain)». *Landslides*, 2, p. 83-96.
- FORZIERI, G.; FEYEN, L.; ROJAS, R. [et al.] (2014). «Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe». *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(1), p. 85-108.
- GALLART, F.; DELGADO, J.; BEATSON, S. J. V. [et al.] (2011). «Analysing the effect of global change on the historical trends of water resources in the headwaters of the Llobregat and Ter river basins (Catalonia, Spain)». *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(13), p. 655-661.
- GARCÍA-SELLÉS, C. MANGUÁN, S.; MARTÍ, G. [et al.] (2013). «Combined temperature - precipitation winter modes and major avalanche activity in the Eastern Pyrenees». *Proceedings of the International Snow Science Workshop*. Grenoble, p. 1264-1269.

- GARCÍA-SELLÉS, C.; MARTÍ, G.; OLLER, P. [et al.] (2009). «Major avalanche occurrence at regional scale and related atmospheric circulation patterns in the Eastern Pyrenees». *Cold Regions Science and Technology*, 59, p. 106-118.
- GARCÍA-SELLÉS, C.; PEÑA, J. C.; MARTÍ, G. [et al.] (2010). «WeMOi and naoi influence on major avalanche activity in the Eastern Pyrenees». *Cold Regions Science and Technology*, 64, p. 137-145.
- GAYÀ, M. (2015). *Els fiblons a Espanya: Climatologia i catàleg de tornados i trombes*. Mallorca: Edicions UIB.
- GAYÀ, M.; LLASAT, M. C.; ARÚS, J. (2011). «Tornadoes and waterspouts in Catalonia (1950-2009)». *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 11, p. 1875-1883.
- GUIJARRO, J. A.; JANSÀ, A.; CAMPINS, J. (2006). «Time variability of cyclonic geostrophic circulation in the Mediterranean». *Advances in Geosciences*, 7, p. 45-49.
- HALL, J.; ARHEIMER, B.; BORGA, M. [et al.] (2013). «Understanding flood regime changes in Europe: A state of the art assessment». *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, p. 15525-15624.
- HERRERA, S.; GUTIÉRREZ, J. M.; ANCELL, R. [et al.] (2012). «Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02)». *International Journal of Climatology*, 32(1), p. 74-85.
- HÜRLIMANN, M.; ABANCÓ, C.; MOYA, J. (2015). «Debris flow monitoring at the Rebaixader torrent, Central Pyrenees, Spain. Results on initiation, volumes and dynamic behaviour». A: LOLLINO, G.; GIORDAN, D.; CROSTA, G. B. [et al.] (ed.). *Engineering Geology for society and Territory*. Vol. 2. Cham: Springer International, p. 469-472.
- HÜRLIMANN, M.; ABANCÓ, C.; MOYA, J. [et al.] (2014). «Results and experiences gathered at the Rebaixader debris-flow monitoring site, Central Pyrenees, Spain». *Landslides*, 11, p. 939-953.
- HÜRLIMANN, M.; COROMINAS, J.; MOYA, J. [et al.] (2003). «Debris-flows events in the Eastern Pyrenees, Spain: Preliminary study on initiation and propagation». A: *3rd International conference on debris-flow hazards mitigation*. Davos (Suïssa): Balkema, p. 115-126.
- IPCC = INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX)*. Edició de C. B. Field, V. R. Barros, T. F. Stocker [et al.] Cambridge, etc.: Cambridge University Press. També disponible en línia a: <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX_Full_Report.pdf> [Consulta: 17 febrer 2016].
- (2013). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5)*. Edició de T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner [et al.]. Cambridge, etc.: Cambridge University Press. També disponible en línia a: <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>> [Consulta: 17 febrer 2016].
- (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5)*. Edició de C. B. Field, V. R. Ramos, D. J. Dokken [et al.]. Cambridge, etc.: Cambridge University Press. També disponible en línia a: <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>> [Consulta: 17 febrer 2016].
- JANSA, A.; ALPERT, P.; ARBOGAST, P. [et al.] (2014). «MEDDEX: A general overview». *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 14, p. 1965-1984.
- JENKINS, K.; WARREN, R. (2014). «Quantifying the impact of climate change on drought regimes using the Standardised Precipitation Index». *Theoretical and Applied Climatology*, 120(1-2), p. 41-54.
- KENAWY, A.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; VICENTE-SERRANO, S. M. (2012). «Summer temperature extremes in northeastern Spain: Spatial regionalization and links to atmospheric circulation (1960-2006)». *Theoretical and Applied Climatology*, 113(3-4), p. 387-405.
- LINDEN, P. VAN DER; MITCHELL, J. F. B. (ed.) (2009). *ENSEMBLES: Climate change and its impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Exeter: Met Office Hadley Centre. També disponible en línia a: <http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles_final_report_Nov09.pdf> [Consulta: 17 febrer 2016].
- LLASAT, M. C.; COROMINAS, J. (2010). «Riscos associats al clima». A: LLEBOT, J. E. (ed.). *Segon informe*

- sobre el canvi climàtic a Catalunya. Barcelona: Generalitat de Catalunya: Institut d'Estudis Catalans, p. 243-307.
- LLASAT, M. C.; LLASAT-BOTIJA, M.; LÓPEZ, L. (2009). «A press database on natural risks and its application in the study of floods in northeastern Spain». *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 9, p. 2049-2061.
- LLASAT, M. C.; MARCOS, R.; LLASAT BOTIJA, M. [et al.] (2014a). «Flash flood evolution in North-Western Mediterranean». *Atmospheric Research*, 149, p. 230-243.
- LLASAT, M. C.; MARCOS, R.; TURCO, M. [et al.] (2016, en premsa). «Flash floods trends versus convective precipitation in a Mediterranean region». *Journal of Hydrology*.
- LLASAT, M. C.; QUERALT, A. (2012). *L'impacte potencial del canvi climàtic en la planificació, prevenció i gestió d'emergències a Catalunya* [en línia]. Informe del CADS 10/2012. <http://cads.gencat.cat/web/.content/Documents/Informes/2012_1_Informe-Risc-i-canvi-climatic_DEF.pdf> [Consulta: 17 febrer 2016].
- LLASAT, M. C.; TURCO, M.; QUINTANA-SEGÚI, P. [et al.] (2014b). «The snow storm of 8 March 2010 in Catalonia (Spain): A paradigmatic wet-snow event with a high societal impact». *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 14, p. 427-441.
- LLEBOT, J. E. (ed.) (2010). *Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Barcelona: Generalitat de Catalunya: Institut d'Estudis Catalans.
- LÓPEZ-BUSTINS, J. A.; PASCUAL, D.; PLA, E. [et al.] (2013). «Future variability of droughts in three Mediterranean catchments». *Natural Hazards*, 69(3), p. 1405-1421.
- LÓPEZ-FRANCA, N.; SÁNCHEZ, E.; ROMERA, R. [et al.] (2014). «Análisis de periodos secos en la cuenca Mediterránea en clima presente y condiciones de cambio climático a partir de modelos regionales de clima del proyecto ENSEMBLES». *Física de la Tierra*, 25, p. 123-136.
- LÓPEZ-MORENO, J. I.; VICENTE-SERRANO, S. M.; MORÁN-TEJEDA, E. [et al.] (2011). «Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the Ebro basin». *Hydrology and Earth Systems Science*, 15(1), p. 311-322.
- LORENZO-LACRUZ, J.; VICENTE-SERRANO, S. M.; LÓPEZ-MORENO, J. I. [et al.] (2012). «Recent trends in Iberian streamflows (1945-2005)». *Journal of Hydrology*, 414-415, p. 463-475.
- LUIS, M. DE; BRUNETTI, M.; GONZÁLEZ-HIDALGO, J. C. [et al.] (2010). «Changes in seasonal precipitation in the Iberian Peninsula during 1946-2005». *Global and Planetary Change*, 74(1), p. 27-33.
- MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J.; SÁNCHEZ, N.; HERRERO-JIMÉNEZ, C. M. [et al.] (2013). «Recent trends in rivers with near-natural flow regime: The case of the river headwaters in Spain». *Progress in Physical Geography*, 37(5), p. 685-700.
- MOFFA-SÁNCHEZ, P.; BORN, A.; HALL, I. R. [et al.] (2014). «Solar forcing of North Atlantic surface temperature and salinity over the past millennium». *Nature Geoscience*, 7, p. 275-278.
- MORÁN-TEJEDA, E.; HERRERA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. [et al.] (2012). «Evolution and frequency (1970-2007) of combined temperature-precipitation modes in the Spanish mountains and sensitivity of snow cover». *Regional Environmental Change*, 13(4), p. 873-885.
- MUNTÁN, E.; GARCÍA, C.; OLLER, P. [et al.] (2009). «Reconstructing snow avalanches in the South-eastern Pyrenees». *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 9, p. 1599-1612.
- OLLER, P.; MUNTAN, E.; GARCIA, D. [et al.] (2015). «Characterizing major avalanche episodes in space and time in the twentieth and early twenty-first centuries in the Catalan Pyrenees». *Cold Regions Science and Technology*, 110, p. 129-148.
- OLLER, P.; PINYOL, J.; GONZÁLEZ, M. [et al.] (2013). «Efectes geomorfològics de la riuada del 18 de juny de 2013». A: *Jornades de Gestió de les Inundacions*. Barcelona: Agència Catalana de l'Aigua: Institut Geològic de Catalunya, p. 126-132.
- PINEDA, N.; BECH, J.; RIGO, T. [et al.] (2011). «A mediterranean nocturnal heavy rainfall and tornadic event. Part II: Total lightning analysis». *Atmospheric Research*, 100(4), p. 638-648.
- PORTILLA, M. (2014). *Reconstrucción y análisis de ocurrencias regionales de múltiples eventos de movimientos en masa generados por lluvias históricas en los Pirineos*. Tesi (doctorat). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

- RIGO, T.; LLASAT, M. C. (2016) «Hail size forecasting by using parameters of convective cells identified using radar». *Atmospheric Research*, 169, p. 366-376.
- RÍO, S. DE; HERRERO, L.; PINTO-GOMES, C. [et al.] (2011). «Spatial analysis of mean temperature trends in Spain over the period 1961-2006». *Global and Planetary Change*, 78(1-2), p. 65-75.
- SOUSA, P. M.; TRIGO, R. M.; AIZPURUA, P. [et al.] (2011). «Trends and extremes of drought indices throughout the 20th century in the Mediterranean». *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(1), p. 33-51.
- TOUS, M.; GENOVES, A.; CAMPINS, J. [et al.] (2009). «Mediterranean cyclones in a changing climate: Results from JMA-GSM model». Plinius Conference on Mediterranean Storms, Barcelona.
- TURCO, M.; LLASAT, M. C. (2011). «Trends in indices of daily precipitation extremes in Catalonia (NE Spain) 1951-2003». *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 11, p. 3213-3226.
- TURCO, M.; LLASAT, M. C.; HARDENBERG, J. VON. [et al.] (2013a). «Impact of climate variability on summer fires in a Mediterranean Environment (Northeastern Iberian Peninsula)». *Climatic Change*, 116(3), p. 665-678.
- (2014). «Climate change impacts on wildfires in a Mediterranean environment». *Climatic Change*, 125, p. 369-380.
- TURCO, M.; LLASAT, M. C.; TUDELA, A. [et al.] (2013b). «Decreasing fires in a Mediterranean region (1970-2010, NE Spain)». *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 13, p. 649-652.
- TURCO, M.; SANNA, A.; HERRERA, S. [et al.] (2013c). «Large biases and inconsistent climate change signals in ENSEMBLES regional projections». *Climatic Change*, 120(4), p. 859-869.
- (2015). «Evaluation of the ENSEMBLES transient RCM simulations over Spain: Present climate performance and future projections». A: LOLLINO, G.; MANCONI, A.; LOCAT, J. [et al.] (ed.). *Engineering Geology for Society and Territory*. Vol. 1. Cham: Springer International, p. 199-203.
- ULBRICH, U.; XOPLAKI, E.; DOBRICIC, S. [et al.] (2013). «Past and current climate changes in the Mediterranean Region». A: NAVARRA, A.; TUBIANA, L. (ed.). *A: Regional assessment of climate change in the Mediterranean*. Dordrecht: Springer, p. 9-52.
- VICENTE-SERRANO, S. M.; AZORÍN-MOLINA, C.; SÁNCHEZ-LORENZO, A. [et al.] (2014). «Reference evapotranspiration variability and trends in Spain, 1961-2011». *Global and Planetary Change*, 121, p. 26-40.
- VICENTE-SERRANO, S. M.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; BEGUERÍA, S. [et al.] (2014). «Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe». *Environmental Research Letters*, 9(4), p. 044001.
- WMO = WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (2009). *Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*. Technical Report WCDMP núm. 72 / WMO-TD núm. 1.500. Ginebra: WMO.