

5 Projeccions climàtiques i escenaris de futur

Autors

Josep Calbó Angrill	Francisco Doblas-Reyes
María Gonçalves Ageitos	Virginie Guemas
Antoni Barrera Escoda	Jordi Cunillera
Javier García-Serrano	Vicent Altava Ortiz

Josep Calbó Angrill és professor titular del Departament de Física de la Universitat de Girona, llicenciat en ciències físiques per la Universitat de Barcelona i doctor en ciències per la Universitat Politècnica de Catalunya. Ha estat investigador postdoctoral a l'Institut de Tecnologia de Massachusetts (MIT, 1995-1996), i investigador visitant al Laboratori Nacional del Pacífic Nord-oest (Washington, EUA, 2001), a la Universitat de Southern Queensland (Austràlia, 2006), a l'Institut Nacional d'Investigacions de l'Aigua i l'Atmosfera de Nova Zelanda (Austràlia, 2009) i al Centre Hidrometeorològic de la Federació Russa (Moscou, 2014). Ha participat en una trentena de projectes, ha publicat més de cinquanta articles en revistes indexades, ha contribuït a més de cent comunicacions en congressos internacionals, i ha dirigit cinc tesis doctorals. Centra la recerca en la climatologia de la nuvolositat i la insolació, i en l'estudi de la interacció entre núvols, aerosols, i radiació solar.

María Gonçalves Ageitos és doctora en enginyeria ambiental per la Universitat Politècnica de Catalunya, professora del Departament de Projectes d'Enginyeria d'aquesta mateixa universitat i investigadora associada al Departament de Ciències de la Terra del Barcelona Supercomputing Center. Orienta la recerca cap a la modelització del clima a escala regional, i ha contribuït a projectes de generació i anàlisi de

projeccions climàtiques amb alta resolució per a Catalunya i Europa. D'altra banda, s'interessa pels efectes a escala regional de processos relacionats amb els aerosols i la química atmosfèrica. És coautora de catorze articles científics en revistes internacionals de l'àmbit de les ciències de la Terra, i de nombroses comunicacions en l'àmbit del clima regional i la modelització de la qualitat de l'aire en congressos nacionals i internacionals.

Antoni Barrera Escoda és doctor en física per la Universitat de Barcelona, tècnic en canvi climàtic al Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) i redactor del blog de l'SMC. Principalment, ha centrat la investigació, d'una banda, en l'anàlisi de la variabilitat natural i la modelització regional dels extrems hídrics (inundacions i sequeres) a Catalunya en els últims 500-700 anys i, de l'altra, en la generació d'escenaris climàtics futurs regionalitzats a elevada resolució espacial per a Catalunya, durant el segle XXI, a partir de tècniques dinàmiques de regionalització. Ha participat i participa en diferents projectes, tant d'àmbit estatal com europeu, sobre variabilitat climàtica, canvi climàtic i desastres naturals d'origen meteorològic a la Mediterrània occidental. Ha publicat més d'una quarantena d'articles relacionats amb aquestes temàtiques en revistes internacionals, nacionals i congressos. Va participar activament en la redacció del capítol 5 del SCCC, de l'any 2010.

Javier García-Serrano és doctor en ciències físiques per la Universitat Complutense de Madrid i investigador H2020-MSCA en el Departament de Ciències de la Terra del Barcelona Supercomputing Center. Durant la seva carrera científica ha treballat en més de dotze projectes nacionals i internacionals, ha publicat vint-i-set articles en revistes indexades i ha realitzat estades en diferents centres d'investigació: Met Office (Anglaterra), KNMI (Holanda), IC3 (Barcelona), AORI (Universitat de Tòquio), LOCEAN/IPSL (Universitat Pierre et Marie Curie, París). Les línies d'investigació s'han centrat en l'estudi de teleconnexions atmosfèriques associades a forçaments oceànics i a anomalies del gel de l'Àrtic, i en l'anàlisi de prediccions estacionals i decennals. És autor col·laborador de l'AR5.

Francisco Doblas-Reyes és doctor en física per la Universitat Complutense de Madrid, professor de recerca ICREA (Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats) i director de l'Àrea de Ciències de la Terra del Barcelona Supercomputing Center. Ha centrat la investigació en el desenvolupament de la predicció climàtica global en escales temporals subestacionals, estacionals i decennals, així com en les aplicacions en diversos camps, cosa que l'ha dut a interessar-se en el nou concepte de serveis climàtics. Ha estat investigador a Météo-France (1997-1999), INTA (1999), ECMWF (2000-2009) i IC3 (2010-2015). Ha participat i participa en més de trenta projectes d'investigació, és membre de diversos comitès internacionals, ha actuat com a autor principal en el capítol 11 de l'AR5 i és autor de més cent articles en revistes indexades.

Virginie Guemas és doctora per la Universitat Paul Sabatier de Tolosa i cap del Grup de Previsió Climàtica, que actualment està format per setze membres, dins el Departament de Ciències de la Terra del Barcelona Supercomputing Center. Ha participat en divuit projectes nacionals i internacionals, col·labora amb disset instituts de recerca, i ha estat convidada a onze esdeveniments diferents: conferències, *workshops* i visites a altres centres. És coautora de trenta-nou articles en revistes indexades, sis dels quals en revistes prestigioses de molt alt impacte, té un índex H de 15, amb 696 citacions, i ha estat autora col·laboradora de l'AR5. L'any 2014 va ser nomenada

membre del Scientific Steering Group del projecte CLIVAR (Climate and Ocean Variability Predictability and Change) de l'Organització Meteorològica Mundial.

Jordi Cunillera fou investigador al Departament d'Astronomia i Meteorologia de la Universitat de Barcelona (1990-1994), en què obtingué el títol de doctor en ciències físiques. L'any 1994 s'incorporà a la Direcció General de Qualitat Ambiental del Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya i, posteriorment, al Servei Meteorològic de Catalunya. En aquesta entitat, ara adscrita al Departament de Territori i Sostenibilitat, ha estat cap de l'Àrea de Recerca Aplicada i Modelització (2004-2011) i actualment és cap de l'Equip de Canvi Climàtic. Membre del Grup d'Experts en Canvi Climàtic de Catalunya (GECCC), participà en la redacció dels informes *Aigua i canvi climàtic: Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya* (2009) i *Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya* (2010). És autor o coautor de diferents llibres i articles en revistes internacionals i professor convidat del màster europeu en meteorologia (UB) i del màster en climatologia aplicada i mitjans de comunicació (UB).

Vicent Altava Ortiz és doctor en física per la Universitat de Barcelona, tècnic de l'Àrea de Recerca i Modelització del Servei Meteorològic de Catalunya i predictor al Servei de Prevenció d'Incendis Forestals del Departament d'Agricultura. La seva investigació s'ha centrat, principalment, en l'estudi de les seques al nord-est de la península Ibèrica, incloent-hi l'anàlisi de la variabilitat natural al llarg del segle xx i la modelització futura. Recentment, ha desenvolupat estudis sobre la variabilitat climàtica a l'Atlàntic Nord, sobre la predicció per conjunts a mitjà termini a partir de mètodes estadístics de regionalització, i sobre la generació d'escenaris climàtics futurs regionalitzats a elevada resolució espacial a Catalunya durant el segle XXI. Ha participat i participa en diferents projectes, tant d'àmbit estatal com europeu, sobre variabilitat climàtica, canvi climàtic i desastres naturals d'origen meteorològic a la Mediterrània occidental. Ha publicat més d'una desena d'articles relacionats amb aquestes temàtiques en revistes internacionals, nacionals i congressos.

Sumari

Síntesi	116
5.1. Introducció	117
5.2. Projectes recents sobre projeccions climàtiques.....	118
5.2.1. Novetats en l'AR5.....	118
5.2.1.1. El CMIP5.....	118
5.2.1.2. Els nous escenaris RCP	119
5.2.1.3. L'enfocament del <i>near-term</i> (predicció decennal) davant del <i>long-term</i> (projecció climàtica).....	119
5.2.1.4. L'atles de projeccions regionalitzades del CMIP5.....	119
5.2.2. Altres projectes i resultats recents.....	120
5.2.2.1. ESCAT, generació d'escenaris climàtics amb alta resolució a Catalunya.....	120
5.2.2.2. ESCENA - ESTCENA	120
5.2.2.3. CORDEX - EuroCORDEX.....	121
5.2.2.4. MERCAT	121
5.3. Projeccions climàtiques a Catalunya.....	121
5.3.1. Mètode i dades	121
5.3.2. Resultats.....	123
5.3.3. Discussió	128
5.4. Conclusions	130
5.5. Recomanacions	131
Referències bibliogràfiques.....	131

Síntesi

Aquest capítol del TICCC presenta les projeccions climàtiques per a Catalunya, és a dir, proposa diverses estimacions de canvis en temperatura i precipitació, en un horitzó temporal que va fins a mitjan segle XXI. Amb aquesta finalitat, s'han analitzat, per a la zona geogràfica de Catalunya, els resultats de models climàtics globals inclosos en el recent *Informe d'avaluació* de l'IPCC; però, molt especialment, s'han considerat els resultats de diversos projectes de regionalització que s'han dut a terme, recentment, a escala internacional, estatal i catalana. També s'han tingut en compte, per al futur més immediat, les sortides de les prediccions decennals efectuades amb diversos models globals.

Les projeccions analitzades donen com a resultat un senyal molt robust d'augment de temperatura, a Catalunya, per als pròxims decennis. Aquest augment es manifesta en tots els horitzons temporals, en totes les estacions de l'any i en totes les àrees geogràfiques/climàtiques de Catalunya. Considerant com a representativa la mediana dels diferents valors proporcionats pels diferents projectes de regionalització, l'augment de temperatura podria ser de +0,8 °C en el decenni present, i arribaria a +1,4 °C a mitjan segle XXI, sempre respecte a la

mitjana del període 1971-2000. Els increments podrien ser més elevats durant l'estiu i al Pirineu. La precipitació sembla apuntar cap a una disminució, però amb una tendència més incerta. D'aquesta manera, el canvi seria molt poc significatiu per al decenni present. Cap a mitjan segle XXI, en canvi, el descens de la precipitació seria més marcat, amb medianes de la distribució dels valors particulars donats per cada projecció regional properes al -10 % a la primavera, l'estiu i la tardor. Amb relació a aquesta variable, la regionalització de les simulacions climàtiques és crucial en àrees com Catalunya, ja que l'orografia complexa i la interacció mar-terra queden mal representades en els models globals. En aquest treball s'han emprat, majoritàriament, escenaris d'emissions «moderats» (l'A1B i l'RCP4.5) i, per tant, els valors de canvi futur podrien ser lleugerament superiors als que se sintetitzen aquí, en cas que l'escenari que se seguís en fos un de més «alt» pel que fa a les emissions (l'RCP6 o l'RCP8.5). Tot i això, l'efecte addicional d'un escenari més intensiu en emissions no es produiria d'una manera clara fins a la segona meitat de segle.

Paraules clau

projeccions climàtiques, predicció decennal, escenaris, regionalització

5.1. Introducció

Una projecció climàtica és la resposta simulada del sistema climàtic davant un futur escenari d'emissions o de concentració de gasos amb efecte d'hivernacle (GEH) i aerosols. Aquesta resposta s'obté, habitualment, mitjançant models climàtics, és a dir, models numèrics que representen els diferents elements del sistema climàtic. Les projeccions climàtiques depenen de l'escenari d'emissions (o del forçament radiatiu, és a dir, de l'efecte que les variacions de les concentracions de determinats components de l'atmosfera tenen sobre el balanç energètic de la Terra) que es consideri en la simulació. Aquests escenaris, que poden ser més o menys realistes, depenen, al seu torn, de les hipò-

tesis que s'assumeixin amb relació al desenvolupament socioeconòmic (incloent-hi el demogràfic) i tecnològic futur.

Les projeccions climàtiques són la base per a l'avaluació dels impactes del canvi climàtic futur, i per a la presa de decisions amb relació a les actuacions de mitigació i d'adaptació. Això s'esdevé perquè l'evolució futura de les variables climàtiques (com ara la temperatura, la precipitació, la humitat, el vent, la insolació, etc.) i els fenòmens extrems associats són els que condicionen la sostenibilitat de la major part d'activitats humanes i dels ecosistemes. En conseqüència, és lògic que la major part d'informes i estudis que fan referència al

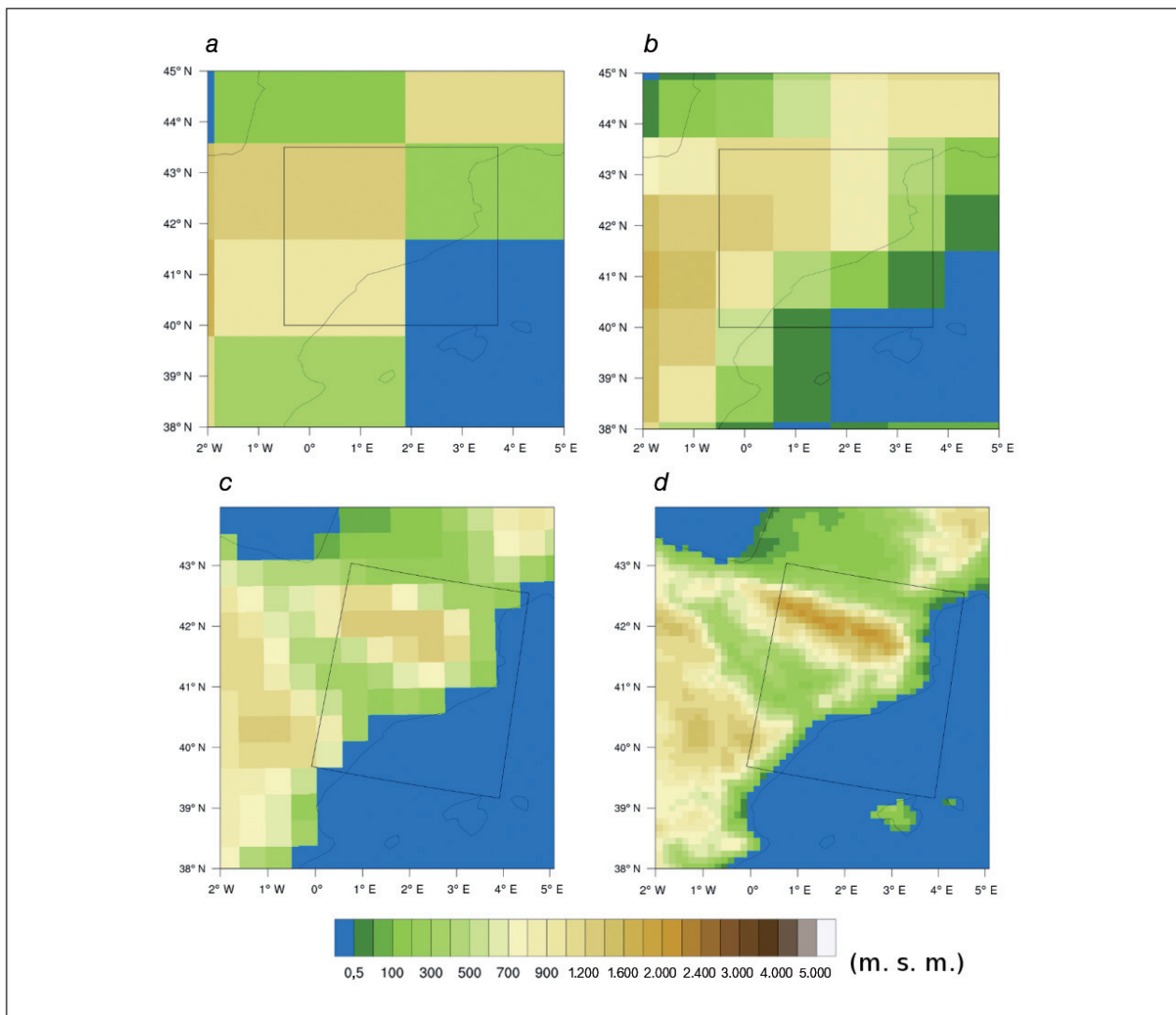


FIGURA 5.1. Topografia del nord-est de la península Ibèrica tal com es representa amb dos models globals participants en el CMIP5: a) l'IPSL-CM5A, a 1,875° x 3,75° de resolució, i b) l'EC-Earth a 1,125° x 1,125° de resolució; així com amb el model regional NMMB/BSC-CTM, configurat d'acord amb les directrius del projecte CORDEX, a c) 0,44° x 0,44° i d) 0,11° x 0,11° de resolució. L'àrea assenyalada es correspon amb el domini definit en aquest estudi per a obtenir els valors mitjans sobre Catalunya (vegeu la figura 5.2).

canvi climàtic comencin analitzant les projeccions climàtiques.

A escala global, les projeccions climàtiques més completes i que es consideren de referència són les que el Grup Intergovernamental d'Experts en Canvi Climàtic (IPCC) resumeix en els informes periòdics, i que resulten de l'acció coordinada de diversos centres de recerca de tot el món, mitjançant els projectes d'intercomparació de models climàtics (CMIP). Aquestes simulacions, realitzades amb models globals, presenten limitacions pel que fa al detall espacial i, de fet, el *Cinquè informe d'avaluació* de l'IPCC (l'AR5) dona resultats a escala global o bé en regions que acostumen a ser subcontinentals, és a dir, amb escales de milers de kilòmetres. Per això institucions d'arreu (de recerca o que tenen responsabilitats en aquest tema) fan esforços de regionalització, és a dir, utilitzen diverses tècniques per a obtenir projeccions climàtiques amb més detall espacial. La figura 5.1 mostra uns quants exemples de la diferència entre la resolució espacial dels models climàtics globals i la dels models aplicats a escala regional, i il·lustra com l'orografia i la definició de la costa depenen de la resolució horitzontal, en particular per a zones altament complexes com és el cas de Catalunya; cal tenir present que precisament el relleu i la costa són els factors fonamentals que expliquen la diversitat de climes a Catalunya (vegeu el capítol 4). Malgrat que les comunitats científiques de modelització de clima global i de ciències de la computació fan esforços per a incrementar la resolució a la qual es poden executar aquests models (amb projectes capdavanters que plantegen resolucions al voltant de 0,25°, uns 25 km a les nostres latituds), a hores d'ara, la regionalització constitueix l'eina principal per tal d'aconseguir l'alt grau de detall espacial necessari per a la presa de decisions i l'avaluació d'impactes a escala regional o local.

L'objectiu d'aquest capítol és presentar projeccions climàtiques per a Catalunya, és a dir, proposar uns valors relatius a la possible variació del clima, partint d'un ampli ventall de projeccions climàtiques disponibles recentment, tant a escala global com regionalitzades. El capítol se centra en les dues variables climàtiques principals (la temperatura i la precipitació), en horitzons temporals que van fins a mitjan segle XXI i en escenaris d'emissions o de

forçament radiatiu moderats, i és una actualització dels capítols corresponents inclosos en el PICCC i el SICCC.

5.2. Projectes recents sobre projeccions climàtiques

En aquest apartat s'expliquen, en primer lloc, les principals diferències en l'enfocament de l'AR5 respecte als informes anteriors de l'IPCC. Després, s'introdueixen diversos projectes de regionalització de les projeccions climàtiques, concretament els que s'han emprat més endavant per a estimar els futurs escenaris climàtics a Catalunya.

5.2.1. Novetats en l'AR5

5.2.1.1. El CMIP5

El protocol per al CMIP5 (Projecte d'intercomparació de models climàtics acoblats, fase 5; vegeu-ne els detalls a Taylor *et al.*, 2012), que ha estat l'exercici de comparació de models climàtics realitzat per a elaborar l'AR5, es va començar a dissenyar en les darreres etapes de l'informe anterior. Les converses entre diferents experts (en els camps, per exemple, de la física del clima, la bioquímica, els impactes, l'adaptació i la modelització) van comportar la divisió de les simulacions del clima futur en *near-term* ('curt termini') i *long-term* ('llarg termini'), tal com s'explicarà més avall. També es va proposar la realització d'experiments de sensibilitat i idealitzats (com, per exemple, l'experiment Aqua-Planet), per tal d'aprofundir en la comprensió de la resposta al forçament radiatiu i del paper que juguen les retroaccions en el sistema climàtic. Tots aquests aspectes del CMIP5 ajuden a interpretar les diferències entre les projeccions de canvi climàtic realitzades pels diversos models.

El CMIP5 també inclou un nou conjunt de forçaments radiatius, amb informació més detallada sobre les concentracions de GEH i aerosols atmosfèrics (vegeu l'apartat següent), així com models de clima més complets i complexos, amb més resolució horitzontal i més abast vertical. En particular, al CMIP5 hi participen diversos models del sistema Terra (ESM), que integren la representació del cicle del carboni mitjançant la simulació de processos biogeoquímics en els factors oceànic i terrestre; els ESM també simulen canvis en la química atmosfèrica i poden predir la formació i el decaïment dels

aerosols. Entre els experiments del CMIP5, cal esmentar els que exploren l'impacte dels forçaments radiatius naturals i antropogènics, la capacitat de reproduir el clima passat, i l'efecte dels núvols i dels processos que inclouen la humitat. D'altra banda, alguns dels models participants arriben a resolucions horitzontals sense precedents a escala global (fins a 0,6° de latitud i longitud en el mòdul de l'atmosfera en el cas del model japonès MIROC4h) i/o amplien l'abast vertical de les simulacions fins més enllà de l'estratopausa (*high-top*).

5.2.1.2. Els nous escenaris RCP

Els escenaris socioeconòmics s'utilitzen en investigació per a proporcionar possibles evolucions futures del clima en condicions tecnològiques i energètiques determinades, suposant canvis dels usos del sòl i de les emissions de GEH i altres contaminants (incloent-hi els aerosols). Com a resultat d'aquests escenaris s'obtenen els diferents forçaments radiatius, els quals constitueixen una peça fonamental per a les projeccions de canvi climàtic. Els escenaris emprats en el *Quart informe d'avaluació* de l'IPCC (AR4) provenien de l'*Informe especial sobre escenaris d'emissions* (SRES, Nakicenovic *et al.*, 2000).

Per al CMIP5, el Programa Mundial de Recerca en Clima (WCRP) va considerar que calia una nova estratègia per als escenaris possibles, de manera que cobrissin un ventall més ampli que el dels escenaris d'emissions possibles previstos en la literatura, i que incorporessin, també, els efectes derivats de possibles polítiques d'adaptació i mitigació. Aquests nous escenaris s'anomenen *trajectòries de concentració representatives* (RCP). Concretament, es van dissenyar quatre trajectòries futures (a partir del gener del 2006), que acaben provocant un forçament radiatiu de 2,6, 4,5, 6 i 8,5 W m⁻² el 2100 respecte al període preindustrial (1850). Cada RCP presenta una evolució temporal de l'emissió i la concentració dels GEH (i dels aerosols, de l'ús del sòl...). Per exemple: per al CO₂, l'escenari RCP8.5 segueix el rang més alt dels previstos en la literatura, amb concentracions que creixen ràpidament; mentre que l'RCP6 i l'RCP4.5 mostren una estabilització de la concentració de CO₂ al voltant de la mediana (dels diversos estudis previs), i l'RCP2.6 té un màxim de concentració de CO₂ cap al 2050, seguit d'una disminució im-

portant fins a tornar a assolir les 400 ppm a final de segle. A Meinshausen *et al.* (2011) es donen més detalls sobre els RCP i sobre l'evolució d'altres GEH.

5.2.1.3. L'enfocament del near-term (predicció decennal) davant del long-term (projecció climàtica)

La predicció decennal és un nou camp dins l'estudi del clima futur que intenta proporcionar informació en l'interval de pocs anys a pocs decennis, cosa que des del punt de vista climàtic representa un horitzó proper (*near-term*). Aquesta proximitat és clau per a la planificació de certs sectors socioeconòmics (com ara el de les assegurances o el de les energies renovables) a l'hora d'afrontar el canvi climàtic. Així, a part de l'interès científic, les prediccions decennals representen, potencialment, un benefici per a la societat per mitjà de millores en els serveis climàtics i en les estratègies d'adaptació. La predicció decennal va ser reconeguda com una part fonamental del CMIP5 (Meehl *et al.*, 2014a).

Les prediccions decennals exploren els beneficis d'inicialitzar els models climàtics acoblats, tal com es fa en la predicció estacional, incorporant-hi l'estat observat del clima (incloent, per exemple, el contingut de calor en les capes superficials de l'oceà). L'objectiu final és millorar la capacitat predictiva respecte al senyal que prové exclusivament del forçament radiatiu, l'enfocament de les anomenades *projeccions climàtiques*, que s'allarguen un segle o més (*long-term*) i que s'inicialitzen amb un estat representatiu de la realitat física, però arbitrari en el sentit que no pretén reproduir exactament l'estat del sistema en el moment de l'inici de la simulació. Malgrat que tant les prediccions decennals com les projeccions climàtiques presentaran, a més de la incertesa estructural o interna dels models, la incertesa associada al factor extern, és a dir, als escenaris futurs d'emissions i concentracions, les primeres pretenen millorar la representació de la variabilitat interna i corregir la resposta en la variabilitat forçada. En el CMIP5, la predicció decennal va utilitzar sempre l'escenari RCP4.5.

5.2.1.4. L'atles de projeccions regionalitzades del CMIP5

A l'AR5 s'inclou una anàlisi complementària de dades a escales subcontinentals, presentada en

forma d'atles, és a dir, gràficament sobre mapes de les diverses àrees considerades (IPCC, 2013). A l'atles s'analitzen els resultats de les simulacions del CMIP5 per a diferents horitzons temporals: proper (2016-2035), mitjà (2046-2065) i llunyà (2081-2100); s'inclouen projeccions per a la temperatura de l'aire en superfície i la precipitació tant a escala anual com estacional, i es consideren els diferents RCP. Aquesta informació es proporciona a escales de milers de kilòmetres i, per tant, no és directament aprofitable per a l'avaluació d'impactes o la presa de decisions a escala local o regional, però permet diferenciar les projeccions sobre grans zones climàtiques, com ara la Mediterrània, que es considera una àrea altament sensible als efectes del canvi climàtic (Giorgi, 2006). Per a aquesta regió, els models del CMIP5 projecten, en conjunt, increments de temperatura, sobretot a l'estiu, i d'una manera més acusada per als RCP més extrems (RCP8.5) i en els horitzons temporals més llunyans. A més a més, en el període d'abril a setembre, les projeccions suggereixen una reducció de la precipitació, tot i que en aquest cas amb una incertesa més gran.

5.2.2. Altres projectes i resultats recents

5.2.2.1. ESCAT, generació d'escenaris climàtics amb alta resolució a Catalunya

ESCAT és un projecte desenvolupat durant els anys 2011 i 2012 entre el Barcelona Supercomputing Center (BSC) i el Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) sobre projeccions climàtiques a la Mediterrània nord-occidental a 10 km de resolució (1971-2050) mitjançant el model mesoescalar WRF-ARW. Per a desenvolupar les simulacions regionalitzades es van definir dos dominis d'integració sobre l'àrea d'interès, un dins de l'altre, amb resolucions de 30 i 10 km, amb interacció unidireccional i evitant discontinuïtats en els relleus orogràfics principals. Es van emprar 33 nivells verticals fins a un cim de l'atmosfera situat a 10 hPa (~ 39 km), per tal de capturar adequadament els fenòmens de transport entre la troposfera i l'estratosfera (Gonçalves *et al.*, 2014). Les simulacions es van realitzar considerant tres escenaris d'emissions diferents: l'A2 (greu), l'A1B (intermedi) i el B1 (moderat), definits a l'SRES; i dues simulacions globals del model de circulació general acoblat atmosfera-oceà ECHAM5/MPI-OM, desenvolupades per la tercera fase del

Projecte d'intercomparació de models climàtics acoblats (CMIP3; vegeu IPCC, 2007). Aquestes simulacions van servir de base per a elaborar l'Estratègia Catalana d'Adaptació al Canvi Climàtic (ESCACC), realitzada per l'Oficina Catalana del Canvi Climàtic (OCCC) a final del 2012.

Prèviament, es va efectuar un exercici d'avaluació del sistema per al període de referència, 1971-2000, realitzant unes simulacions forçades amb reanàlisis meteorològiques. Les reanàlisis es consideren la representació més fiable de les condicions climàtiques presents o passades, ja que s'obtenen mitjançant sistemes de modelització que assimilen dades de tota mena d'observacions, des de dades d'estacions meteorològiques, radiosondatges, boies o satèl·lits, fins a dades de campanyes de mesurament en vaixells o avions. Les simulacions regionals forçades amb reanàlisis de l'ESCAT, tot i subestimar la temperatura (-1,3 °C de mitjana) i sobreestimar la precipitació (+30 % de mitjana), són capaces de reproduir l'evolució interanual de les observacions i capturar-ne els patrons geogràfics per al període 1971-2000 (Gonçalves *et al.*, 2014).

5.2.2.2. ESCENA - ESTCENA

En el marc del Pla Nacional d'Adaptació al Canvi Climàtic (PNACC), impulsat pel Govern de l'Estat espanyol, s'han elaborat una sèrie de projeccions regionalitzades de canvi climàtic. Aquestes projeccions pretenen proporcionar informació detallada sobre les estimacions del clima futur. Concretament, en aquest estudi s'han considerat resultats de dos projectes finançats pel Ministeri d'Agricultura, Alimentació i Medi Ambient: el projecte ESCENA, de regionalització dinàmica, i el projecte ESTCENA, de regionalització estadística. En tots aquests projectes s'han utilitzat les sortides de fins a quatre models globals (ECHAM5, HadCM3, CNRM-CM3, BCM2) que van participar en el CMIP3. En el projecte ESCENA, aquests models globals s'han combinat amb quatre models climàtics regionals (PROMES, MM5, dues versions de WRF i REMO), mentre que en el projecte ESTCENA s'han emprat diverses tècniques estadístiques, entre les quals mètodes d'anàlegs, de regressió a partir de components principals i altres tècniques basades en tipus de temps. Els resultats estan disponibles a resolució diària i mensual, sobre una malla de 0,2° de latitud i longitud, i, en

alguns casos, per a llocs puntuals concrets (estacions meteorològiques).

5.2.2.3. CORDEX - EuroCORDEX

CORDEX (Giorgi *et al.*, 2009) és una iniciativa promoguda pel WCRP per a generar projeccions climàtiques regionals per a totes les regions terrestres del món, entre les quals Europa i la Mediterrània. En particular, l'EuroCORDEX proveeix projeccions amb alta resolució per a Europa, fins als 0,11° (~ 12 km), a partir de les simulacions globals del CMIP5. Aquesta informació constitueix una eina valuosa per a l'anàlisi d'impactes del canvi climàtic i la definició d'estratègies de mitigació i adaptació. L'EuroCORDEX considera diferents escenaris RCP (Moss *et al.*, 2008) fins a l'horitzó temporal del 2100, i totes les dades generades estan disponibles en accés obert.

Les primeres avaluacions dels models integrants de l'EuroCORDEX (Kotlarski *et al.*, 2014) indiquen que són capaços de capturar els trets bàsics del clima europeu per al període 1989-2008, incloent-hi la variabilitat espacial i temporal, quan aquests models regionals són forçats amb dades de reanàlisis. En general, per a aquest període d'avaluació, els models presenten biaixos per sota d'1,5 °C per a la temperatura de l'aire en superfície i entre el ± 40 % per a la precipitació, amb un comportament particularment càlid i sec per al sud d'Europa. Aquests biaixos són del mateix ordre de magnitud que els que ja es van detectar en projectes anteriors, com l'ENSEMBLES (Linden *et al.*, 2009), encara que s'ha millorat una mica el biaix càlid al sud d'Europa.

5.2.2.4. MERCAT

Aquest projecte va obtenir projeccions regionalitzades al nord-est de la península Ibèrica a 4 km de resolució (1948-2100), a partir d'un mètode estadístic de regionalització desenvolupat en la tesi doctoral d'Altava-Ortiz (2010). Aquest mètode es basa en la tècnica dels anàlegs meteorològics aplicada a una simulació global del model de circulació general acoblat atmosfera-oceà ECHAM5/MPI-OM del CMIP3 i té en compte tres escenaris d'emissions diferents de l'SRES (2000): l'A2, l'A1B i el B1. La metodologia mostra habilitat per a reproduir les anomalies anuals de la precipitació durant el període 1948-2002 quan s'aplica sobre camps

predictors provinents de reanàlisis. Aplicada sobre el model climàtic, simula correctament el cicle anual de la precipitació a gairebé tot el domini d'estudi, si bé hi ha una subestimació general durant la meitat càlida de l'any (maig-octubre), sobretot en zones de muntanya i del litoral.

5.3. Projeccions climàtiques a Catalunya

5.3.1. Mètode i dades

Per a obtenir projeccions climàtiques per a Catalunya que permetessin distingir entre les grans zones climàtiques del país, en aquest estudi s'han tingut en compte els resultats dels projectes comentats anteriorment. S'ha considerat, doncs, una aproximació per conjunts, encara que s'ha defugit l'aplicació rigorosa d'aquesta metodologia, ja que s'han combinat resultats corresponents a tècniques de regionalització diferents i a escenaris també diferents. Per tal d'emmarcar els resultats obtinguts, provinents dels projectes de regionalització, a una escala detallada, també es donen els resultats d'algunes simulacions globals (projeccions i prediccions decennals) sense regionalitzar, considerant, només, les cel·les que cobreixen Catalunya.

A la taula 5.1 es resumeixen les característiques principals i els detalls dels projectes inclosos en el nostre estudi. En primer lloc, es proporciona el tipus de model o mètode de regionalització, i es pot observar que s'involucren resultats de models climàtics globals (GCM) directament, però sobretot de regionalització amb tècniques dinàmiques o estadístiques. En segon lloc, s'indica quin escenari d'emissions o forçament s'ha considerat, i hom veu que s'ha optat pels escenaris moderats (és a dir, l'A1B i l'RCP4.5), però també hi ha algun resultat amb escenaris més baixos i més alts d'emissions (el B1 i l'A2). Pel que fa a la resolució espacial, la malla és de més d'1° de latitud i longitud per als models globals, però molt més fina, és a dir, de menys de 0,2° (~ 20 km) per a tots els projectes de regionalització inclosos. En la quarta columna s'informa de quants resultats s'han considerat en cada cas, és a dir, de quants «membres» entren en l'estadística a partir de la qual s'obtiniran els resultats, així com de quants models globals intervenen en cada projecte. Finalment, s'indica si els resultats es podran donar només per a tot Catalunya (CAT)

TAULA 5.1. Descripció dels projectes inclosos en l'estudi

Projecte / Base de dades	Mètode	Escenari(s)	Resolució	Membres (models)	2012-2021	2031-2050
ESCAT / MERCAT	R. dinàmica / R. estadística	B1, A1B, A2	10 km (0,1°) 0,04° lat.-long.	6 (1) 3 (1)	CAT/3SR	CAT/3SR
ESCENA / ESTCENA	R. dinàmica / R. estadística	A1B	0,2° lat.-long.	11 (3) 15/16 (4)	CAT/3SR	CAT/3SR
CORDEX / EuroCORDEX	R. dinàmica	RCP4.5	0,11° lat.-long.	10 (4)	CAT/3SR	CAT/3SR
CMIP5	GCM	RCP4.5	> 1° lat.-long.	15 (4)	CAT	CAT
DCPP	GCM amb inicialització	RCP4.5	> 1° lat.-long.	37 (6)	CAT	—

o distingint les tres subregions climàtiques (3SR) que es descriuen a continuació.

En efecte, la zona d'estudi s'ha centrat en Catalunya, i ha considerat una caixa definida pels punts amb longituds compreses entre 0° i 3,5° E, i latituds entre 40,5° i 43° N. Dins d'aquesta zona, s'han definit tres subregions principals: Pirineu, Interior i Litoral-Prelitoral, que donen compte de les tres àrees climàtiques principals en les quals es pot dividir el territori. La figura 5.2 mostra aquestes tres subregions i les coordenades que les delimiten sobre un mapa de Catalunya. Pel que fa als horitzons temporals, se n'ha considerat un d'immediat (2012-2021, per al qual hi ha disponibles els resultats de les prediccions decennals) i un de mitjà termini (2031-2050), és a dir, cap a la meitat d'aquest segle. S'ha descartat avaluar les projeccions a final de segle, atès l'objectiu del TICCC, el qual ha de servir per a definir o matisar polítiques, que difícilment assoliran horitzons tan allunyats.

En tots els casos, com a valor representatiu dels diversos valors específics facilitats pels diversos membres que intervenen en un resultat (és a dir, els models globals, d'una banda, i tots els projectes de regionalització, de l'altra), es proporciona la mediana (és a dir, el percentil 50) del conjunt. En alguns casos, es presentaran, a més a més, els valors individuals de cada membre del conjunt, o es donaran, també, els valors dels percentils 5 i 95 com a representatius de l'interval de valors

esperables per als futurs canvis de temperatura i precipitació i, per tant, com a indicadors, en part, de la incertesa associada. També en tots els casos, els canvis en el clima futur es presentaran respecte al valor mitjà simulat per al període 1971-2000; d'aquesta manera, es considera que el canvi s'avalua més bé, ja que es redueix l'efecte dels errors sistemàtics dels models o de les imperfeccions en la resposta al forçament radiatiu present. Si es tracta de temperatura, es donen les diferències respecte a aquest període; si es tracta de precipitació, es donen les diferències relatives, és a dir, en percentatge, respecte a la mitjana climàtica del període 1971-2000 calculada amb la sortida de cada model. A més de les estimacions per al conjunt de tot l'any, es donen, també, els canvis d'aquestes variables per a les quatre estacions, definides com a hivern (desembre, gener i febrer), primavera (març, abril i maig), estiu (juny, juliol i agost) i tardor (setembre, octubre i novembre). En el cas dels projectes ESCENA i ESTCENA, la temperatura s'ha obtingut com a mitjana de les temperatures màxima i mínima, que són les que estan disponibles.

En el cas dels models globals considerats, com ja s'ha esmentat, la malla és superior a 1° x 1° (longitud i latitud), cosa que comporta una gran incertesa en el càlcul de les prediccions o projeccions per a Catalunya, ja que aquesta zona és representada per molts pocs punts de la malla. Concretament, la resolució de cada model global és: ~ 3° x 3°

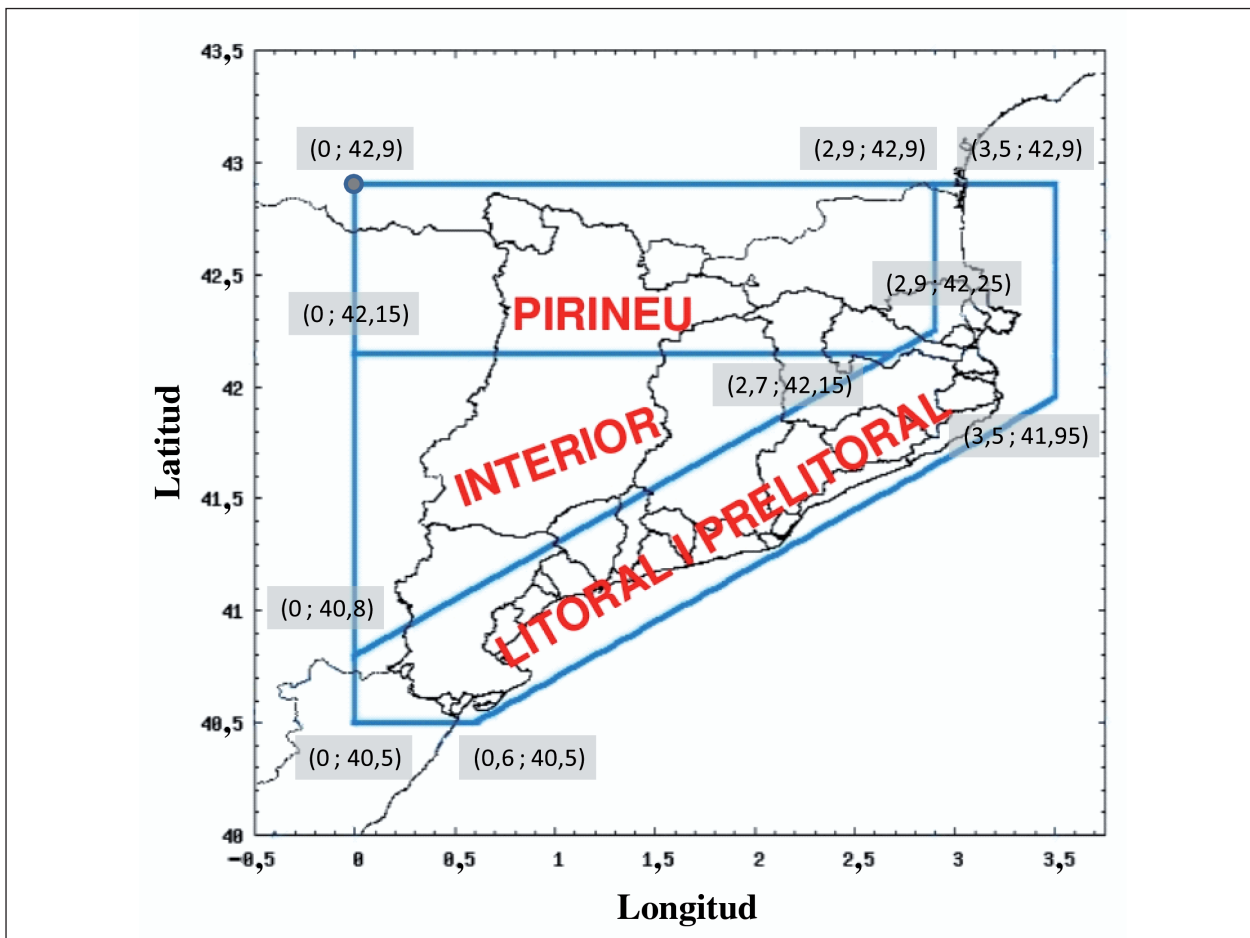


FIGURA 5.2. Zonificació aplicada a les simulacions regionalitzades analitzades en aquest treball. Les divisions donen compte de les tres àrees climàtiques principals en les quals es pot dividir el territori. Els contorns que es representen dins de Catalunya són les conques hidrològiques principals.

en CanCM4, $\sim 1^\circ \times 1^\circ$ en EC-EARTH2.3 i MRI-CGCM3, $\sim 2,5^\circ \times 2^\circ$ en GFDL-CM2.1, $\sim 4^\circ \times 2^\circ$ en IPSL-CM5A-LR i $\sim 2^\circ \times 2^\circ$ en MPI-ESM-LR. Per tal d'estimar d'una manera més homogènia i precisa els valors sobre la zona d'interès, primer s'ha realitzat una interpolació de totes les variables sobre una malla comuna de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$.

5.3.2. Resultats

Per tal d'emmarcar convenientment els resultats regionalitzats, primer es comenten els resultats relatius als canvis de temperatura i precipitació que s'extreuen directament d'algunes simulacions globals, forçades sempre amb l'escenari RCP4.5. Concretament, es tracta de la combinació de quinze experiments (anomenats *realitzacions* o *members*) obtinguts amb quatre dels models globals esmentats més amunt. En la taula 5.2 es proporcionen les medianes i els percentils 5 i 95 dels canvis projectats, relatius al període 1971-2000, per als

dos horitzons temporals, mentre que a la figura 5.3 es representen tots els valors individuals de les projeccions i es destaca el valor representatiu (mediana) per a cada variable i període. D'acord amb aquests resultats, per al decenni actual (2012-2021) la temperatura podria augmentar a Catalunya, pel que fa a la mitjana anual, entre $0,3$ i 1°C , mentre que a mitjan segle (2031-2050) l'augment es trobaria entre $0,9$ i $1,9^\circ\text{C}$, sempre respecte als valors del període 1971-2000. Els augments de temperatura serien més importants a l'estiu i més moderats a la primavera. La precipitació anual es mantindria inalterada, o fins i tot augmentaria molt lleugerament en el decenni present ($+2,8\%$, mediana corresponent al període anual), tot i que cal dir que l'interval de valors simulats és molt més ampli per a aquesta variable, fet que indica una incertesa associada més gran. Tant per a l'horitzó immediat com per al de mitjan segle, les projeccions indiquen una disminució clara de la precipitació estival,

TAULA 5.2. Resum dels resultats dels models del CMIP5 considerats

	Període 2012-2021 (respecte a 1971-2000)				
	Hivern	Primavera	Estiu	Tardor	Any
ΔT (°C)	0,6 (0,2/1,2)	0,5 (0,1/0,9)	0,9 (0,5/1,5)	0,7 (0,5/1,5)	0,7 (0,5/1,1)
ΔPPT (%)	2,4 (-15,2/20,8)	12,7 (-13,6/17,8)	-10,5 (-26,8/14,2)	2,9 (-21,3/16,2)	2,8 (-9,8/8,7)
	Període 2031-2050 (respecte a 1971-2000)				
	Hivern	Primavera	Estiu	Tardor	Any
ΔT (°C)	1,3 (0,7/2,1)	0,9 (0,7/1,8)	1,6 (1,1/2,5)	1,4 (1,0/2,2)	1,3 (1,0/2,2)
ΔPPT (%)	6,6 (-13,8/18,6)	0,7 (-14,7/9,2)	-12,3 (-24,8/9,5)	0,7 (-11,0/13,3)	-0,1 (-12,6/8,0)

que queda compensada, però, per augments a les altres estacions.

Continuant amb la visió que ofereixen els models globals, tot seguit es presenten els resultats de les prediccions decennals inicialitzades el 2012. Lògicament, aquests resultats estan disponibles només per al decenni present (2012-2021) i corresponen a trenta-sis realitzacions dutes a terme amb sis models globals diferents (els quatre que s'han emprat per a les projeccions, a més dels models CanCM4 i GFDL-CM2.1). Segons aquestes prediccions, la temperatura podria augmentar entre 0,3 i 1,4 °C, respecte a la mitjana del període 1971-2000, amb un increment clarament més

acusat durant l'estiu. Aquest comportament està plenament d'acord (encara que els valors són lleugerament superiors) amb el de les projeccions globals. En canvi, la tècnica de la predicció decenal proporciona resultats una mica diferents pel que fa a la precipitació. Així, aquestes prediccions (taula 5.3) apunten cap a petites disminucions de la precipitació, disminucions que s'estenen per totes les estacions i que són més acusades durant la tardor (i no pas a l'estiu). És cert que les diferents realitzacions presenten un espectre ampli de resultats (entre -10,5 i +5,4 %, p5 i p95 respectivament) per al període anual, per exemple, però sempre dominen els valors negatius, i els de la tardor són els més destacables.

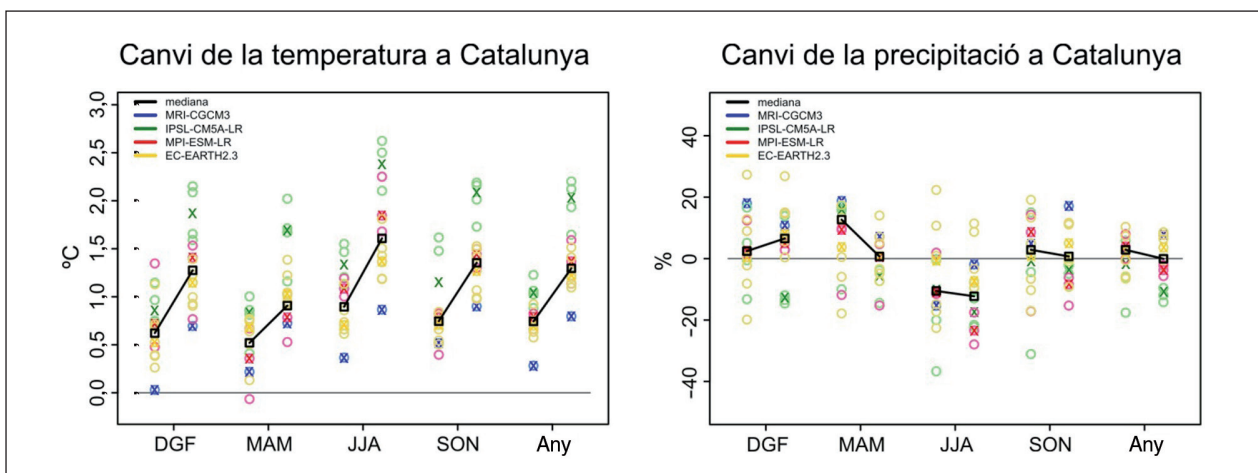


FIGURA 5.3. Variacions de temperatura (a l'esquerra) i de precipitació (a la dreta) per a Catalunya, com a resultat de les simulacions de diversos models globals i prenent com a referència el període 1971-2000. Cada conjunt de punts representa tots els membres que s'han considerat i el quadrat negre és el valor de la mediana. Per a cada període estacional o anual hi ha dos conjunts de punts que corresponen a l'horitzó 2012-2021 (punts a l'esquerra de cada parell de conjunts) i al 2031-2050 (punts a la dreta).

TAULA 5.3. Resum dels resultats de les prediccions decennals

	Període 2012-2021 (respecte a 1971-2000)				
	Hivern	Primavera	Estiu	Tardor	Any
ΔT (°C)	0,7 (0,3/1,3)	0,7 (0,2/1,4)	1,2 (0,6/2,1)	0,9 (0,3/1,4)	0,9 (0,3/1,4)
ΔPPT (%)	-1,3 (-14,9/20,0)	-1,9 (-14,8/14,9)	-2,5 (-21,7/17,7)	-4,9 (-17,2/5,6)	-1,5 (-10,5/5,4)

Encara per al període del decenni present, la taula 5.4 resumeix els resultats dels diversos projectes de regionalització de les projeccions climàtiques, tal com s’ha explicat en els apartats anteriors. En primer lloc, i considerant els resultats per a tot Catalunya, s’observa que l’augment de temperatura projectat (mediana de 0,8 °C) és, de nou, molt similar al que indiquen directament els models globals (bé siguin les projeccions o bé siguin les prediccions decennals). També es manifesta, encara que d’una manera menys marcada, un augment més elevat a l’estiu que a la resta d’estacions de l’any. Pel que fa a la precipitació, els resultats de les projeccions regionalitzades s’assemblen més als de les prediccions decennals que als de les projeccions globals. Així, anualment hi hauria una petita reducció de la precipitació (-2,4 % de mediana),

que seria més marcada a la tardor, mentre que a l’hivern hi podria haver, fins i tot, un petit augment.

El comportament general per a Catalunya es veu reproduït amb poques particularitats a les tres àrees o subregions que s’han analitzat. Així, les diferències entre les medianes dels augments de temperatura no són mai superiors a una dècima de grau. Semblantment, a les subregions Pirineu i Interior la precipitació es comportaria d’una manera qualitativament igual que al conjunt de Catalunya (petits augments a l’hivern i disminucions a la resta d’estacions), mentre que a la subregió Litoral/Prelitoral sí que hi hauria un comportament singular: disminucions relativament importants de la precipitació (per damunt del -5 %) en totes les estacions menys a l’estiu. S’ha de recordar, però,

TAULA 5.4. Resum dels resultats de les projeccions regionalitzades per al període 2012-2021 respecte de les mitjanes del període 1971-2000

		Hivern	Primavera	Estiu	Tardor	Anual
Litoral/ Prelitoral	ΔT (°C)	0,6 (0,0/1,2)	0,7 (0,2/1,3)	0,9 (0,4/1,3)	0,8 (0,4/1,2)	0,7 (0,5/1,0)
	ΔPPT (%)	-5,4 (-26,7/17,6)	-6,4 (-28,9/18,4)	-1,9 (-21,8/15,8)	-7,9 (-27,6/23,4)	-2,4 (-20,7/6,0)
Interior	ΔT (°C)	0,6 (0,1/1,1)	0,8 (0,2/1,4)	0,9 (0,5/1,5)	0,8 (0,4/1,2)	0,7 (0,5/1,0)
	ΔPPT (%)	2,3 (-17,7/24,2)	-5,9 (-26,4/25,2)	-1,6 (-20,2/13,1)	-4,3 (-25,9/26,0)	0,7 (-14,1/8,0)
Pirineu	ΔT (°C)	0,7 (0,0/1,2)	0,8 (0,2/1,5)	0,9 (0,5/1,5)	0,7 (0,4/1,3)	0,8 (0,5/1,1)
	ΔPPT (%)	2,7 (-14,2/32,6)	-0,8 (-22,9/16,9)	-2,5 (-16,8/11,9)	-2,7 (-23,1/15,8)	-0,2 (-7,8/8,0)
Catalunya	ΔT (°C)	0,7 (0,0/1,3)	0,7 (0,2/1,3)	0,9 (0,5/1,4)	0,8 (0,4/1,2)	0,8 (0,5/1,0)
	ΔPPT (%)	2,2 (-16,4/22,3)	-4,6 (-24,4/17,9)	-3,0 (-16,3/13,0)	-5,2 (-22,6/21,4)	-2,4 (-13,4/5,8)

que l'interval de projeccions del canvi de precipitació és sempre força ampli, incloent-hi valors negatius i positius.

Per a l'horitzó temporal de mitjan segle (2031-2050), les projeccions regionalitzades (taula 5.5) indiquen que la temperatura podria augmentar, de mitjana per al conjunt de Catalunya i prenent com a referència el període 1971-2000, entre 0,9 i 2 °C, amb un valor representatiu (mediana) d'1,4 °C. Aquests valors són molt similars als que s'obtenen dels models globals directament. Analitzant-ho estacionalment, els augments més elevats correspondrien a l'estiu i a la tardor en totes tres subregions. Pel que fa a les subregions, el Pirineu presentaria augments de temperatura algunes dècimes per damunt de la mitjana de Catalunya en totes les estacions. Precisament, el valor màxim dels que apareixen a la taula 5.5 (2,8 °C) és el del percentil 95 per a l'estiu a l'àrea del Pirineu.

Pel que fa a la precipitació, també per a mitjan segle i també referida a la mitjana del període 1971-2000, les projeccions regionalitzades indiquen un clar descens. En efecte, per al conjunt de Catalunya i per a tot l'any, l'interval de projeccions (p5, -22 %; p95, -0,7 %) comprèn només valors negatius, i la mediana és de -6,8 %. Aquest consens pel que fa al signe del canvi projectat se se-

para bastant del que indicaven els models globals. A més, estacionalment les projeccions regionalitzades indiquen, majoritàriament, disminucions importants (de prop del -10 %) per a totes les estacions excepte per a l'hivern, mentre que per a les projeccions globals només a l'estiu s'observaven disminucions generalitzades. Igual que per a l'horitzó proper, l'anàlisi de les subregions indica que és al Litoral/Prelitoral on la disminució de precipitació seria més important (fins i tot a l'hivern, la mediana, per a aquesta àrea, és de -6 %). Només a la tardor, la disminució és força homogènia a tot el territori de Catalunya (de prop del -9 %). Aquest darrer resultat crida l'atenció, atès que, almenys al litoral, es podria haver esperat un augment de la precipitació convectiva a causa de l'increment de la temperatura del mar.

La figura 5.4 representa l'evolució de les dues variables analitzades (temperatura i precipitació), durant el període de referència (1971-2000) i durant el període 2012-2050, per als quals s'han examinat els resultats de les projeccions regionalitzades. També hi són representades les evolucions de les mitjanes de la temperatura i la precipitació observades, valors que s'han calculat a partir d'un conjunt important d'estacions meteorològiques que cobreixen homogèniament tot Catalunya (SMC, 2015). S'observa, doncs, que la temperatura ha anat augmentant i continuarà augmentant gradual-

TAULA 5.5. Resum dels resultats de les projeccions regionalitzades per al període 2031-2050 respecte de les mitjanes del període 1971-2000

		Hivern	Primavera	Estiu	Tardor	Anual
Litoral/ Prelitoral	ΔT (°C)	1,2 (0,8/1,9)	1,2 (0,5/2,2)	1,8 (0,7/2,5)	1,7 (0,6/2,1)	1,4 (0,9/2,0)
	ΔPPT (%)	-6,0 (-40,2/35,7)	-12,0 (-37,5/6,9)	-11,7 (-33,8/11,7)	-9,1 (-30,2/11,5)	-8,3 (-27,1/2,3)
Interior	ΔT (°C)	1,2 (0,8/1,9)	1,2 (0,4/2,3)	1,9 (0,7/2,7)	1,7 (0,8/2,2)	1,4 (0,9/2,1)
	ΔPPT (%)	-1,1 (-30,9/42,0)	-11,5 (-32,2/6,4)	-9,9 (-28,1/11,5)	-8,9 (-27,5/11,0)	-6,5 (-23,7/1,4)
Pirineu	ΔT (°C)	1,4 (0,9/2,1)	1,4 (0,6/2,5)	1,9 (0,6/2,8)	1,8 (0,8/2,3)	1,6 (0,9/2,2)
	ΔPPT (%)	-1,8 (-11,0/22,5)	-8,4 (-24,4/5,8)	-9,0 (-24,3/8,2)	-9,3 (-25,4/0,7)	-5,3 (-16,1/-1,2)
Catalunya	ΔT (°C)	1,3 (0,8/2,1)	1,2 (0,5/2,4)	1,8 (0,7/2,6)	1,7 (0,7/2,2)	1,4 (0,9/2,0)
	ΔPPT (%)	-3,8 (-28,2/20,7)	-10,7 (-31,4/4,0)	-10,2 (-28,1/9,8)	-9,4 (-27,5/4,7)	-6,8 (-22,0/-0,7)

ment, mentre que la precipitació, deixant de banda la gran variabilitat interanual, es va mantenir gairebé constant en el període de referència i presenta una disminució futura molt menys evident. En el cas de la precipitació, a més a més, l'interval de valors compresos entre els percentils 5 i 95 inclou, sempre, valors positius i negatius, fet que és indicatiu de la incertesa que acompanya la projecció d'aquesta variable. Cal dir que aquests percentils s'han calculat amb els valors corresponents a cada any, mentre que els que es proporcionen en les taules s'han calculat per a les variacions corresponents a les mitjanes de cada període. Per això els darrers mostren intervals més estrets que els anteriors. S'ha de comentar, també, que les observacions cauen majoritàriament dins de l'inter-

val de variabilitat interanual mostrat pels percentils 5 i 95 del conjunt de simulacions regionalitzades analitzades, amb la qual cosa es pot afirmar que aquestes simulacions són capaces de reproduir la tendència temporal de les observacions de temperatura i precipitació per al període 1971-2014.

La temperatura i la precipitació són les variables climàtiques fonamentals, però n'hi ha d'altres que també poden ser interessants per a avaluar, per exemple, els impactes del canvi climàtic sobre la salut o sobre el sector energètic. Així, doncs, amb relació a la velocitat del vent i analitzant les dades del projecte ESCAT, Gonçalves *et al.* (2015) van concloure que les projeccions de la velocitat mitjana del vent (a 10 i 60 m de la superfície) per al

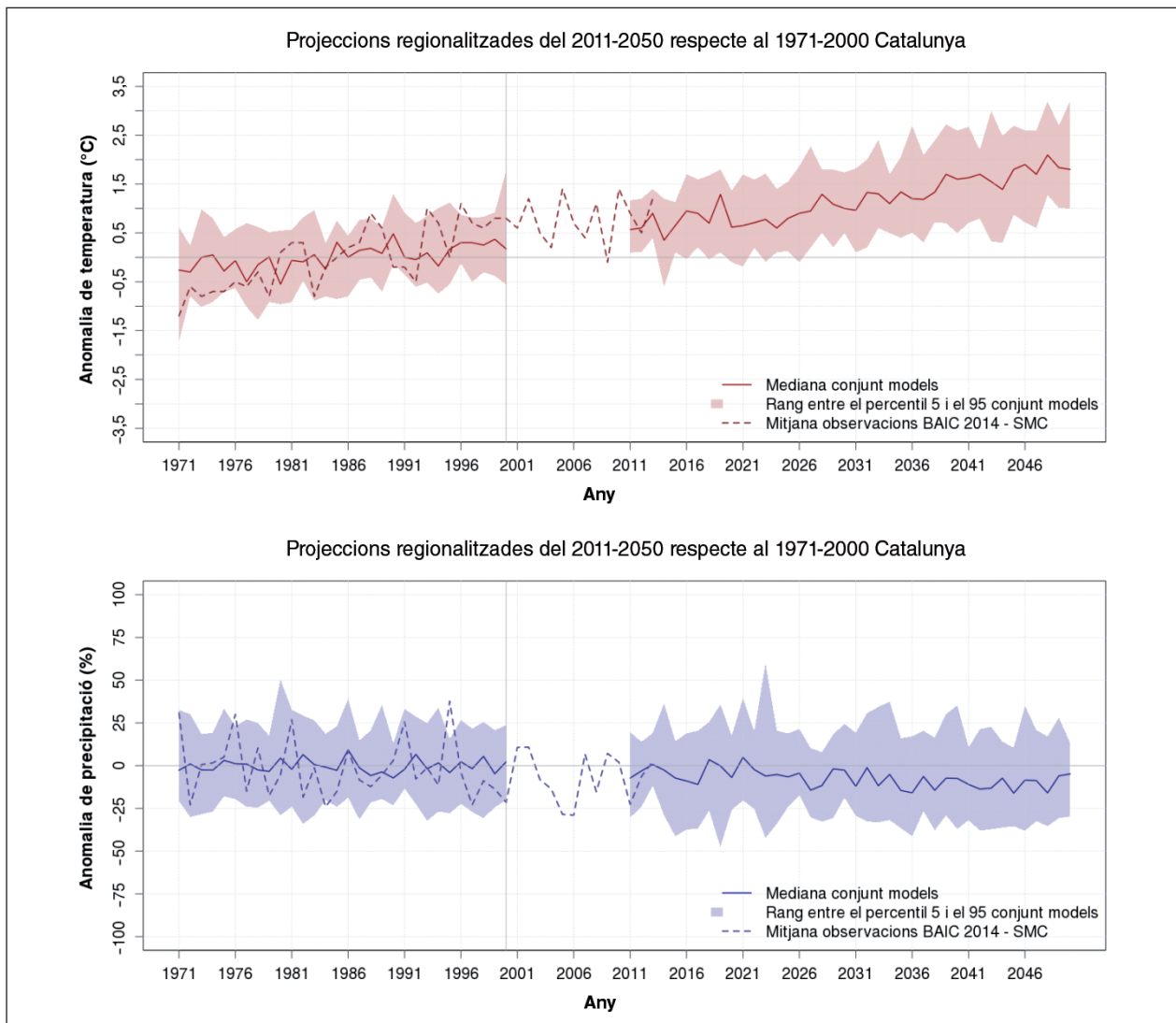


FIGURA 5.4. Variacions de temperatura (a dalt) i de precipitació (a baix) per a Catalunya, com a resultat dels projectes de regionalització considerats. Es mostra el període de referència (1971-2000) i el que va des de just abans de l'inici del primer horitzó considerat (2011) fins al final del segon (2050). La línia fosca representa la mediana, any a any, mentre que l'ombregjat és limitat pels percentils 5 i 95. La línia discontinua representa els valors observats, extrets del BAIC 2014 (2015).

període 2031-2050 apunten cap a una disminució de la intensitat per al conjunt del nord-est de la península Ibèrica, però sobretot a les zones muntanyoses com el Pirineu o el sistema Ibèric. De fet, tots els projectes esmentats proporcionen sortides de variables com ara el vent, la humitat, la nuvolositat, la radiació solar, la pressió, etc. El lector es pot dirigir directament als llocs web d'aquests projectes si està interessat en alguna d'aquestes altres variables, que sovint estan disponibles públicament.

Una altra qüestió és la dels valors extrems de les variables climàtiques. Aquest tema serà tractat amb profunditat al capítol 6 d'aquest TICCC. Aquí només es presenta un breu resum dels resultats del projecte ESCAT que es va publicar a Barrera-Escoda *et al.* (2014). Concretament, aquest treball conclou que es projecta un augment notable de les temperatures màximes (T_x) i mínimes (T_n) diàries, de fins a $3,5\text{ °C}$ i $1,5\text{ °C}$ cap al 2050, respectivament. S'espera que el nombre de mesos càlids augmenti d'una manera considerable durant els propers quaranta anys, però la freqüència d'ocurrència dels mesos molt freds seria semblant a l'observada en el període de referència (1971-2000). També augmentaria considerablement el nombre de nits tropicals ($T_n \geq 20\text{ °C}$) a la zona litoral i prelitoral, mentre que els dies de glaçada ($T_n \leq 0\text{ °C}$) es reduirien notablement a l'alta muntanya. La probabilitat d'ocurrència dels episodis de pluja diària de més de 200 mm en 24 h per al període 2021-2050 es doblaria respecte al període 1971-2000, i la probabilitat dels episodis superiors als 500 mm en 24 h, deixaria de ser nul·la (que és el que indiquen les observacions fins al present). En aquest sentit, és important esmentar que una disminució de la precipitació mitjana no és incompatible amb un augment en la freqüència d'episodis de pluja torrencial. D'altra banda, la durada de les sequeres podria augmentar significativament, tenint en compte la combinació de l'augment projectat per a la temperatura i la disminució de la precipitació, de manera que la longitud dels períodes secs s'allargaria uns 10 dies en valor mitjà cap al 2050 (el valor mitjà dels períodes secs per al conjunt de Catalunya en el període de referència 1971-2000 és de 30 dies). A més, segons Altava-Ortiz (2010) les projeccions indiquen, també, un augment de la gravetat i l'ocurrència de les sequeres, sobretot a partir de mitjan segle XXI.

5.3.3. Discussió

De la descripció dels resultats efectuada en l'apartat anterior es desprèn que, majoritàriament, els diversos models globals (incloent-hi l'ús per a realitzar prediccions decennals, en el cas de l'horitzó immediat) i les projeccions a partir de tècniques de regionalització ofereixen resultats força semblants si s'exceptuen algunes diferències en els canvis de la precipitació entre els models globals i els regionals. Els resultats s'han presentat combinant les projeccions de diferents models climàtics, malgrat que aquesta fusió de resultats és un aspecte científic que encara es debat i davant el qual normalment s'opta per una combinació en la qual tots els models tenen el mateix pes. En realitat, fins ara no existeix cap solució per a la combinació de resultats procedents de models globals, d'una banda, i de models regionals, de l'altra, i per això en aquest capítol s'han presentat en taules i figures diferents, encara que s'hagin comentat quasi simultàniament.

Cal dir que tots els models utilitzats per a les prediccions i les projeccions del clima futur, tant els models globals com els regionals, presenten errors sistemàtics. Aquests errors sistemàtics es manifesten quan es comparen les simulacions del clima present amb les millors observacions disponibles, i són el símptoma de les limitacions de la modelització del clima: la simplificació de processos complexos, la falta de comprensió d'alguns processos rellevants, la resolució espacial i temporal inadequada, etc. El fet que hi hagi processos que inevitablement es representen d'una manera inadequada, o que ni tan sols són inclosos en els models, limita la credibilitat dels resultats. Per exemple, la reproducció de les característiques de la cèl·lula de Hadley és diferent en diversos models globals a causa de les diverses aproximacions emprades, com també ho és el tractament de la convecció mesoescalar. Reconeixent que la solució s'ha de trobar en l'interval de solucions aportades pels diferents models disponibles, la comunitat científica ha adoptat l'aproximació multimodel (és a dir, l'ús combinat dels resultats de diverses simulacions), la hipòtesi principal de la qual consisteix a suposar que es poden amitjanar els resultats de diferents models i realitzacions amb l'objectiu de donar més robustesa a les projeccions. No obstant això, hi ha processos que no s'inclouen en cap dels models

globals, com ara les brises a la zona litoral, la qual cosa s'ha de tenir present a l'hora d'interpretar les projeccions d'aquesta regió.

A més a més de la incertesa que prové dels errors sistemàtics dels models, de la resolució emprada i dels escenaris de forçament radiatiu (RCP), hi ha una incertesa inherent al sistema que s'ha de tenir en compte per a la comunicació de les prediccions i les projeccions de canvi climàtic, sobretot a escala regional. Aquesta incertesa s'associa a la variabilitat interna (és a dir, la pròpia del sistema climàtic, no la que sorgeix a conseqüència dels forçaments externs), i en particular a la variabilitat interna de l'atmosfera extratropical, l'impacte de la qual és notable en el sector euroatlàntic i a Catalunya. Els models regionals hereten les incerteses associades a la circulació atmosfèrica i, per tant, no resolen aquesta limitació. Aquesta consideració no treu valor als resultats mostrats aquí o en l'AR5, sinó que els complementa, en el sentit que cal tenir-la present quan hom parla de la *predictibilitat* o de l'*atribució* del canvi climàtic.

Com s'ha anat dient, l'ús de l'aproximació multimodel proporciona l'estimació més robusta de la capacitat que tenen els models de representar, simular i predir la variabilitat climàtica observada. Per exemple, aquest és el cas de la variabilitat o oscil·lació multidecennal de l'Atlàntic (AMO), per a la qual s'ha mostrat que l'aproximació multimodel millora la capacitat predictiva (*skill*, en anglès) de les prediccions decennals respecte a la dels sistemes individuals al CMIP5 (García-Serrano *et al.*, 2015). A més, la millora de la representació de l'AMO ha comportat una representació més precisa de l'impacte en la variabilitat de baixa freqüència sobre la Mediterrània (Guemas *et al.*, 2015).

D'altra banda, la regionalització té un efecte rellevant en les projeccions de la precipitació, ja que es troben diferències importants respecte a les projeccions realitzades amb models globals. Analitzant les simulacions del projecte ESCAT, es va concloure, a Gonçalves *et al.* (2014), que els models regionals, quan són forçats amb reanàlisis meteorològiques, mostren una millora considerable pel que fa a la distribució i la variabilitat espacials de la precipitació respecte als models globals. També s'aconsegueix millorar la representació de

la precipitació per part dels models regionals quan s'augmenta la resolució espacial segons les parametritzacions físiques considerades. Tot i això, els models regionals també han de simplificar alguns processos (com ara la precipitació convectiva). A més, per a Catalunya, solen produir molta precipitació a les zones muntanyoses, i fins i tot poden donar resultats poc realistes en les zones seques de l'interior, caracteritzades per llargs períodes secs seguits d'episodis de precipitacions intenses (Barrera-Escoda *et al.*, 2014). Per a la temperatura, en canvi, l'efecte de la regionalització no és tan important, cosa que podria indicar l'absència de retroaccions positives de tipus local o regional. En resum, tal com diu l'AR5, es considera que la regionalització afegeix valor a la simulació del clima en regions amb l'orografia complexa o que contenen línies costaneres. D'aquesta manera, la regionalització esdevé un bon complement a les projeccions amb models globals.

Amb relació a les projeccions que formaven part del SICCC, que posteriorment també es van publicar a Calbó *et al.* (2012), les projeccions presentades aquí mostren força semblances, però també alguna diferència. En particular, les projeccions d'increment de temperatura per a mitjan segle XXI són molt similars, cosa que en reforça la fiabilitat. En canvi, hi ha algunes diferències destacables en el cas de la precipitació. En el SICCC es donava, per a Catalunya, una disminució de l'interval entre -5 i 0 %, amb el màxim de disminució al Pirineu (entre -20 i -5 %) i el mínim (o fins i tot augment), a la costa (entre -5 i +10 %); mentre que ara es troba que la disminució podria ser una mica més rellevant i amb un impacte més clar a la zona litoral. Aquestes diferències no són gaire rellevants si es tenen en compte els intervals sencers, i no han d'estranyar, ja que actualment es disposa de més coneixement, de noves projeccions globals amb nous escenaris i, sobretot, de més resultats de projectes de regionalització amb una resolució espacial més bona, els quals, com s'ha explicat, incideixen especialment en la representació de la precipitació.

Finalment, cal comentar que aquest treball s'ha centrat, majoritàriament, en l'anàlisi de simulacions forçades per a escenaris d'emissions «moderats» (l'A1B i l'RCP4.5) i, per tant, hom podria

assumir que els canvis futurs es trobaran a la banda alta dels intervals proposats, o més amunt encara, si l'escenari seguit n'és un de més «alt» en emissions (l'RCP6 o l'RCP8.5). Tot i això, atès que les concentracions de GEH presents a tots els escenaris no divergeixen considerablement fins a l'horitzó del 2040 i que el sistema climàtic presenta una forta inèrcia, el clima dels decennis immediatament futurs serà fortament condicionat per les emissions que ja s'han produït fins ara (el que es coneix com a *climate commitment*). Per tant, no s'ha d'esperar que, en l'horitzó de mitjan segle, i fins i tot amb escenaris més intensius pel que fa a les emissions, s'assoleixin canvis de temperatura i precipitació molt més grans que els presentats en aquest estudi.

Algunes de les limitacions i incerteses associades als resultats dels models globals podrien anar-se resolent durant el desenvolupament de la sisena fase del Projecte d'intercomparació de models acoblats (CMIP6; Meehl *et al.*, 2014b), que es va començar a plantejar, per iniciativa del WCRP, durant el 2014. El CMIP6 posa l'èmfasi a esbrinar quin és l'origen i les conseqüències dels biaixos sistemàtics dels models climàtics. Les simulacions que formaran part del CMIP6 s'estructuren en diversos nivells. El primer és el de la diagnosi, l'avaluació i la caracterització del clima (DECK), i serveix com a targeta de presentació d'un model dins el projecte CMIP. Aquest nivell implica quatre simulacions: a) una simulació del comportament de l'atmosfera en el període recent (~ 1979-2014); b) una simulació del control per al període preindustrial; c) una simulació amb un 1 %/any d'increment de CO₂, i d) una simulació amb un augment sobtat (quadruplicació) de CO₂. A més a més, cal afegir-hi una simulació històrica (1850-2014), que servirà com a referència per als diversos projectes temàtics d'intercomparació (MIP), els quals hauran de ser aprovats prèviament. Actualment ja s'han aprovat més d'una vintena de MIP, entre els quals hi ha, com a exemple, els dedicats a les retroaccions dels núvols, a les accions de geoenginyeria i al gel marí.

Pel que fa a l'efecte de la baixa resolució de la malla dels models globals, un dels MIP que formen part del CMIP6 intenta, precisament, abordar aquesta qüestió. Aquest MIP (anomenat HiRes-

MIP) proposa una sèrie d'experiments coordinats en els quals les projeccions fins a mitjan segle es realitzaran amb models globals d'alta resolució (uns 25 km). Aquest exercici, que implica un gran repte tecnològic, no solament pretén comparar les projeccions climàtiques amb les realitzades amb els mateixos models usant resolucions estàndard (~ 100 km), sinó que també aspira a estudiar quins són els processos més sensibles a la resolució. Els resultats es compararan, també, amb els obtinguts per mitjà dels experiments de regionalització dels models globals, per als quals la resolució arriba fins a uns 10 km, encara que només en zones seleccionades del planeta. S'espera que l'augment de resolució en els models globals permeti reduir les fonts d'incertesa que limiten el nostre coneixement del clima futur i obtenir estimacions dels intervals de confiança més robustos i representatius de la incertesa real.

5.4. Conclusions

Tots els projectes analitzats (que inclouen projeccions i prediccions decennals amb models climàtics globals, i tècniques de regionalització estadística i dinàmica) donen com a resultat un senyal molt robust d'augment de temperatura a Catalunya per als pròxims decennis. Aquest augment, que serà continu, es manifesta en tots els horitzons temporals, en totes les estacions de l'any i en totes les àrees geogràfiques/climàtiques de Catalunya. Dels diferents models, escenaris i tècniques s'obté un interval de valors per a l'augment de temperatura. Assumint que la mediana d'aquesta població de valors es pot considerar representativa del valor més probable, resulta que per al decenni present, l'augment de temperatura podria ser de 0,8 °C respecte a la mitjana del període 1971-2000, la qual ja és més alta que la d'anys anteriors del mateix segle xx). A mitjan segle XXI (2031-2050), la temperatura podria augmentar prop d'1,4 °C en mitjana anual per a tot Catalunya. Increments una mica més elevats es podrien produir durant l'estiu i al Pirineu, on el valor estimat arriba als 2 °C.

En el cas de la precipitació, encara que l'efecte del canvi climàtic a Catalunya sembla apuntar cap a una disminució, es tracta d'una tendència més incerta. Concretament, les prediccions decennals i les tècniques de regionalització mostren un canvi molt poc significatiu, de tan sols -2 %, per al de-

cenni present (2012-2021) respecte al període de referència (1971-2000), mentre que les projeccions dels models globals fins i tot presenten un petit augment per a aquest mateix període (igualment no significatiu). El descens de la precipitació esdevé més evident cap a mitjan segle XXI en les projeccions regionalitzades, ja que per a aquest període es troben valors representatius al voltant del -10 % a la primavera, l'estiu i la tardor. Combinats amb disminucions menys significatives a l'hivern, comportarien una disminució de la precipitació anual per al conjunt de Catalunya de prop d'un -7 %. Amb relació a aquesta variable, cal destacar la necessitat de regionalitzar les simulacions climàtiques en àrees com Catalunya, ja que l'orografia complexa i la interacció mar-terra queden mal representades en els models globals. Malgrat tot, cal dir que un augment del detall espacial no implica una disminució de la incertesa, com es posa de manifest amb els intervals de les projeccions regionalitzades de precipitació. També s'ha de reconèixer que encara no es disposa de gaire evidència observacional ni base teòrica per a validar les projeccions de disminució màxima de precipitació a la meitat càlida de l'any.

D'altra banda, els resultats del projecte ESCAT indiquen que els extrems de temperatura i precipitació s'alterarien d'una manera apreciable amb canvis com els següents: l'increment significatiu de l'ocurrència de mesos càlids, la disminució de les nits de glaçada, principalment al Pirineu, l'augment de les nits tropicals a la façana litoral, l'augment de la probabilitat d'ocurrència dels episodis de precipitació diària molt abundant (> 200 mm en 24 h) i l'augment de la longitud dels períodes secs, amb una ocurrència i gravetat més gran de les sequeres. Els canvis en aquests fenòmens extrems, però, es presenten i es discuteixen amb molta més profunditat en el capítol 6 d'aquest TICCC.

Cal acabar dient que, de tots aquests canvis projectats, es deriven impactes sobre la disponibilitat d'aigua, sobre la demanda energètica i la producció d'energia d'origen renovable, sobre l'agricultura i la ramaderia, sobre els ecosistemes terrestres aquàtics, sobre el turisme i altres activitats econòmiques, etc. Molts d'aquests impactes, així com les mesures d'adaptació que es poden emprendre, seran presentats en els capítols següents d'aquest INFORME.

5.5. Recomanacions

- Sempre que es facin estudis sobre l'impacte del canvi climàtic, o sobre les mesures d'adaptació, o sempre que es vulgui tenir present aquest factor en algun pla o estratègia, és convenient d'incorporar un interval de projeccions. És a dir, es recomana d'utilitzar els resultats de diversos models, de diverses tècniques de regionalització, etcètera.
- Com tendeixen a fer els projectes més recents, es recomana de facilitar l'accés a la informació de les projeccions als usuaris interessats, en un enfocament dirigit a donar serveis climàtics a la ciutadania en general.
- En el procés de comunicació de les projeccions de canvi climàtic futur, es recomana, així mateix, d'incidir en les incerteses associades que limiten la fiabilitat de les estimacions, com per exemple els errors sistemàtics i la resolució baixa dels models globals, sobretot en regions particularment sensibles (com ara Catalunya), sense que això posi en qüestió les tendències estimades que són comunes a la major part de models globals i regionals.
- Es recomana, també, d'anar incorporant els resultats de les prediccions decennals en els processos de presa de decisions on escaigui. En aquest sentit, també serà convenient d'afavorir la recerca en regionalització de projeccions i prediccions decennals climàtiques.

Referències bibliogràfiques

- ALTAVA-ORTIZ, V. (2010). *Caracterització i monitoratge de les sequeres a Catalunya i nord del País Valencià. Càlcul d'escenaris climàtics per al segle XXI*. Tesi (doctorat). Barcelona: Universitat de Barcelona. Departament d'Astronomia i Meteorologia.
- BAIC 2014 = *Butlletí Anual d'Indicadors Climàtics: Any 2014* (2015) [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/2015/06/05075856/00_BAIC-2014_TOT.pdf> [Consulta: 11 desembre 2015].
- BARRERA-ESCODA, A.; GONÇALVES, M.; GUERREIRO, D. [et al.] (2014). «Analysis of projections of tempera-

- ture and precipitation extremes in the North Western Mediterranean Basin by dynamical downscaling of climate scenarios at high resolution (1971-2050)». *Climatic Change*, 122(4), p. 567-582.
- CALBÓ, J.; SÁNCHEZ-LORENZO, A.; BARRERA-ESCODA, A. [et al.] (2012). «Climate change projections for Catalonia (NE Iberian Peninsula). Part II: Integrating several methodologies». *Tethys*, 9, p. 13-24.
- GARCÍA-SERRANO, J.; GUEMAS, V.; DOBLAS-REYES, F. J. (2015). «Added-value from initialization in predictions of Atlantic multi-decadal variability». *Climate Dynamics*, 44, p. 2539-2555.
- GIORGI, F. (2006). «Climate change hot-spots». *Geophysical Research Letters*, 33, L08707.
- GIORGI, F.; JONES, C.; ASRAR, G. R. (2009). «Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework». *WMO Bulletin*, 58(3), p. 175-183.
- GONÇALVES, M.; BARRERA-ESCODA, A.; BALDASANO, J. M. [et al.] (2015). «Modeling wind resources in climate change scenarios for the North Eastern Iberian Peninsula». *Renewable Energy*, 76, p. 670-678.
- GONÇALVES, M.; BARRERA-ESCODA, A.; GUERREIRO, D. [et al.] (2014). «Seasonal to yearly assessment of temperature and precipitation trends in the North Western Mediterranean Basin by dynamical downscaling of climate scenarios at high resolution (1971-2050)». *Climatic Change*, 122(1-2), p. 243-256.
- GUEMAS, V.; GARCÍA-SERRANO, J.; MARIOTTI, A. [et al.] (2015). «Prospects for decadal climate prediction in the Mediterranean region». *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141, p. 580-597.
- IPCC = INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007). *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR4)*. Edició de S. Solomon, D. Qin, M. Manning [et al.]. Cambridge, etc.: Cambridge University Press. També disponible en línia a: <<http://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1>> [Consulta: 15 setembre 2015].
- (2013). «Annex I: Atlas of global and regional climate projections». Edició de G. J. van Oldenborgh, M. Collins, J. Arblaster [et al.]. A: IPCC = INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *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/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_AnnexI_FINAL.pdf> [Consulta: 15 setembre 2015].
- KOTLARSKI, S.; KEULER, K.; CHRISTENSEN, O. B. [et al.] (2014). «Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble». *Geoscientific Model Development*, 7, p. 1297-1333.
- 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: 15 setembre 2015].
- MEEHL, G. A.; GODDARD, L.; BOER, G. [et al.] (2014a). «Decadal climate prediction: An update from the trenches». *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(2), p. 243-267.
- MEEHL, G. A.; MOSS, R.; TAYLOR, K. E. [et al.] (2014b). «Climate model intercomparison: Preparing for the next phase». *EOS Transactions American Geophysical Union*, 95(9), p. 77-78.
- MEINSHAUSEN, M.; SMITH, S. J.; CALVIN, K. [et al.] (2011). «The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300». *Climatic Change*, 109(1), p. 213-241.
- MOSS, R.; BABIKER, M.; BRINKMAN, S. [et al.] (2008). *Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies*. Ginebra: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- NAKICENOVIC, N.; SWART, R. (ed.) (2000). *Emissions scenarios 2000. Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. També disponible en línia a: <<http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=0>> [Consulta: 15 setembre 2015].

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. (2012).
«An overview of CMIP5 and the experiment design». *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, p. 485-498.

