

A6. Projeccions futures sobre el clima a Catalunya

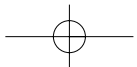
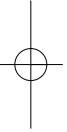
Josep Calbó Angrill

Departament de Física i Institut de Medi Ambient
Universitat de Girona

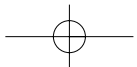
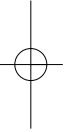
Josep Calbó i Angrill (Barcelona, 1965) és llicenciat en Ciències Físiques per la Universitat de Barcelona i doctor en Ciències per la Universitat Politècnica de Catalunya, on va realitzar el doctorat sobre models meteorològics en el programa d'Enginyeria Ambiental. Ha estat investigador post-doctoral al *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) i investigador visitant al *Pacific Northwest National Laboratory* (Washington, EUA). Actualment és professor titular del Departament de Física de la Universitat de Girona. Entre els anys 2000 i 2003 va ser el director de l'Institut de Medi Ambient d'aquesta universitat.

La seva recerca se centra en temes ambientals: contaminació atmosfèrica urbana, canvi climàtic (relació contaminació urbana amb contaminació global, forçaments radiatius de núvols i aerosols), climatologia de núvols, energies renovables, desenvolupament sostenible o educació ambiental. Aquesta recerca s'ha realitzat en el marc d'una trentena de projectes amb finançament públic o de contractes de transferència del coneixement amb entitats públiques i empreses privades.

Ha publicat una vintena d'articles en revistes científiques, una vintena de capítols en llibres científics i de divulgació, i ha presentat més de trenta comunicacions en congressos internacionals.



Síntesi	193
A6.1. Bases de la simulació climàtica	195
A6.1.1. Models numèrics de simulació del clima	195
A6.1.2. Forçament radiatiu i resposta climàtica	198
A6.1.3. Els escenaris de l'informe de l'IPCC 2001	202
A6.2. Projeccions a escala global	204
A6.2.1. Mètodes de simulació a escala global	204
A6.2.2. Resposta global del clima	206
A6.2.3. Canvis en la variabilitat climàtica	209
A6.2.4. Canvis en els esdeveniments extrems	209
A6.3. Projeccions a escala regional (per a Catalunya)	210
A6.3.1. Mètodes de simulació a escala regional	210
A6.3.2. Resposta regional del clima	212
A6.3.3. Canvis en la variabilitat i els esdeveniments extrems	221
A6.4. Conclusions	221
Referències bibliogràfiques	224



Síntesi

Els responsables de prendre decisions respecte a possibles accions d'adaptació i/o mitigació al canvi climàtic han de disposar de les millors prediccions possibles, per la qual cosa és necessari millorar i reduir la incertesa de les previsions sobre el clima del futur.

Actualment, les millors prediccions s'obtenen de l'aplicació de models numèrics de simulació del clima i, més concretament, de models tridimensionals acoblats. Aquests models, anomenats AOGCM (*Atmospheric Oceanic General Circulation Models*), han experimentat una important millora en els darrers anys, especialment pel que fa a la seva resolució espacial i a la capacitat de descriure físicament fenòmens com la interacció ocea-atmosfera, entre altres.

La majoria dels models actuals, com els que apareixen en el darrer informe del Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (IPCC), reproduïxen correctament el clima present i passat, tot donant fiabilitat a les prediccions futures. No obstant això, encara continuen havent-hi incerteses, com ho demostra el fet que el paràmetre de sensibilitat climàtica, definit com l'augment de temperatura assolit quan la concentració de CO₂ s'hagi duplicat, variï segons el model al voltant d'una mitjana que es troba entre els 2,5 i 3°C. Per poder fer previsions el màxim de fiables, l'IPCC opta per realitzar simulacions per col·lectivitats, és a dir, integrar diversos models en les mateixes condicions i donar com a resultat el rang de valors obtinguts pels diversos models, com a mesura de la incertesa existent.

Qualsevol projecció del clima futur es basa en prediccions sobre l'evolució demogràfica, tecnològica i econòmica. Aquests escenaris, descrits a l'informe SRES (*Special Report on Emission Scenarios*), són el punt de partida de les prediccions recollides en l'informe de l'IPCC de l'any 2001.

Tenint en compte diversos d'aquests escenaris i models, el darrer informe de l'IPCC preveu que la temperatura mitjana de la Terra s'incrementi entre 1,4 i 5,8°C de cara a l'any 2100. En general, l'augment de temperatura serà més important en latituds altes i sobre els continents que en els tròpics i sobre els oceans. A escala global, també s'espera un augment de la precipitació, que podria ser d'unes poques unitats percentuals respecte la precipitació actual. L'augment no serà gens homogeni (hi ha zones on fins i tot s'esperen disminucions) i podria ser més significatiu a latituds elevades dels dos hemisferis. Per altra banda, com a conseqüència de la dilatació tèrmica i de la fosa d'un cert volum de gel continental, es preveuen increments del nivell del mar d'entre 9 i 88 cm.

Pel que fa als canvis en la variabilitat i els esdeveniments extrems, les prediccions són encara més incertes. Diversos estudis mostren una disminució dels dies amb precipitació i un augment de la intensitat d'aquestes. També es dona versemblança a les prediccions que indiquen, pel que fa als continents, temperatures màximes més altes, més dies calorosos, un augment de l'índex de xafogor i, finalment, un augment de l'evaporació durant l'estiu.

La regionalització de les prediccions del canvi climàtic és una línia de treball de gran actualitat però que encara està poc madura, per la qual cosa les prediccions regionals són menys fiables que les projeccions globals. La mateixa definició del clima comporta un augment de la dificultat en la seva predicció a mesura que anem reduint l'escala espacial. En el cas de Catalunya, la predicció del clima futur per a una àrea tant petita serà altament complicada i incerta. La majoria de projeccions futures del clima que s'han analitzat en el present capítol corresponen a estudis sobre àrees més grans (la Mediterrània en el seu

conjunt, la península Ibèrica, o la costa mediterrània peninsular). Actualment es disposa de diverses metodologies per a la regionalització de les projeccions climàtiques –totes elles dependents dels models d'escala global–, que es poden agrupar en tres línies: l'anàlisi acurada dels resultats dels models globals; l'ús de models globals d'alta resolució o de tècniques d'aniuament (*nesting*) de models regionals (RCM); i les tècniques estadístiques per obtenir resultats d'escala més reduïda (*downscaling*).

En base a un conjunt de projeccions sobre el clima futur realitzades per diversos autors, que abasten àrees que inclouen el territori català, es pot concloure que l'augment de temperatura de l'aire a Catalunya serà superior al de la mitjana del planeta. Això voldria dir un augment a l'entorn de 3,5°C (entre 1,5 i 6,3°C) a finals del segle XXI. Aquest augment no seria ni uniforme en el temps (probablement amb augments més acusats a l'estiu que a l'hivern) ni en l'espai (probablement amb augments més importants a l'interior que a la costa).

Pel que fa a la precipitació, la situació és més complexa (com ja ho és l'estructura actual de la precipitació a Catalunya). Cal tenir present, però, que els diversos estudis d'escala regional donen prediccions diferents. Fent un esforç de síntesi, es pot dir que la precipitació a Catalunya no hauria de canviar de forma molt significativa, ja que les prediccions oscil·len entre disminucions moderades i augments molt lleugers. En termes generals hi ha acord a l'hora de predir disminucions petites o moderades (de fins un 20%) de la precipitació durant l'estiu; i augments petits (de fins un 10%) a l'hivern, sempre a finals del segle XXI. No s'han trobat prediccions de canvis significatius a la primavera, i pel que fa a la tardor la disminució seria encara més petita que la de l'estiu. L'únic estudi que permet distingir variacions espacials d'aquests canvis indica disminucions de precipitació a la zona del Pirineu i Pre-pirineu occidental i augments a la resta del territori.

En tot cas, encara queda pendent una gran tasca investigadora pel que fa a la regionalització de les projeccions sobre el canvi climàtic, amb un interès particular pel cas de Catalunya.

En el marc de la Conferència Mundial sobre Medi Ambient i Desenvolupament, celebrada a Rio de Janeiro el mes de juny de 1992, es va fer pública i patent la preocupació pel canvi climàtic i per la influència de les activitats humanes sobre aquest fenomen. A partir d'aquest moment s'han dedicat grans esforços a la predicció del clima del futur, tot i que cal dir que a nivell acadèmic i en entorns d'investigació ja feia temps que s'hi estava treballant. És fàcil entendre que la predicció del clima del futur és molt complexa. Primer, perquè encara hi ha mecanismes del sistema climàtic que no són del tot ben entesos pels experts que se n'ocupen. Segon, perquè en les projeccions futures hi ha dos factors que s'han de considerar: la variació «natural» del clima i la variació «antropogènica», el pes específic de cadascuna de les quals és difícil de determinar. Tercer, perquè aquesta darrera (la influència humana sobre el clima) depèn sobretot de l'activitat socio-econòmica i de les polítiques que s'emprenguin. Quart, perquè les pròpies projeccions, i la seva validesa i certesa, poden influir a les esmentades polítiques.

En qualsevol cas, és obvi l'interès i la importància de les projeccions del futur canvi climàtic. Aquestes es poden fer per diversos mitjans. Bàsicament, es poden fer:

a) En base a l'anàlisi dels canvis ja detectats en els darrers anys, que són projectats cap al futur.

b) Utilitzant models numèrics de simulació del clima.

D'aquestes dues metodologies, la primera ja ha estat tractada parcialment en capítols anteriors, de manera que aquest apartat estarà centrat en la segona. El capítol té una estructura ben senzilla. A la secció A6.1 es donen alguns fonaments per a la simulació climàtica, i sobretot, es descriuen les característiques dels models emprats actualment. També es descriuen resumidament les projeccions (escenaris) pel que fa a les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle i d'aerosols, que són la base de les simulacions del clima. A la secció A6.2 es resumeixen els resultats de l'informe IPCC 2001 pel que fa al canvi climàtic a nivell global. A la secció A6.3 es presenten alguns resultats, tant de l'IPCC com d'altres treballs, sobre el canvi climàtic a escala regional, encara que sovint la regió analitzada és molt més gran que Catalunya.

A6.1. Bases de la simulació climàtica

A6.1.1. Models numèrics de simulació del clima

La majoria de les prediccions amb base científica del clima del futur, tant a escala global (per a tota la Terra) com regional (per a una part del planeta, com ara Europa, la Mediterrània Occidental o Catalunya), es basen en l'ús de *models numèrics de simulació del clima*. En efecte, els models climàtics són la millor eina –per no dir l'única– dispo-

nible actualment per simular la resposta del sistema climàtic global als canvis en la composició de l'atmosfera (Noguer, 2000). Efectivament, altres possibilitats, com ara l'extrapolació al futur de les tendències actuals o passades o altres esquemes empírics són insuficients per projectar el clima del futur, atesa la complexitat del sistema climàtic. Lògicament, aquesta complexitat fa que els models climàtics també siguin representacions simplificades de la realitat.

Per explicar què són aquests models és bo començar explicant, de forma simple, què és un model numèric de predicció del temps (els resultats dels quals són la base de la predicció meteorològica). Actualment, la majoria de models de predicció del temps resolen les equacions bàsiques de la dinàmica dels fluids (l'aire, en el cas de l'atmosfera) sobre un sistema de referència (la Terra) en rotació (Houghton, 1997). Aquestes equacions són l'equació de Navier-Stokes (és a dir, de balanç de quantitat de moviment, que normalment s'aplica a les seves components horitzontals), l'equació hidrostàtica (que correspon a l'anterior, per a la component vertical, i acceptant la situació habitual d'absència d'acceleracions verticals) i l'equació de continuïtat (de conservació de la massa). A més, lògicament, incorporen altres equacions: les lleis termodinàmiques (equació d'estat i conservació de l'energia) i les parametrizacions d'altres fenòmens, és a dir, les representacions simplificades de fenòmens com ara la transferència de radiació solar i terrestre, els processos convectius, els intercanvis de calor i aigua amb la superfície, el fregament viscos i la turbulència que provoca en la capa fronterera, així com els processos de canvis de fase de l'aigua i de precipitació.

Moltes d'aquestes equacions són diferencials i la seva resolució requereix una discretització de l'espai i el temps. Per tant, tot model porta associat una malla de treball: és a dir, la divisió del volum (pot ser tota l'atmosfera) en petites porcions, on es resolen les equacions esmentades. Típicament, per models de predicció del temps

d'abast global, la malla té una resolució d'uns pocs graus de latitud i longitud en l'horitzontal i d'uns centenars de metres en la dimensió vertical. Les malles sovint no són uniformes. També cal discretitzar el temps: atès que els models són de pronòstic (vol dir que evolucionen cap al futur a partir d'unes condicions inicials), cal escollir adequadament un pas temporal per poder trobar la solució, el qual pot ser un interval de minuts. Ateses les incerteses existents en les dades que són necessàries per inicialitzar els càlculs, les altes necessitats de temps de càlcul i la pròpia naturalesa caòtica de la dinàmica atmosfèrica, les prediccions amb aquests models meteorològics no se solen estendre més enllà d'uns pocs dies.

Encara que el fonament d'un model climàtic és exactament el mateix, hi ha diversos aspectes que el diferencien d'un model meteorològic. Aquestes diferències provenen del fet que un model climàtic ha de simular l'evolució del sistema climàtic (no només de l'atmosfera) per períodes de temps molt més llargs. Una primera diferència és que alguns valors que se solen mantenir fixos en els models meteorològics (temperatura dels oceans, composició de l'atmosfera, etc.) en un model climàtic són variables. Més concretament, en els models climàtics cal tenir ben presents les anomenades retroaccions (*feedbacks*), que poden amplificar (si són de signe positiu) o esmorteir (si són negatives) l'efecte d'un forçament radiatiu positiu. Entre les retroaccions positives cal esmentar les del vapor d'aigua, o la del gel-albedo. Entre les negatives, encara que amb gran incertesa, sembla que cal comptar la dels núvols.

Una segona diferència, conseqüència de l'anterior, és que cal incloure descripcions (equacions) que representin altres components del sistema climàtic. És a dir, un model meteorològic descriu el comportament de l'atmosfera, mentre que un de climàtic ha de descriure també els oceans, els gels, i potser fins i tot la biosfera. Hi ha encara, una tercera diferència, que també és

conseqüència de les anteriors: els models climàtics són més complexos (i exigents en recursos de càlcul) que els meteorològics, cosa que provoca que sovint es simplifiquin d'alguna manera. Una manera habitual de reduir el cost de càlcul és reduir la resolució espacial, és a dir, augmentar la grandària de les cel·les de la malla o, fins i tot, reduir la dimensionalitat, és a dir, considerar bandes latitudinals homogènies –models 2D–, o fins i tot el planeta conjuntament –models zero dimensionals–.

Aprofundint una mica en la descripció dels models climàtics, és bo fer-ho també des d'una perspectiva històrica. Inicialment (anys 1970) el models emprats per a la predicció del clima només resolien explícitament la descripció de l'atmosfera. Eren, per tant, extensions directes dels models de predicció del temps i fins i tot van manllevar-los el nom. Es tracta dels models de circulació global (*global circulation models*, GCM). És també en aquests anys que es comença a treballar amb models senzills, però conceptualment molt interessants, anomenats models d'equilibri radiatiu-convectiu (RCM) o models de balanç energètic (EBM). Aquests models permeten efectuar experiments, com ara canviar la intensitat de la radiació solar, la superfície gelada, etc. amb un cost de càlcul molt raonable. En tot cas, cap als anys 1980 els models de circulació global van incorporar representacions de les interaccions entre l'atmosfera i la superfície sòlida de la Terra, mentre que es començà a tenir present de forma explícita (però mitjançant models independents) els processos oceànics (incloent el gel marí). Atès que el model de circulació atmosfèrica GCM (o AGCM) i el de circulació oceànica (OGCM) s'executaven independentment, sovint es trobava una dificultat: el flux tèrmic entre atmosfera i oceà (que és una condició de contorn d'ambdós models) havia de ser diferent en l'un i en l'altre per tal d'obtenir resultats satisfactoris (és a dir, representacions que estiguessin d'acord amb les observacions). Per tant, hom parlava del problema de l'ajustament del flux (*flux adjustment*), un problema que va preocupar

els científics durant més d'una dècada, i que portava associat una manca de confiança en els models per part dels no científics.

A principis dels anys 90 del segle xx, els models atmosfèrics i oceànics es van començar a acoblar totalment, per obtenir els que s'anomenen CGCM (*coupled general circulation models*) o també AOGCM (*atmospheric oceanic general circulation models*). Alguns d'aquests models encara ajustaven el flux tèrmic entre l'oceà i l'atmosfera de forma artificial, però aquests desajustos s'han anat resolent a mesura que han millorat les representacions explícites o paramètriques dels diversos fenòmens implicats. Actualment, els models més sofisticats incorporen també representacions del cicle del carboni, és a dir, la predicció de la concentració de CO₂, dels aerosols de sofre i de la resta d'aerosols.

La tendència actual en el desenvolupament dels models va cap a la incorporació explícita de la química atmosfèrica i la dinàmica de la vegetació (incloent canvis d'usos del sòl i efectes de retroacció entre vegetació i atmosfera). En realitat, alguns models de baixa dimensionalitat (2D, latitud i altitud) ja descriuen tots aquests elements (Prinn *et al.*, 1999). Aquests darrers models sovint poden ser classificats dins els models del sistema terrestre de complexitat mitjana o EMIC (*Earth System Model of Intermediate Complexity*). Aquests models en alguns casos disminueixen resolució o dimensionalitat, però incorporen tots els fenòmens implicats en el sistema climàtic terrestre. Molts dels fenòmens hi apareixen parametritzats, però els models s'ajusten (es calibren) a d'altres models més sofisticats. És a dir, que els resultats són similars a models AOGCM però amb temps de càlcul més curts i assumibles (McGuffie i Henderson-Sellers, 2001).

Sigui com sigui, les intercomparacions entre models, les noves dades (principalment, les aconseguides des de satèl·lits), els ordinadors més potents, les millores de les parametritzacions dels fenòmens atmosfèrics i oceànics (que correspo-

nen a la millora de la comprensió d'aquests fenòmens) han anat millorant els models CGCM fins a un punt en què aquests ja són actualment acceptats com a eines de suport en la presa de decisions per part de diverses institucions privades i públiques, incloent-hi els governs (Grassl, 2000). En efecte, una qüestió que es planteja sovint és la següent: si els models de predicció del temps (meteorològics) no solen anar més enllà dels 8 o 10 dies de predicció fiable, com pot fer-se una previsió del clima, és a dir, com es pot fer una previsió de l'evolució del temps durant desenes d'anys? La resposta ve donada, parcialment, en la mateixa pregunta: es tracta de predir el clima, és a dir, les característiques estadístiques (mitjanes i variabilitats, per exemple) del temps, i no el temps d'un dia i lloc concret. Per altra banda, la influència sobre el clima de sistemes (com ara l'oceà) que es comporten segons escales de temps molt més llargues, també justifiquen la predictibilitat del clima.

L'augment en la confiança en els models climàtics que s'ha produït recentment es deu sobretot al fet que aquests presenten bons resultats quan se'ls apliquen diversos tests d'avaluació. Aquestes proves habitualment es poden resumir en quatre (Grassl, 2000):

- a) Capacitat de reproduir adequadament el clima actual,
- b) Capacitat de reproduir (amb la variabilitat interanual i decadal inclosa) els canvis des de l'inici del període instrumental (és a dir, fa de l'ordre de 100 anys), quan són executats amb la corresponent història de forçaments externs (incloent l'augment del CO₂ o les erupcions volcàniques com la del Pinatubo, produïda l'any 1991),
- c) Capacitat de reproduir una situació climàtica ben diferent del passat, derivada del registre paleoclimàtic, i quan són executats amb el corresponent forçament extern d'aquell temps,
- d) Capacitat de reproduir, a grans trets, un canvi sobtat del clima en el passat.

La majoria de models CGCM que s'estan utilitzant actualment superen sense problemes els dos primers tests. També reproduïxen molts dels trets del clima del passat (per exemple, del darrer màxim glacial fa uns 20.000 anys, o del període càlid de fa uns 6.000 anys), però no totes les seves característiques. Pel que fa a la quarta prova, només s'ha pogut aplicar (amb èxit) a models de complexitat mitjana, ja que els més sofisticats (o d'alta resolució) necessiten massa recursos de càlcul per simular transitoris de llarga durada.

Les prediccions sobre el clima del futur que es fan en el darrer informe del IPCC estan basades en els resultats d'un nombre limitat de models, la majoria dels quals queden recollits, amb les seves característiques principals, a la taula A6.1. Alguns dels resultats referents al clima futur a Catalunya que es presentaran més endavant (a la secció A6.3) també es basen de forma important en els resultats d'alguns d'aquests models. Cal destacar que tots els models emprats han estat desenvolupats o s'utilitzen en l'actualitat en centres de recerca de tant sols 8 estats (Estats Units d'Amèrica, Canadà, Alemanya, Regne Unit, França, Xina, Japó i Austràlia).

A6.1.2. Forçament radiatiu i resposta climàtica

El canvi en el clima poden ser el resultat tant de la variabilitat interna del propi sistema climàtic, com de factors externs. Aquests darrers poden tenir un origen natural o també poden ser causats per l'activitat humana (origen antropogènic). Per tal de valorar de forma relativa els diversos factors externs, és molt convenient el concepte de *forçament radiatiu*, que pot ser entès com el canvi en el flux net de radiació que es troba disponible per part del sistema terra-atmosfera. Un forçament radiatiu positiu, com per exemple el que produeixen els gasos amb efecte d'hivernacle, tendeix a escalfar la superfície de la Terra. Un forçament negatiu, com per exemple el que podria derivar-se de l'augment d'alguns tipus d'aerosols a la troposfera, tendeix a refredar la superfície. Cal tenir present que factors naturals, com ara una variació de l'energia que

El canvi climàtic a Catalunya Projeccions futures sobre el clima a Catalunya

N	Nom del model	Centre	País	Resolució a l'atmosfera	Resolució als oceans	Flux A-O
1	ARPEGE/OPA1 ARPEGE/OPA2	CERFACS	França	5,6 x 5,6 L30 3,9 x 3,9 L19	2,0 x 2,0 L31 2,0 x 2,0 L31	- -
2	BMRCa BMRCb	BMRC	Austràlia	3,2 x 5,6 L9 3,2 x 5,6 L17	3,2 x 5,6 L12 3,2 x 5,6 L12	- H,W
3	CCSR/NIES	CCSR/NIES	Japó	5,6 x 5,6 L20	2,8 x 2,8 L17	H,W
4	CGCM1 CGCM2	CCCma	Canadà	3,8 x 3,8 L10 3,8 x 3,8 L10	1,8 x 1,8 L29 1,8 x 1,8 L29	H,W H,W
5	COLA1 COLA2	COLA	Estats Units d'Amèrica	4,5 x 7,5 L9 4 x 4 L18	1,5 x 1,5 L20 3,0 x 3,0 L20	- -
6	CSIRO Mk2	CSIRO	Austràlia	3,2 x 5,6 L9	3,2 x 5,6 L21	H,W,M
7	CSM 1.0 CSM 1.3	NCAR	Estats Units d'Amèrica	2,8 x 2,8 L18	2,0 x 2,4 L45	-
8	ECHAM1/LSG ECHAM3/LSG ECHAM4/OPYC3	DKRZ	Alemanya	5,6 x 5,6 L19 5,6 x 5,6 L19 2,8 x 2,8 L19	4,0 x 4,0 L11 4,0 x 4,0 L11 2,8 x 2,8 L11	H,W,M H,W,M H,W
9	GFDL_R15_a GFDL_R15_b GFDL_R30_c	GFDL	Estats Units d'Amèrica	4,5 x 7,5 L9 4,5 x 7,5 L9 2,25 x 3,75 L14	4,5 x 3,7 L12 4,5 x 3,7 L12 1,875 x 2,25 L18	H,W H,W H,W
10	GISS1 GISS2	GISS	Estats Units d'Amèrica	4,0 x 5,0 L9 4,0 x 5,0 L9	4,0 x 5,0 L16 4,0 x 5,0 L13	- -
11	GOALS	IAP/LASG	Xina	4,5 x 7,5 L9	4,0 x 5,0 L20	H,W,M
12	HadCM2 HadCM3	UKMO	Regne Unit	2,5 x 3,75 L19 2,5 x 3,75 L19	2,5 x 3,75 L20 1,25 x 1,25 L20	H,W -
13	IPSL-CM	IPSL/LMD	França	5,6 x 3,8 L15	2,0 x 2,0 L31	
14	MRI1 MRI2	MRI	Japó	4,0 x 5,0 L15 2,8 x 2,8 L30	2,0 x 2,5 L21 2,0 x 2,5 L23	H,W H,W,M
15	NCAR1	NCAR	Estats Units d'Amèrica	4,5 x 7,5 L9	1,0 x 1,0 L20	-
16	NRL	NRL	Estats Units d'Amèrica	2,5 x 2,5 L18	1,0 x 2,0 L25	H,W
17	DOE PCM	NCAR	Estats Units d'Amèrica	2,8 x 2,8 L18	0,67 x 0,67 L32	-

Notes: Tant la resolució atmosfèrica com als oceans es dona en graus de latitud per grau de longitud. En molts casos, especialment en els models espectrals, són valors aproximats per permetre comparacions. Pel que fa a la vertical, la xifra que segueix a la L indica el nombre de capes emprades. A la columna Flux A-O s'indica quins tipus de fluxos entre l'oceà i l'atmosfera s'han ajustat en cada cas: H = flux de calor; W = flux d'aigua dolça; M = flux de quantitat de moviment. Quan en una mateixa fila hi ha diferents noms de models vol dir, en realitat, el mateix model desenvolupat o emprat en un centre, amb petites variacions de resolució o de parametrizacions.

Taula A6.1. Algunes de les característiques dels models AOGCM emprats en el darrer informe de l'IPCC.
Font: Elaboració pròpia en base a una taula d'aquest informe (Houghton et al., 2001).

prové del sol o una erupció volcànica, poden provocar també forçament radiatiu.

La definició rigorosa del forçament radiatiu és la següent: és el canvi provocat per una pertorbació o per la introducció d'un agent a l'atmosfera, en la irradiància (incloent radiació solar i terrestre i en unitats de $W m^{-2}$) neta a la tropopausa, després de permetre que les temperatures estratosfèriques s'ajustin al nou balanç radiatiu, però mantenint sense canvis les temperatures i altres variables atmosfèriques a la superfície i a la troposfera. S'entén que es calcula la mitjana de la irradiància neta a tot el planeta i per un període de temps prou llarg per eliminar la variabilitat pròpia del sistema climàtic. Aquesta definició presenta alguns problemes en la seva aplicació pràctica, especialment quan es vol assignar un forçament radiatiu a un factor o agent que provoca els canvis a través de canvis en l'estat de la

troposfera. No obstant això, ha estat molt útil per tal de relativitzar la importància dels diferents factors que potencialment podrien haver alterat el clima en el passat o podrien fer-ho en el futur.

Així, els successius informes de l'IPCC presenten gràfiques del forçament radiatiu de cadascun dels agents des del temps preindustrials fins al present. En el darrer informe, els forçaments es presenten per 12 agents diferents, per al període entre 1750 i 2000, i amb les seves respectives incerteses (figura A6.1). Cal destacar que el forçament radiatiu positiu dels gasos amb efecte d'hivernacle (CO_2 , CH_4 , N_2O , halocarburs) arriba als $2,5 W m^{-2}$, que el forçament negatiu atribuïble a la pèrdua d'ozó estratosfèric es podria veure sobradament compensat pel forçament positiu a causa de l'augment de l'ozó troposfèric, i que l'efecte dels aerosols, tant directe com indi-

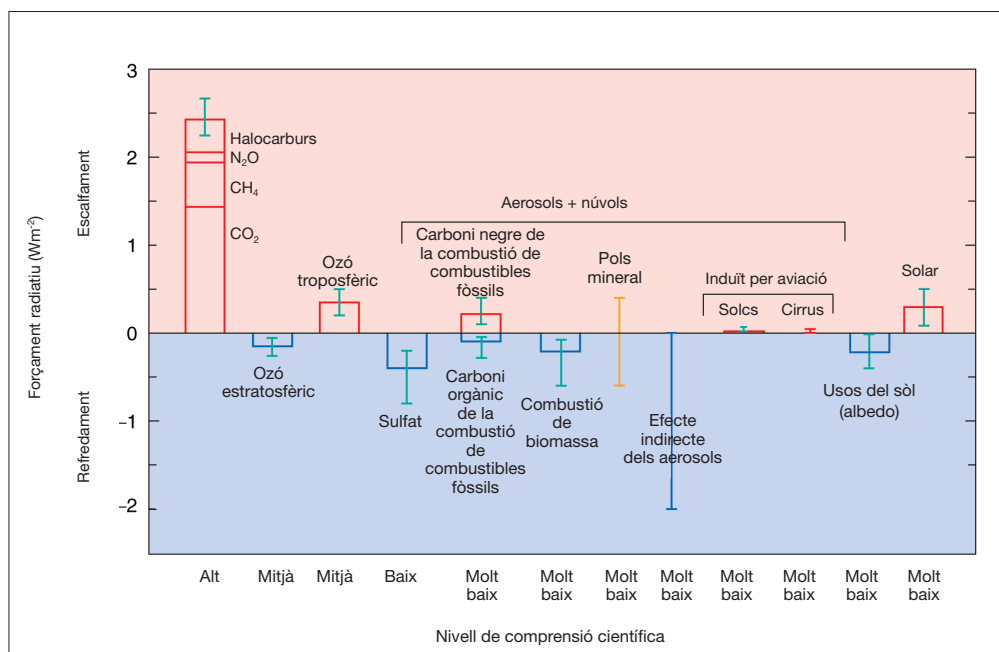


Figura A6.1. Mitjana anual (Wm^{-2}) dels forçaments radiatius globals entre abans de la revolució industrial (1750) i l'actualitat (2000). Es mostra la millor estimació (barres) i la incertesa subjectiva associada. Cal fer notar que el forçament d'alguns components només presenta incertesa, i en el cas de la pols mineral, fins i tot el signe del forçament és incert. Només el forçament dels gasos amb efecte d'hivernacle (els de la primera barra) es considera molt ben entès. El forçament de l'ozó es considera moderadament entès, el dels aerosols de sofre, de forma baixa, mentre que la resta de casos es considera que es troben en un nivell de comprensió molt baix.

Font: Houghton et al., 2001.

recte, tot i que amb gran incertesa i amb manques importants del coneixement dels mecanismes, pot ser el d'un forçament negatiu.

L'interès pràctic del concepte de forçament radiatiu es fonamenta en l'assumpció que, en general, hi ha una relació entre l'esmentat forçament i el canvi en la temperatura global mitjana de la superfície, i que aquesta relació és independent de l'agent o mecanisme que provoca el forçament. De manera molt general, es pot representar el canvi de temperatura mitjana superficial global utilitzant una simplificació del balanç energètic del sistema climàtic, que es pot expressar com:

$$\frac{dH}{dt} = F - \alpha T$$

on dH/dt és la taxa amb què el sistema emmagatzema calor (igual a 0 en una situació d'equilibri), F és el forçament radiatiu, i αT és l'efecte net dels processos que actuen per contrarestar els canvis de forçament.

Tots els termes, en realitat, indiquen els canvis respecte l'estat climàtic d'equilibri no pertorbat. Per exemple, un forçament radiatiu positiu ($F > 0$) implicarà un augment de temperatura. La magnitud d'aquest augment dependrà dels mecanismes implicats, que es representen al terme αT . Com més gran és α , més petit és el canvi de temperatura necessari per contrarestar un forçament radiatiu i tornar el sistema a l'equilibri.

El ritme d'emmagatzematge de calor dH/dt és, bàsicament, el ritme amb què la calor s'emmagatzema a l'oceà. Per tant és habitual escriure:

$$F = \alpha T + F_o$$

on F_o és el flux de calor cap a l'oceà. Aquesta equació s'interpreta com que davant d'un forçament radiatiu es respon amb un canvi de temperatura i amb l'aparició d'un flux de calor cap a l'oceà (profund).

L'informe de l'IPCC 2001 (Houghton *et al.*, 2001) defineix el paràmetre de sensibilitat climàtica λ com l'invers de α (suposant que el sistema ha tornat a l'equilibri):

$$\lambda = T / F$$

En els models unidimensionals radiatius-convectius, en l'àmbit dels quals inicialment es va definir aquest paràmetre, el seu valor és gairebé invariant respecte de l'agent que provoca el forçament –a l'entorn dels 0,5 K / (W m⁻²)–. No obstant això, quan s'intenta calcular aquest paràmetre amb els models més sofisticats (models de circulació global atmosfèrica i oceànica, AOGCM) s'obtenen valors que depenen del model escollit i de l'agent que provoca el canvi. Tot i així, el rang de valors del paràmetre de sensibilitat climàtica no és excessivament gran, i hom acostuma a considerar una variació en λ d'un 25% a l'entorn del valor ja esmentat. Quan es parla d'un model o simulació amb alta sensibilitat climàtica, es vol indicar que es tracta d'un cas en què amb un forçament radiatiu positiu d'1 W m⁻², l'augment de la temperatura d'equilibri és superior a 0,5 K, mentre que amb un model de baixa sensibilitat, l'augment és inferior a 0,5 K.

Sovint (de fet, el mateix informe IPCC 2001 ho fa) s'utilitza una altra definició per al que s'anomena, de manera molt semblant, sensibilitat climàtica en equilibri. Es tracta de la resposta del clima (l'augment de temperatura d'equilibri, T_{2x}) a la duplicació del contingut de CO₂ a l'atmosfera i al seu corresponent forçament radiatiu F_{2x} (vegeu, per exemple, Houghton, 1997). Com que és evident que:

$$T_{2x} = F_{2x} / \alpha$$

resulta que aquesta sensibilitat climàtica (mesurada en graus de temperatura) és inversament proporcional a α o, el que és el mateix, directament proporcional al paràmetre de sensibilitat climàtica λ . El càlcul de la sensibilitat climàtica

en equilibri s'ha de realitzar amb l'ús de models. Típicament, s'imposa un creixement de l'1% anual en la concentració de CO₂ (és un creixement més elevat que el que s'observa actualment, però si es té en compte l'efecte equivalent de la resta de gasos amb efecte d'hivernacle, és un valor raonable) fins que s'assoleix la situació en què la concentració de CO₂ s'ha duplicat. En aquest moment s'atura la introducció de CO₂, però els models han de seguir corrent, ja que encara no s'ha assolit l'equilibri (és a dir, la situació en què $F_0 = 0$). De fet, la temperatura que prediu el model en el moment en què s'assoleix la duplicació de la concentració de CO₂ ($2 \times \text{CO}_2$) s'anomena resposta climàtica transitòria (TCR). Per arribar a assolir l'equilibri, es requereix més o menys temps (de simulació) depenent de si el model és totalment acoblat (atmosfera-oceà) o només representa la capa de barreja oceànica. En tot cas, un valor típic de la sensibilitat climàtica en equilibri és d'uns 3,0°C, que es correspon aproximadament al ja esmentat 0,5K/Wm⁻² per al paràmetre de sensibilitat. És important destacar que hi ha una diferència significativa entre T_{2x} i TCR. Això vol dir que encara que en un moment determinat s'aturi l'augment del forçament radiatiu, no s'aturarà l'augment de temperatura fins molts més anys després (i la temperatura final serà més alta que la que hi havia en el moment en què es va aconseguir estabilitzar les concentracions de gasos amb efecte d'hivernacle).

Per evitar simulacions molt llargues (i costoses en temps de càlcul) és habitual utilitzar una altra característica per descriure un model. Es tracta de la sensibilitat climàtica efectiva T_e . Aquesta es calcula com:

$$T_e = T \frac{F_{2x}}{F - F_0}$$

on T i F són la temperatura i el forçament radiatiu, respectivament, en un moment de la simulació. És obvi que quan aquesta ha assolit

l'equilibri, $F_0 = 0$, $T = T_{2x}$, i $F = F_{2x}$, i per tant, $T_e = T_{2x}$.

A6.1.3. Els escenaris de l'informe de l'IPCC 2001

Els anomenats escenaris per a la predicció del clima futur són les estimacions dels canvis futurs (en particular, de les emissions dels gasos amb efecte d'hivernacle, dels aerosols de diverses menes i dels canvis en els usos dels sòls) calculades a partir de prediccions del creixement (econòmic, demogràfic, tecnològic). Evidentment, aquestes prediccions presenten una alta incertesa, ja que inclouen aspectes tant complicats com les decisions polítiques (que es poden veure influïdes per les pressions per protegir el medi ambient), el desenvolupament de noves fonts d'energia, i en general, l'evolució del comportament humà.

En l'informe de l'IPCC de 1995 (publicat el 1996), les projeccions del clima del futur s'havien fet en base a una col·lecció de previsions de creixement que formaven el que es va anomenar conjunt dels escenaris IS92. Posteriorment, el 1996, es va començar a treballar en l'informe especial sobre escenaris d'emissions (SRES, *Special Report on Emissions Scenarios*), on es desenvolupaven fins a una quarantena de possibles evolucions futures de les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle i aerosols com a resultat de diverses evolucions del desenvolupament mundial. Una característica comuna a tots els escenaris presentats és que cap d'ells no inclou explícitament una aplicació del Conveni Marc de les Nacions Unides sobre Canvi Climàtic o del Protocol de Kyoto. En canvi, sí que alguns dels escenaris preveuen canvis en les emissions derivats de l'aplicació de regulacions relatives a la contaminació atmosfèrica.

Tots els escenaris del SRES es poden agrupar en 4 famílies, que corresponen a 4 línies evolutives (*storylines*), que s'han vingut a anomenar A1, A2, B1 i B2. Les característiques fonamentals de cadascuna d'aquestes famílies es descriuen a continuació (Houghton et al., 2001).

A1 Es tracta de suposar un creixement econòmic ràpid, un creixement demogràfic fins al 2050 i un decreixement subseqüent, i una ràpida introducció de noves tecnologies més eficients. Suposa també convergència entre les diverses regions del planeta, entenenent que això vol dir una disminució substancial de les diferències entre les rendes *per capita* de les diverses zones de la Terra, que s'aconseguiria simultàniament a un augment de les relacions socials i culturals entre aquestes diverses regions. En aquest grup d'escenaris se'n poden distingir tres subgrups d'escenaris, segons el desenvolupament tecnològic en el camp de l'energia:

- A1FI: ús intensiu dels combustibles fòssils.
- A1T: ús d'energies no basades en combustibles fòssils.
- A1B: ús equilibrat de diverses fonts d'energia, incloent també les basades en combustibles fòssils però acceptant millores tecnològiques en totes elles.

B1 L'evolució demogràfica suposada és la mateixa que en els escenaris A1. No obstant això, aquí es suposen canvis ràpids en les estructures econòmiques, incloent una economia basada en els serveis i la informació, la reducció en la intensitat d'ús de materials i la introducció de tecnologies netes i eficients quant a l'ús de recursos. En aquest conjunt d'escenaris, l'aproximació al desenvolupament sostenible, que tendeix també cap a la equitat, es realitza des d'una perspectiva més aviat global.

A2 Aquesta família inclou els escenaris que presenten un món heterogeni (com ara el present). És a dir, les diferències en el creixement demogràfic es mantenen, implicant un creixement de població mundial sostingut. Les diferències econòmiques (renda per càpita) i tecnològiques entre diverses regions del planeta es mantenen o augmenten.

B2 Aquí, la sostenibilitat s'aproxima sota una perspectiva més aviat local o regional. La població creix contínuament, però més lentament que en el cas A2. També el creixement econòmic i els canvis tecnològics són més lents, però en canvi, s'orienten de diverses maneres.

Per cada família (o subfamília, en el cas de la línia evolutiva A1), es van generant una sèrie d'escenaris diferents, que s'agrupen al seu torn entre els harmonitzats (que comparteixen –per cada línia evolutiva– idèntics valors per a la població, producte interior brut mundial i consum d'energia final) i la resta (que exploren l'efecte de la incertesa associada –per cada línia evolutiva–, als esmentats valors). En tot cas, tots els escenaris, fins a un total de 40, són en principi igualment plausibles i probables. L'informe SRES no assigna una certesa més gran a cap d'ells. No obstant això, el mateix informe proposa un escenari de cada família (i subfamília) que podem anomenar indicatiu o il·lustratiu (*marker scenario*), que és el que s'ha utilitzat preferentment en les anàlisis posteriors. Cal també esmentar que la majoria de projeccions del clima del futur, basades en models i incloses en l'informe IPCC 2001, es van començar a realitzar a partir de 1998, quan la comissió que elaborava el SRES encara no havia completat els seus treballs. Per tant, es va treballar sobre uns esborranys d'escenaris, que no sempre han resultat exactament iguals als proposats per l'informe final del SRES. De totes maneres, això no canvia substancialment el valor que tenen les anàlisis climàtiques desenvolupades en base als esborranys d'escenaris indicatius que es van utilitzar.

El desenvolupament demogràfic, econòmic, energètic, tecnològic i normatiu associat a cada escenari dona com a resultat (pel que fa al canvi climàtic) uns valors d'emissions dels diversos gasos amb efecte d'hivernacle i d'aerosols (figura A6.2). Els escenaris SRES contempnen explícitament les emissions d'aerosols de sofre, però no d'altres aerosols com els que es produeixen en la combustió de biomassa (crema de boscos). Aquestes darreres emissions són estimades, habitualment, en base al ritme de desforestació. Al seu torn, les emissions es converteixen en unes concentracions globals (no necessàriament homogènies) de les esmentades substàncies (figura A6.3). Lògicament, per tal de convertir les emissions en concentracions presents en l'atmosfera,

Projeccions futures sobre el clima a Catalunya Josep Calbó Angrill

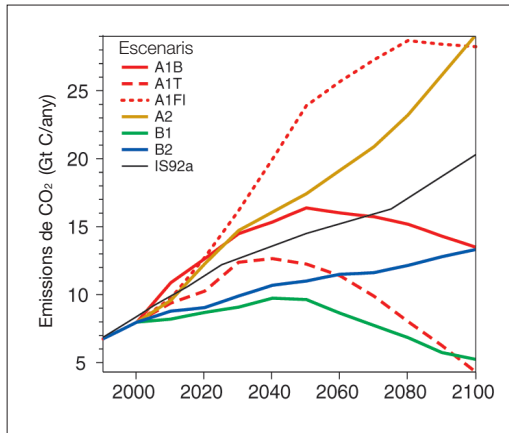


Figura A6.2. Emissions anuals de CO₂ fins l'any 2100, segons els sis escenaris principals descrits pel SRES, així com per l'escenari IS92a, que va ser emprat en el segon informe de l'IPCC, de l'any 1995. Font: Houghton et al., 2001.

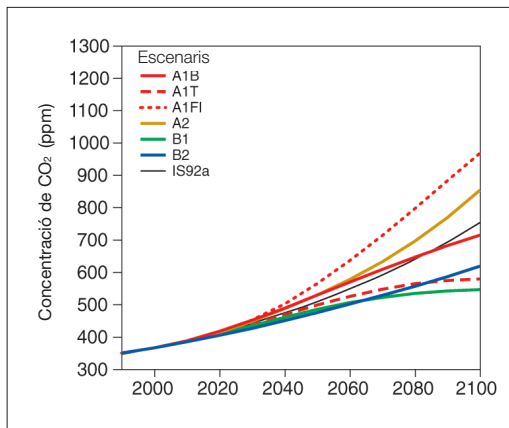


Figura A6.3. La concentració de CO₂ a l'atmosfera, com a resultat de les emissions presentades en la figura anterior. Noteu que malgrat en alguns escenaris les emissions comencen a disminuir cap a mitjan de segle, la concentració segueix augmentant, atès que l'escala de temps característica per assolir un nou equilibri en la concentració de CO₂ és d'uns 200 anys. Font: Houghton et al., 2001.

calen models dinàmics que representin la física i la química de les diverses substàncies i, en particular, dels processos d'intercanvi entre els diversos compartiments del sistema climàtic. Finalment, la presència dels diversos compostos a l'atmosfera, al llarg del temps, provoca un forçament radiatiu. L'evolució amb el temps d'aquest

forçament, sempre en base a l'any 1750 i calculat a partir d'un model simple ajustat a models més complexos del clima, es presenta a la figura A6.4.

A6.2. Projeccions a escala global

A6.2.1. Mètodes de simulació a escala global

L'eina bàsica per a la projecció o predicció del clima del futur, com s'ha apuntat a l'apartat A6.1.1 d'aquest mateix capítol, són els models numèrics del clima i, més concretament, els CGCM o AOGCM. També s'ha comentat que aquests models requereixen grans recursos de càlcul. Això és fàcil d'entendre: cal resoldre totes les equacions abans esmentades, en una malla que pot tenir fàcilment diversos centenars de milers de cel·les, i durant milions de passos de temps (100 anys de simulació amb passos temporals de ½ hora). Per tant, és fàcil entendre que quan es tracta de fer diverses (o moltes) simulacions del clima del futur per tal d'investigar els diversos escenaris o l'efecte de la incertesa en les condicions inicials, no es pot fer sempre amb execucions (integracions) dels models complets.

Així, en les projeccions del clima del futur a escala global, és habitual emprar tota la jerarquia de models disponible. És a dir, s'utilitzen els models complexos AOGCM per segons quines anàlisis que volen ser més detallades, models de complexitat mitjana quan es volen integrar, encara que sigui de manera simple, tots els components del sistema climàtic, i models més senzills (fins als zero dimensionals) quan es desitja analitzar diversos escenaris d'emissions o assumpcions en paràmetres incerts. Cal recordar que els models simples o de complexitat mitjana són ajustats per tal que reproduïxin fidelment els resultats dels models complexos AOGCM.

Evidentment, tot model pot acabar donant alguns errors en les seves simulacions, entenent per errors desviacions respecte a allò que ens indiquen les mesures. Aquests errors poden ser atribuïbles a la limitació de les representacions matemàtiques dels fenòmens implicats, a la resolució

de la malla de treball, a l'exclusió d'alguns fenòmens, etc. En tot cas, habitualment s'utilitza una estratègia per tal d'eliminar al màxim possible aquests errors de les prediccions del clima futur, que consisteix en fer primer una simulació sense canvis en els forçaments radiatius. Aquesta simulació s'anomena de *control*. Després s'executen les simulacions que realment interessin, és a dir, aquelles que exploren l'efecte d'algun canvi (normalment, la concentració de gasos amb efecte d'hivernacle) sobre el clima futur. El que es considera en les anàlisis no és el clima que resulta d'aquestes darreres simulacions, sinó les diferències entre el clima d'aquestes i el de la simulació *control*. D'aquesta manera, hom creu que s'eliminen els efectes d'ajustaments artificials o d'errors sistemàtics. Evidentment, atesa la naturalesa no lineal del sistema, poden quedar-hi altres errors o fonts de divergència respecte a les mesures. Això darrer és el que explica que no hi hagi dos models, que amb el mateix forçament radiatiu i les mateixes condicions inicials, donin exactament el mateix resultat.

Un altre problema és el que va associat a la *variabilitat natural*. Per poder-ho entendre millor, cal imaginar-se que es vol descriure la temperatura característica del clima actual. Això no es podria fer considerant les temperatures mesurades un any determinat, ja que aquestes podrien ser diferents de les mesurades l'any anterior o el següent, fins i tot en un clima no canviant. Per tal de descriure el clima, cal fer una mitjana sobre un període prou llarg de temps, mentre que la variància de la sèrie de dades de temperatura serà un reflex de la variabilitat característica d'aquell clima. Ara bé, al mateix temps, aquesta variabilitat es comporta com un *soroll* respecte al *senyal*, que correspondria al clima que volem descriure. Quan es vol projectar, mitjançant els models, el clima de futur com a conseqüència de canvis en el sistema climàtic, cal discernir, d'en-

tre els resultats dels models, el senyal respecte del soroll.

Per fer front a aquest problema s'utilitza la tècnica del conjunt o col·lectivitat de simulacions (*ensembles*). En el cas d'un sol model, consisteix en fer diverses integracions (execucions) amb el mateix forçament, però amb petites diferències en les condicions inicials. Com que el forçament és el mateix, la part determinista del canvi climàtic serà la mateixa en les diverses integracions i les diferències entre els resultats caldrà assignar-les a la variabilitat natural que genera el model. Així, fent la mitjana entre els diversos casos es pot obtenir una millor estimació del canvi climàtic provocat pel forçament que si es fes una sola simulació, i quants més casos es realitzin millor serà la relació entre el senyal i el soroll. Altres alternatives per disminuir l'efecte de la variabilitat (el soroll) són les de fer mitjanes per regions geogràfiques, bandes latitudinals (mitjanes zonals) o mitjanes globals.

Per anar encara més enllà i augmentar el nivell de confiança en les projeccions del clima futur, es solen fer també simulacions per conjunts

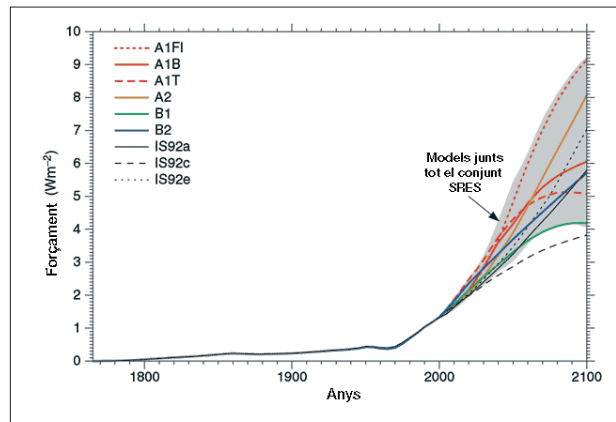


Figura A6.4. El forçament radiatiu des de 1750 fins a l'any 2100, calculat segons els diferents escenaris de l'informe SRES. En diversos colors es representen els escenaris principals i l'ombreat gris cobreix tots els escenaris analitzats en l'informe. També s'inclouen alguns escenaris entre els emprats en l'anterior informe del IPCC, de 1995 (IS92a,c,e).

Font: Houghton et al., 2001.

considerant diversos models (*multi-model ensembles*). En efecte, ja s'ha dit que actualment es disposa de l'ordre de 20 models AOCGM igualment plausibles, però que donen resultats lleugerament diferents associats a la diversitat de resolucions espacials i de representacions dels fenòmens. Suposant, doncs, que tots els models són igualment correctes i que les diferències entre els seus resultats són conseqüència de la variabilitat pròpia del sistema, la mitjana dels resultats del conjunt de simulacions serà una bona aproximació a la resposta del sistema (és a dir, al canvi climàtic). La dispersió dels resultats individuals de cada model (mesurada mitjançant la variància) és una indicació de la incertesa dels resultats. En general, aquesta incertesa augmenta a mesura que les simulacions s'allarguen en el temps i és més gran per a variables com la precipitació que per a la temperatura.

A part de la incertesa de la variabilitat, cal tenir present que les projeccions del clima futur efectuades mitjançant models tenen altres fons d'incertesa: en primer lloc, la que es deriva del desconeixement de les emissions futures i del forçament radiatiu associat (incertesa dels escenaris de forçament); en segon lloc, la que es deriva dels propis models, és a dir, dels possibles errors sistemàtics que aquests poden contenir (incertesa de la resposta dels models); i en tercer lloc, la incertesa dels processos físics que no estan representats correctament, o senzillament, no són presents en els models (incertesa associada al processos). La darrera es pot disminuir mitjançant l'avaluació dels models, de manera que aquests siguin capaços de reproduir el clima present. La segona es mesura en part mitjançant les tècniques de simulació per conjunts, però mai no es pot estar segur que en el procés d'admitjanament s'eliminin els diversos errors sistemàtics o que un model particularment diferent dels altres no faci augmentar molt el nivell de variabilitat o incertesa associada a la predicció.

Pel que fa als tipus de simulacions que es realitzen per tal de fer prediccions del canvi climàtic,

es poden classificar en tres categories. En primer lloc, i amb l'objectiu de comparar els diversos models i de calibrar-los, es fan simulacions on se suposa un augment constant de l'1% en la concentració de CO₂. Ja s'ha comentat que aquest augment és aproximadament el doble que l'augment observat del CO₂ però, si es mira a partir del forçament radiatiu que significa, correspon aproximadament a l'augment conjunt de tots els gasos amb efecte d'hivernacle. Les simulacions d'aquest tipus van ser la base del projecte CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*). En segon lloc, hom acostuma a fer una sèrie d'integracions que comencen en algun moment del segle XIX i continuen durant tot el segle XX. Això permet, d'una banda, comparar els resultats dels models amb les observacions i, sobretot, permet iniciar les simulacions de la darrera categoria a partir de l'estat final, dinàmic, d'aquestes simulacions. És a dir, serveixen en part per disminuir el problema d'iniciar una simulació des d'una situació estàtica, allò que es coneix com l'arrançada en fred (*cold start*).

Finalment, la tercera categoria o conjunt de simulacions –la més interessant– inclou les integracions que utilitzen com estat inicial la situació al final del segle XX (segons els resultats de l'anterior conjunt) i assumeix els forçaments corresponents als diversos escenaris SRES. En l'informe IPPC 2001 es van simular sobretot els escenaris A2 i B2, que estan a la banda alta i baixa dels forçaments previstos respectivament. Com ja s'ha apuntat anteriorment, es poden realitzar moltes altres simulacions equivalents a aquestes, per a molts diversos escenaris, mitjançant models més senzills que reproduïen els resultats dels AOGCM (i així es contempla a l'informe IPCC 2001).

A6.2.2. Resposta global del clima

Malgrat que, com s'ha vist a la secció anterior, es poden fer un gran nombre de simulacions diferents per projectar el clima del futur, aquest apartat està dedicat a les simulacions que corresponen als escenaris de l'informe SRES. Un altre

comentari inicial que cal fer és que en els informes de l'IPCC la descripció del clima es fa gairebé de forma exclusiva a partir de les variables temperatura i precipitació. En poques ocasions s'analitzen altres variables, com ara pressió, humitat relativa, nuvolositat, etc. Aquestes seran doncs les variables que també es presentaran aquí.

En primer lloc, a la figura A6.5 es presenta l'evolució futura prevista de la temperatura mitjana del planeta, per 9 simulacions diferents realitzades amb 9 models AOGCM diferents, totes elles amb els escenaris d'emissions i forçaments SRES A2 i B2. En el cas de l'escenari A2, l'augment de la temperatura mitjana entre els anys 2071 i

2100 respecte la mitjana dels anys 1960 a 1990 és de 3,0°C, amb un rang segons els diversos models d'1,3 a 4,5°C. Per a la mitjana dels anys 2021-2050, l'augment és d'1,1°C amb un rang de 0,5 a 1,4°C. Els valors corresponents de l'escenari B2 són de 2,2°C amb un rang de 0,9 a 3,4°C per a finals de segle, i 1,2°C amb un rang de 0,5 a 1,7°C per a la meitat del segle. És a dir, en conjunt tots els models preveuen augments de temperatura, que són gairebé iguals per als dos escenaris a mitjans de segle, i més alts per l'escenari A2 a finals de segle. Això és força lògic, ja que l'escenari A2 presenta un forçament radiatiu més alt que el B2 a partir d'aproximadament de l'any 2040.

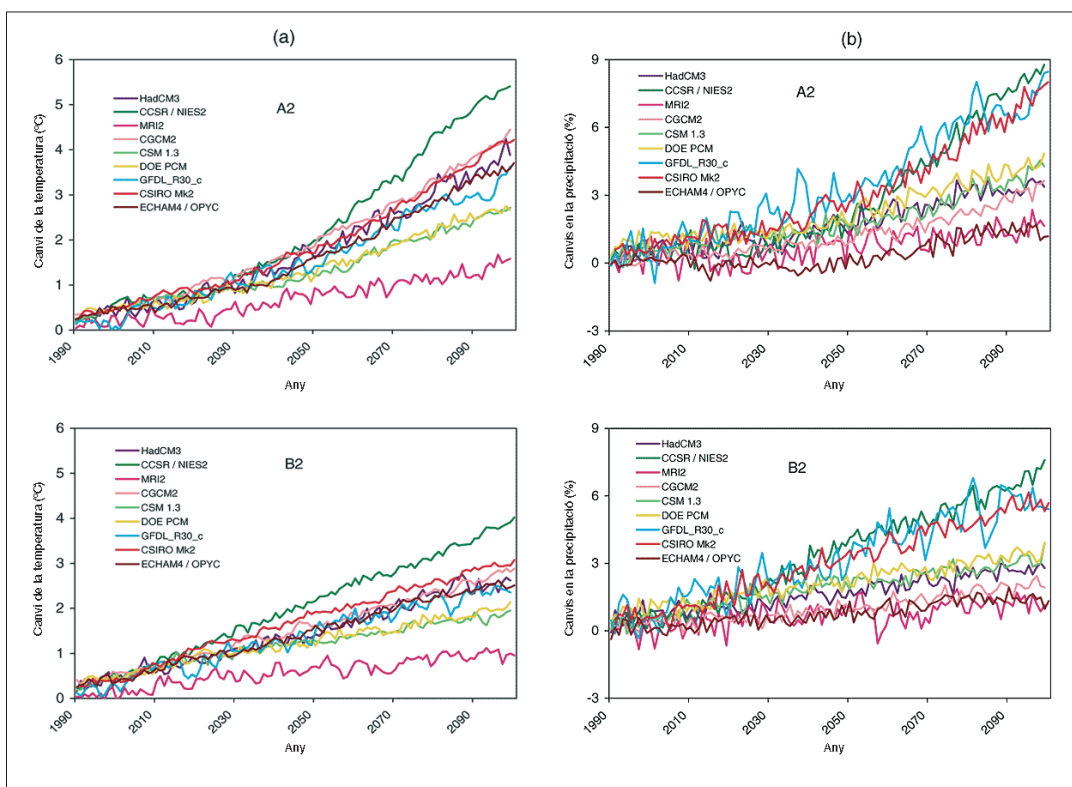


Figura A6.5. Evolució temporal de la temperatura i precipitació (canvis respecte els valors mitjans del període 1961-1990) previstos per diversos models AOGCM i emprant els escenaris A2 i B2 generats pel SRES pel que fa a les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle i aerosols. Els models emprats es troben descrits a la taula A6.1, tot i que en alguns casos, les presents simulacions s'han efectuat amb versions una mica modificades dels models allí descrits.

Font: Houghton et al., 2001.

Projeccions futures sobre el clima a Catalunya Josep Calbó Angrill

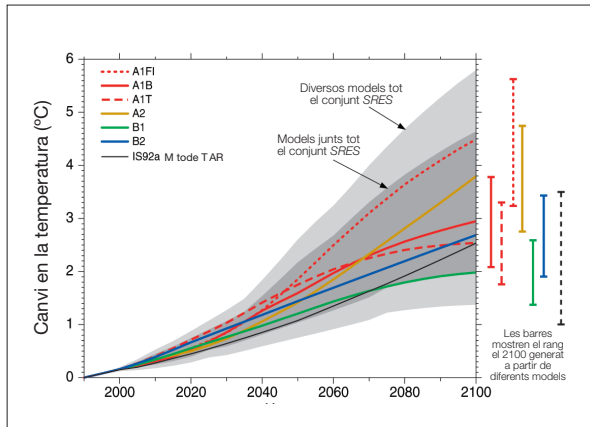


Figura A6.6. Evolució temporal de la temperatura (canvi respecte la temperatura global mitjana de l'any 1990) previstos pel models senzill ajustat a diversos models AOGCM i emprant tots els escenaris SRES. Es destaquen en colors els sis escenaris principals, i també es mostren els resultats pels escenaris IS92 emprats en l'anterior informe de l'IPCC.

Font: Houghton et al., 2001.

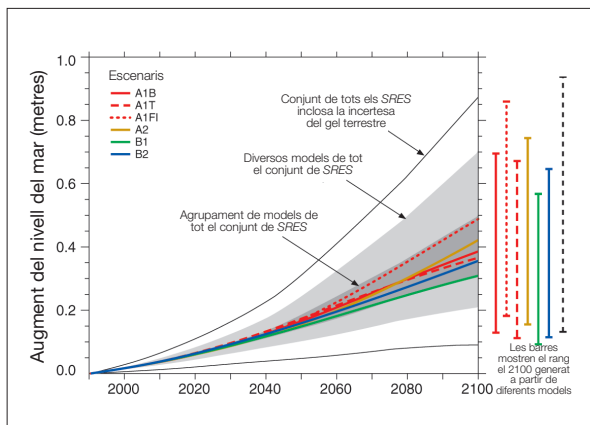


Figura A6.7. Evolució temporal de l'augment del nivell del mar entre els anys 1990 i 2100 pels diversos escenaris SRES. Les principals contribucions a l'augment del nivell del mar (dilatació tèrmica i canvis en el gel continental) s'han calculat amb un model simple ajustat a 7 models AOGCM. Es donen les evolucions mitjanes previstes, i la incertesa (el rang de resultats obtinguts amb els diferents models AOGCM) pel 2100, per cadascun dels 6 escenaris principals (línies de colors). Els ombrejats corresponent a les simulacions efectuades amb tots els escenaris SRES. Les línies negres més externes inclouen els efectes d'afegir la incertesa en la resposta dels gels terrestres, del permafrost i de la deposició de sediments.

Font: Houghton et al., 2001.

En la mateixa figura A6.5 es mostren les prediccions pel que fa a la precipitació segons les mateixes simulacions. En l'escenari A2, l'augment de precipitació a finals de segle és, en mitjana, del

3,9%, amb un rang entre l'1,3 i el 6,8%. A mitjans de segle, la mitjana d'augment de la precipitació és d'1,2%. En l'escenari B2, a finals de segle l'augment de precipitació és de 3,3% [1,2-6,1%], i a mitjans de segle, d'un 1,6%. Tots els models i escenaris preveuen, doncs, un augment en la mitjana global de precipitació.

Les mateixes simulacions es poden analitzar amb més detall. Atès que són integracions de models AOGCM, donen molta més informació (tant en l'espai com en el temps) que les mitjanes comentades. Més concretament, es poden extreure les següents conclusions, en les que estan d'acord majoritàriament tots els models emprats:

- L'escalfament afecta tot el planeta, però de forma poc homogènia. A les latituds elevades de l'hemisferi nord, l'escalfament és notablement més alt que la mitjana.
- Igualment, l'augment global de precipitació és el resultat d'un patró no gens homogeni. En aquest cas, la precipitació augmenta als tròpics (particularment sobre els oceans) i en latituds mitjanes i elevades dels dos hemisferis, mentre que disminueix en les zones subtropicals d'ambdós hemisferis.

És important destacar que, en els resultats que fan referència a la temperatura, els models estan més d'acord entre ells, amb relacions senyal-soroll tan altes com 2, mentre que per la precipitació, poques vegades l'esmentada relació assoleix el valor d'1.

Presentats i comentats els resultats obtinguts amb els models complexos AOGCM en alguns escenaris, es pot passar a mostrar els resultats obtinguts per un model senzill que ha estat prè-

viament ajustat per reproduir els resultats mitjans globals de diversos models complexos. Amb aquest model senzill s'ha pogut investigar les respostes del clima a tota la quarantena d'escenaris proposats pel SRES, tot i que en les gràfiques només apareixen destacats els sis escenaris principals. La figura A6.6 mostra l'evolució prevista de la temperatura els propers 100 anys, calculada amb el model simple i segons diversos escenaris.

Tot i que no es tracta d'una variable climatològica en sentit estricta, una magnitud que preocupa considerablement és el nivell del mar. Per això la figura A6.7 presenta les projeccions futures pel que fa a aquesta dada. Sense entrar en detalls, només cal recordar que el principal causant de l'augment del nivell del mar és la dilatació tèrmica de l'aigua quan augmenta la temperatura. Aquesta dilatació té una gran incertesa, atès que costa de saber a quina fondària del mar arribarà l'augment de temperatura en tan sols 100 anys. La segona causa en importància, pel que fa a l'augment del nivell de mar, és la fosa dels gels que es troben sobre terra ferma (és a dir, les geleres de l'Antàrtida i Groenlàndia i les de diverses zones muntanyoses). Curiosament, però, sembla força ben establert que el gel antàrtic no contribuirà positivament a aquest augment del nivell del mar, ja que els models climàtics preveuen un increment en l'acumulació de gel sobre l'Antàrtida. Finalment, també cal recordar que la fosa del gel marí (n'hi ha importants acumulacions tant a l'Àrtic com al voltant del continent Antàrtic) no contribueix a incrementar el nivell del mar.

A6.2.3. Canvis en la variabilitat climàtica

Si els canvis previstos en els valors mitjans de les variables s'han de prendre amb una certa precaució, ateses les incerteses associades, amb molta més precaució s'han de considerar les previsions sobre els canvis en la variabilitat climàtica (entenent aquesta com a variabilitat en el temps). No obstant això, l'informe de l'IPCC recull algunes de les prediccions en aquest sen-

tit. Les prediccions es centren en diverses escales (diària, estacional, anual, etc.) i sobretot en fenòmens ben coneguts i de gran escala com ara *El Niño* o l'oscil·lació de l'Atlàntic Nord (NAO). Pel que fa al primer fenomen, diversos models indiquen que les condicions d'*El Niño* seran més habituals al Pacífic, mentre que la seva variabilitat tendirà a disminuir. En canvi, pel que fa a l'índex NAO hi ha poc acord entre els diversos resultats publicats, tot i que en general, semblen mostrar un lleuger augment d'aquest índex.

Pel que fa a escales temporals més curtes, hi ha un acord força general en què l'oscil·lació tèrmica diària disminuirà com a resultat d'un augment més gran de les temperatures mínimes nocturnes que de les màximes diürnes. També hi ha acord respecte a una disminució de la variabilitat diària de les temperatures hivernals i un augment d'aquesta variabilitat a l'estiu, sempre a l'hemisferi nord. Diversos estudis mostren també una disminució dels dies amb precipitació, malgrat el ja esmentat augment mitjà de la precipitació a escala global.

A6.2.4. Canvis en els esdeveniments extrems

Tal i com també fa l'informe IPCC 2001, a continuació es presenta una taula on es presenten els possibles canvis en la freqüència de diversos esdeveniments extrems a escala global (taula A6.2). Els esdeveniments extrems són aquelles situacions meteorològiques o climàtiques que tenen un impacte més alt, tant socio-econòmic com ambiental. Hi ha grans incerteses sobre els canvis en altres esdeveniments extrems que no apareixen en la taula, tot i que sovint preocupen tant o més que els canvis ben establerts del clima mitjà. Un d'aquests esdeveniments, que pot augmentar la seva freqüència en alguns llocs del món, són les inundacions de zones costaneres que es produeixen en casos de tempestes fortes. Aquest augment s'associa a l'augment del nivell del mar.

Projeccions futures sobre el clima a Catalunya Josep Calbó Angrill

Fenomen que canvia	Confiança en els canvis observats	Confiança en els canvis projectats durant el segle XXI
Temperatures màximes més altes i més dies calorosos sobre totes les àrees continentals.	Versemblant (66-90% de certesa)	Molt versemblant (90-99% de certesa)
Temperatures mínimes més altes, menys dies freds i dies molt freds a totes les zones continentals.	Molt versemblant	Molt versemblant
Oscil·lació diària de temperatures reduïda a moltes àrees continentals.	Molt versemblant	Molt versemblant
Augment de l'índex de xafigor (un índex que combina la temperatura i la humitat i que estima el nivell de manca de confort de les persones) a les àrees continentals.	Versemblant, a moltes àrees	Molt versemblant, a moltes àrees
Més situacions de pluges intenses	Versemblant, sobre àrees de latituds mitjanes i altes de l'hemisferi nord	Molt versemblant, a moltes àrees
Augment de l'evaporació durant l'estiu als continents, i del risc associat de sequeres.	Versemblant, a algunes àrees	Versemblant, sobre moltes àrees interiors dels continents a latituds mitjanes
Augment de les intensitats màximes dels vents en ciclons tropicals.	No s'ha observat de moment.	Versemblant en algunes àrees
Augment de les precipitacions mitjanes i màximes en ciclons tropicals.	Dades insuficients per a l'avaluació	Versemblant en algunes àrees

Taula A6.2. Estimacions de la confiança en les observacions i les projeccions de canvis en alguns esdeveniments extrems. Les observacions, els models i, també, la versemblança des del punt de vista de la física són les bases que permeten establir aquests nivells de confiança.

Font: elaboració pròpia a partir de la taula 9-6 de l'informe IPCC 2001 (Houghton et al., 2001).

A6.3. Projeccions a escala regional (per a Catalunya)

A6.3.1. Mètodes de simulació a escala regional

Actualment encara és extremadament difícil fer prediccions climàtiques per a una zona geogràfica tan petita com Catalunya. En efecte, el nostre país té una superfície lleugerament superior als 30.000 km², la qual cosa implica que les diferències màximes de latitud i longitud són de l'ordre d'uns 3 graus. Cal tenir present, en aquest sentit, que els models AOGCM amb una resolució més elevada emprats en el darrer informe de l'IPCC tenen resolucions de, precisament, 2,5° (tant de longitud com de latitud). Això vol dir, doncs, que les previsions climàtiques sobre Catalunya corresponen als resultats d'una sola cel·la d'un model climàtic típic.

Com ja ha quedat explicat més amunt, els resultats dels models climàtics són tant més bons com més amitjanats (en el temps i/o en l'espai) els considerem. En realitat, els valors que un model AOGCM obté per a una cel·la concreta tenen ben poca significació. En efecte, si s'efectua el procés de simulació per conjunts (*ensemble*) amb un sol model i es miren els resultats d'una cel·la, la relació senyal-soroll tindrà un valor molt més petit que el que tindrà per a una zona més àmplia, o lògicament, que el que tindrà per tot el globus terraquí. El mateix passa, encara que molt més exagerat, si s'analitza la relació senyal-soroll obtinguda en un procés de simulació conjunta amb diversos models. Hom ha estimat que, amb una regionalització de la superfície continental de la Terra en 16 parts (cadascuna de les quals tindria aproximadament 1.500 km de radi, és a dir, una superfície

de 7 milions de km²), la relació senyal-soroll disminueix en un factor de 4 (Gerald North, Universitat de Texas A&M, comunicació personal).

De fet, aquestes dificultats de què estem parlant són inherents a la pròpia definició del clima, abans de parlar del seu canvi o de la predicció del seu canvi. Per posar un exemple, es pot imaginar que es disposa de sèries meteorològiques temporals de 100 estacions repartides correctament (des del punt de vista de representativitat estadística) sobre el continent europeu. Amb aquestes 100 sèries es pot determinar amb força encert la temperatura mitjana anual d'Europa. També es pot imaginar que, d'aquestes sèries, s'utilitzen les que corresponen a la Península Ibèrica (n'hi podrien tocar 5 o 6) per descriure el clima de la Península. Ja es veu que el valor que s'obtéindrà serà molt més dubtós que el que s'ha obtingut per Europa.

Ara es pot arribar a imaginar que es vol obtenir el clima de Catalunya. Amb una mica de sort, entre les 100 sèries n'hi haurà una que correspondrà a una estació del territori català. La seva significació, però, serà mínima (cal pensar que passaria si l'estació estigués situada a la Vall d'Aran, a Lleida o al delta de l'Ebre: el clima que ens indicarien per a Catalunya seria totalment diferent en cada cas). És a dir, unes dades (la sèrie temporal de l'estació ubicada a Catalunya) que tenen significació a gran escala (Europa) són totalment insuficients per descriure el clima d'una regió petita (Catalunya).

Totes aquestes dificultats es reflecteixen clarament quan es busca informació sobre el canvi climàtic a escala regional. D'una banda, aquesta informació és molt escassa. D'altra banda, les regions definides en aquells estudis que en parlen, acostumen a ser regions molt més grans. Per exemple, en l'anàlisi regional que efectua l'informe IPCC, que es detalla a la propera secció, la regió on s'ubica Catalunya és la regió mediterrània, és a dir, l'àrea compresa entre 30°N i 50° N i

10°W i 40°E (uns 10 milions de km², 300 vegades la superfície de Catalunya).

Malgrat tot això, atès l'interès social i econòmic (i per tant, polític) que tenen les prediccions o projeccions del canvi climàtic a escala regional, s'han desenvolupat metodologies per a efectuar aquestes projeccions (aquest és un àmbit de recerca molt actiu). Aquestes metodologies es poden encabir en tres grans línies:

- a) L'anàlisi acurada dels resultats dels models AOGCM estàndard.
- b) L'ús de models AOGCM o AGCM d'alta resolució o de tècniques d'anivament (*nesting*) de models regionals (RCM, *regional climate models*).
- c) Les tècniques analítiques per obtenir resultats d'escala més reduïda a partir dels resultats dels models globals (*downscaling*).

Una possibilitat, doncs, consisteix en utilitzar directament els resultats dels models globals AOGCM, analitzant la informació a l'escala més petita possible (és a dir, a la d'una cel·la del model que, com ja ha quedat dit, cobreix de l'ordre de 60.000 km²). Els avantatges d'aquesta metodologia són, per una banda, que els resultats ja existeixen i es troben força a l'abast. Per altra banda, el fet de no aplicar cap modificació a les dades assegura la seva consistència física. Els inconvenients principalment vénen de la baixa resolució i, per tant, de la limitació que això significa en la predicció de fenòmens d'escala inferior a la de diverses cel·les, en particular en zones d'orografia complexa o d'interaccions entre terra i mar.

La segona metodologia parteix del fet que per obtenir resultats d'escala regional no és necessari realitzar simulacions molt llargues del sistema climàtic complet. És a dir, s'assumeix que es poden obtenir resultats adequats per projeccions temporals a 50 o 100 anys vista, amb models

només atmosfèrics (AGCM), incorporant la temperatura de la superfície del mar, l'extensió del gel o el forçament radiatiu que resulta de models acoblats de baixa resolució. En aquestes condicions, és possible efectuar simulacions amb AGCM amb una resolució de 100 km o, fins i tot, a 50 km si només s'escull aquesta resolució per a una zona concreta. Aquesta metodologia també té inconvenients. El principal, és l'alta demanda de recursos de càlcul. Però els inconvenients més profunds vénen d'una banda, de l'ús per resolucions altes de parametritzacions que han estat derivades i comprovades en resolucions baixes i, de l'altra, del fet de considerar només les retroaccions generades en la zona que es tracta amb alta resolució, menyspreant la possibilitat que en altres àrees, si fossin tractades amb la mateixa alta resolució, es poguessin generar altres retroaccions. Per tant, a la pràctica aquesta metodologia és poc emprada.

En realitat, hi ha una opció més atractiva per realitzar simulacions d'alta resolució espacial. Consisteix en l'ús dels anomenats models climàtics regionals (RCM). Atès que existeixen models meteorològics de mesoscala, regionals o d'àrea limitada, que s'apliquen per a obtenir prediccions meteorològiques detallades, es poden emprar versions climàtiques d'aquests. Es tracta de forçar (és a dir, establir les condicions de contorn) del model regional amb els resultats d'un model d'escala global AOGCM. Aquesta tècnica s'anomena d'aniuament (*nesting*) i de moment només s'ha utilitzat en una direcció (*one-way*), és a dir, el model global proporciona informació al regional, però els resultats d'aquest no influeixen els del model global. Amb models RCM es pot treballar amb resolucions de l'ordre de 20 km, amb la qual cosa molts fenòmens locals (com ara efectes orogràfics) es poden representar físicament. Les principals limitacions (a part dels alts recursos de càlcul necessaris) són les incerteses que provenen del model global i la ja esmentada manca d'interacció en les dues direccions. Aquestes limitacions i altres problemes, com ara el de la durada de la

simulació, la validesa dels models físics (parametritzacions) o les condicions de contorn laterals són revisats a bastament a Giorgi and Mearns (1999).

La tercera opció metodològica per a l'obtenció de projeccions regionals de canvi climàtic es basa en mètodes estadístics (*statistical downscaling*). La base conceptual és senzilla: s'assumeix que el clima regional és el resultat de la influència de factors locals sobre l'estat existent a gran escala. Per tant, es tracta de buscar relacions estadístiques entre variables d'escala gran (que seran els predictors) i les variables climàtiques d'interès en la regió (els predictands). A Paeth et al. (2003), per exemple, s'analitza la importància de diversos índex descriptius de situacions sinòptiques en les prediccions de canvi climàtic regional. Un exemple seria buscar relacions estadístiques entre l'índex NAO (oscil·lació de l'Atlàntic Nord) i la precipitació a Catalunya. Es poden distingir dues possibilitats dins d'aquesta tècnica. Per una banda, hi ha les relacions purament empíriques, que poden ser tan simples com correlacions o tan complexes com les determinades per xarxes neuronals. Per altra banda, hi ha les relacions basades en l'anàlisi dinàmica dels patrons meteorològics i climàtics. Per exemple, es pot emprar un model de mesoscala per veure com respon la meteorologia a nivell local en diverses situacions atmosfèriques globals. La principal limitació d'aquestes tècniques prové del fet que no es pot assegurar que les relacions estadístiques vàlides actualment (del clima present) es mantinguin invariables per a un clima futur diferent.

A6.3.2. Resposta regional del clima

L'informe de l'IPCC de l'any 2001 conté un apartat on s'analitzen les projeccions de diversos models climàtics AOGCM a escala regional (en les grans regions comentades més amunt, Catalunya pertany a la regió Mediterrània). Més concretament, s'ha estudiat la consistència entre els resultats obtinguts amb les integracions de 9 models emprant dos escenaris SRES diferents

(els escenaris A2 i B2). Els resultats obtinguts, doncs, es poden considerar força robustos, ja que només es dona per bona una tendència si hi estan d'acord almenys 7 dels 9 models. Els models emprats han estat els CGCM2, CSIRO Mk2, CSM 1.3, ECHAM4/OPYC, GFDL_R30_c, HadCM3, MRI2, CCSR/NIES2, DOE PCM (tots ells apareixen descrits a la taula A6.1). Els resultats, que es presenten a la figura A6.8 –pel que fa a temperatures– i a la figura A6.9 –pel que fa a precipitació– corresponen a les diferències entre la predicció pel període 2071-2100 i el clima actual (1961-1990). El mateix informe avisa que aquests resultats són preliminars, però en tot cas no s'allunyen excessivament de resultats semblants, però més robustos encara, produïts pels mateixos models en escenaris IS92.

Pel que fa a la regió Mediterrània, la figura A6.8 indica que tant en l'escenari A2 com en el B2 cal esperar augments de temperatura molt més alts que la mitjana global durant l'estiu. Cal recordar que la mitjana global d'escalfament (per a tot l'any) dels diversos models està entre 1,2 i 4,5°C en l'escenari A2 i entre 0,9 i 3,4°C en el B2, la qual cosa vol dir que el 40% més voldria dir entre 1,7 i 6,3°C en A2 i entre 1,3 i 4,7°C en B2. Per a l'hivern, l'escalfament previst en aquesta regió també és superior a la mitjana global. Pel que fa a la precipitació, els diversos models estan d'acord que aquesta no canviarà significativament durant l'hivern en cap dels dos escenaris, mentre que disminuirà molt clarament en l'escenari A2 durant l'estiu (en l'escenari B2 els models no estan d'acord en la tendència). Cal re-

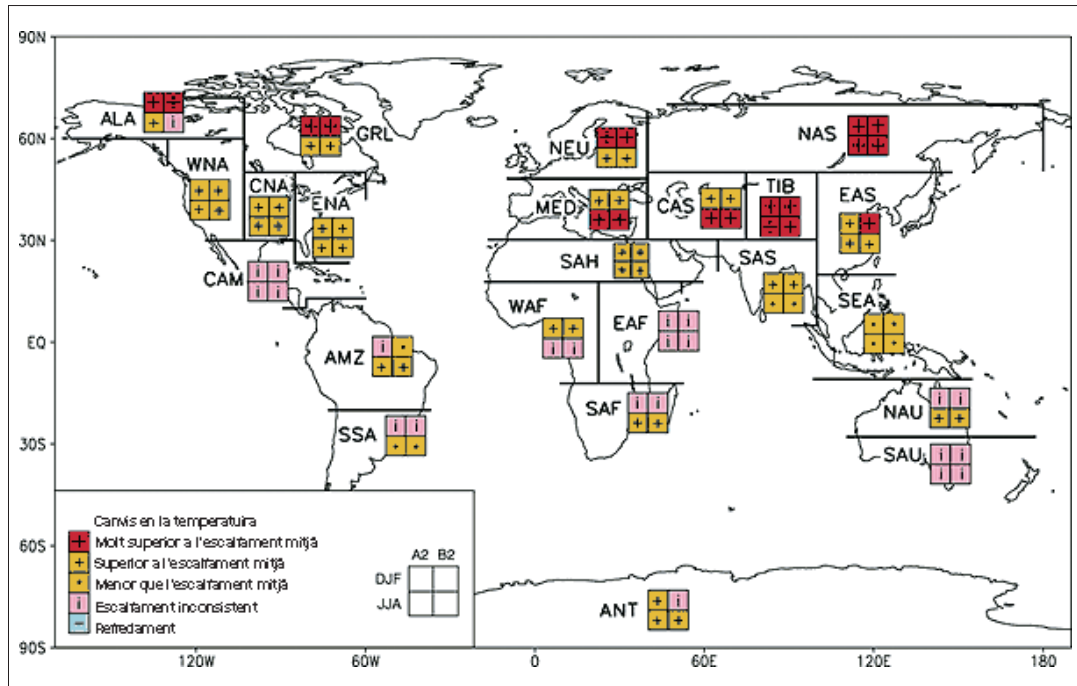


Figura A6.8. Anàlisi de l'escalfament regional relatiu (és a dir, relatiu a l'escalfament global predit per cada model). L'etiqueta Molt superior a l'escalfament mitjà és per a regions on l'escalfament és un 40% superior al global. Superior a l'escalfament mitjà vol dir un escalfament superior al global. Menor que l'escalfament mitjà correspon a un escalfament inferior al global. Escalfament inconsistent vol dir que els diversos models no tenen una resposta majoritàriament comuna. Hi ha una etiqueta per a cadascun dels dos escenaris (A2 i B2) i per als períodes d'hivern (DJF) i d'estiu (JJA) a l'hemisferi nord.

Font: Houghton et al., 2001.

Projeccions futures sobre el clima a Catalunya Josep Calbó Angrill

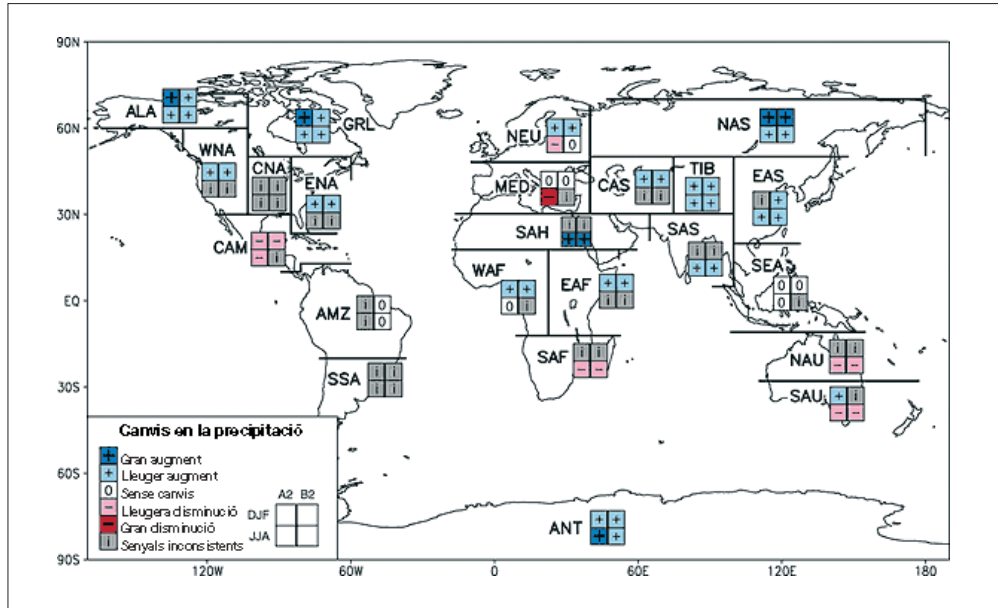


Figura A6.9. Anàlisi del canvi en les precipitacions a escala regional. L'etiqueta *Gran augment* indica regions en les quals es preveu un augment de precipitació superior al 20%. *Lleuger augment* indica increments entre el 5 i el 20%. *Sense canvis*, que l'acord s'assoleix per uns canvis d'entre un -5 i un +5%. *Lleugera disminució*, quan la predicció és de disminució de la precipitació d'entre un 5 i un 20%. *Gran disminució* és per a regions on es preveuen disminucions superiors al 20%. *Senyals inconsistents*, quan els models mostren tendències ben diferents.

Font: Houghton et al., 2001.

cordar que les estacions analitzades (estiu i hivern) no són en general les més plujoses a Catalunya o, en tot cas, ho són només en algunes àrees. També cal recordar, com fa el mateix informe de l'IPCC, que aquestes anàlisis regionals no han de ser necessàriament directament aplicables a àrees més petites dins de la regió. Probablement, això és especialment cert en el cas de la precipitació a Catalunya. Per altra banda, el mateix informe comenta altres anàlisis realitzades sobre la resposta regional (a Europa) dels models de circulació global: una revisió dels resultats de diversos models arriba a la conclusió que el Sud d'Europa serà més sec.

Seguint amb l'anàlisi dels resultats dels models globals, un treball interessant és el desenvolupat per la *Climate Research Unit* de la Universitat de East Anglia, al Regne Unit, per encàrrec de la organització *WWF* (Hulme i Sheard, 1999). En aquest treball s'analitzen els resultats de les si-

mulacions de 10 models diferents, que s'han integrat amb els forçaments dels 4 escenaris principals del SRES i considerant sensibilitats climàtiques baixa, moderada o alta. No tots els resultats es donen en la publicació esmentada, però sí alguns de prou interessants, els quals es reproduïxen a continuació.

Pel que fa a la temperatura, la figura A6.10 mostra el seu augment sobre el territori peninsular, depenent de l'escenari i del període temporal considerat. Cal fixar-se en el fet que els valors numèrics es donen per a cadascuna de les 8 cel·les que cobreixen la península (Catalunya queda una mica fora, però els resultats de les cel·les immediatament contigües semblen aplicables). Per al període 2065-2095 (vegeu l'etiqueta de 2080) i en l'escenari A1 amb sensibilitat mitjana (A1-med) es poden esperar augments de temperatura mitjana anual de 3,1°C. Pel que fa a la precipitació, i en aquesta situació moderada

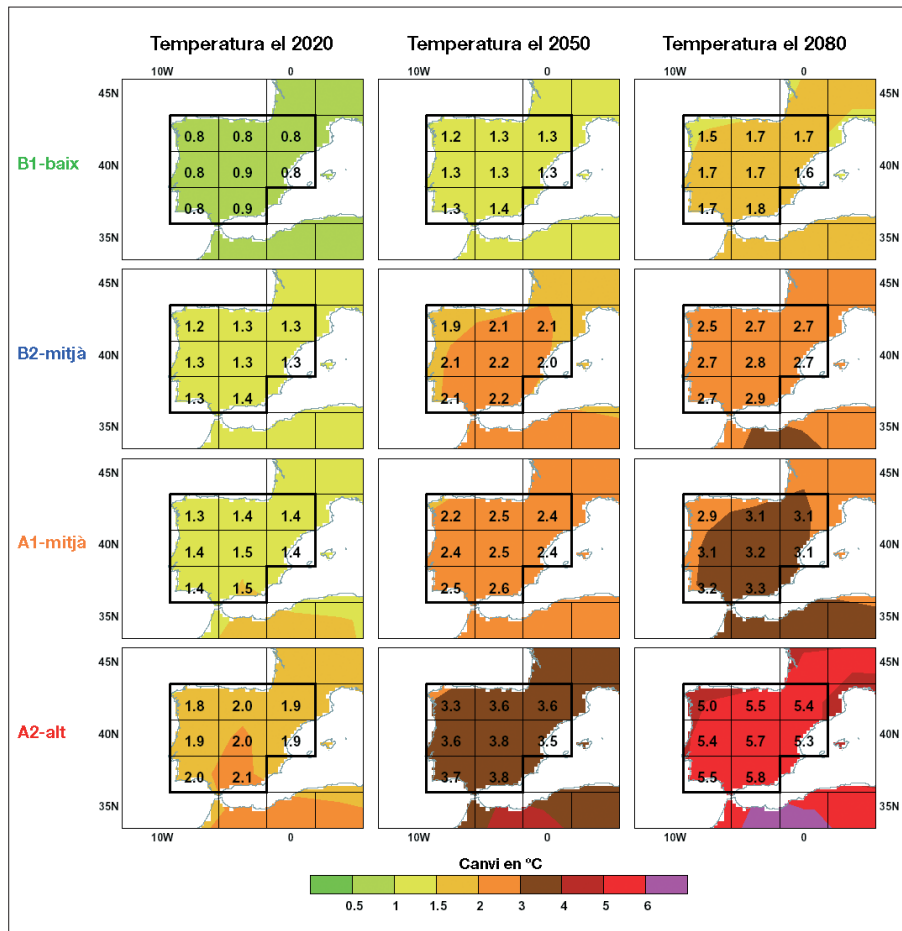


Figura A6.10. Canvi en la temperatura anual mitjana (°C respecte de la mitjana de 1961-90) per a períodes de 30 anys centrats en les dècades de 2020, 2050 i 2080, en els quatre escenaris. Els canvis només es mostren quan són prou grans comparats amb la variabilitat natural de la temperatura en escales de 30 anys.

Font: Hulme i Sheard (1999).

(escenari A1 i sensibilitat mitjana), la figura A6.11 mostra com a Catalunya la precipitació augmentarà a l'hivern i disminuirà a l'estiu, així com probablement a les altres dues estacions. Considerant els valors de les cel·les immediatament contigües, i per la trentena de finals de segle XXI, la precipitació podria augmentar un 10% a l'hivern, disminuir un 20% a l'estiu i un 8% a la tardor, mentre que no hi hauria canvis significatius a la primavera. En tot cas, també s'ha de destacar que la disminució d'estiu i tardor seria força inferior a la que experimentaria la resta de la Península.

En la línia d'analitzar regionalment els resultats de models globals, un treball recent (Giorgi and Mearns, 2003) introdueix el que anomenen *Reliability Ensemble Averaging* per establir unes probabilitats de canvis futurs en el clima a escala regional. En essència, el que es tracta és d'assignar a cada model emprat una fiabilitat diferent, basant-se en la capacitat del model de reproduir el clima present. D'aquesta manera, la probabilitat que el canvi de temperatura, per exemple, sigui superior a un llindar determinat es troba a partir de la col·lectivitat de simulacions disponibles (que pot incloure escenaris diferents), però pesant de for-

Projeccions futures sobre el clima a Catalunya Josep Calbó Angrill

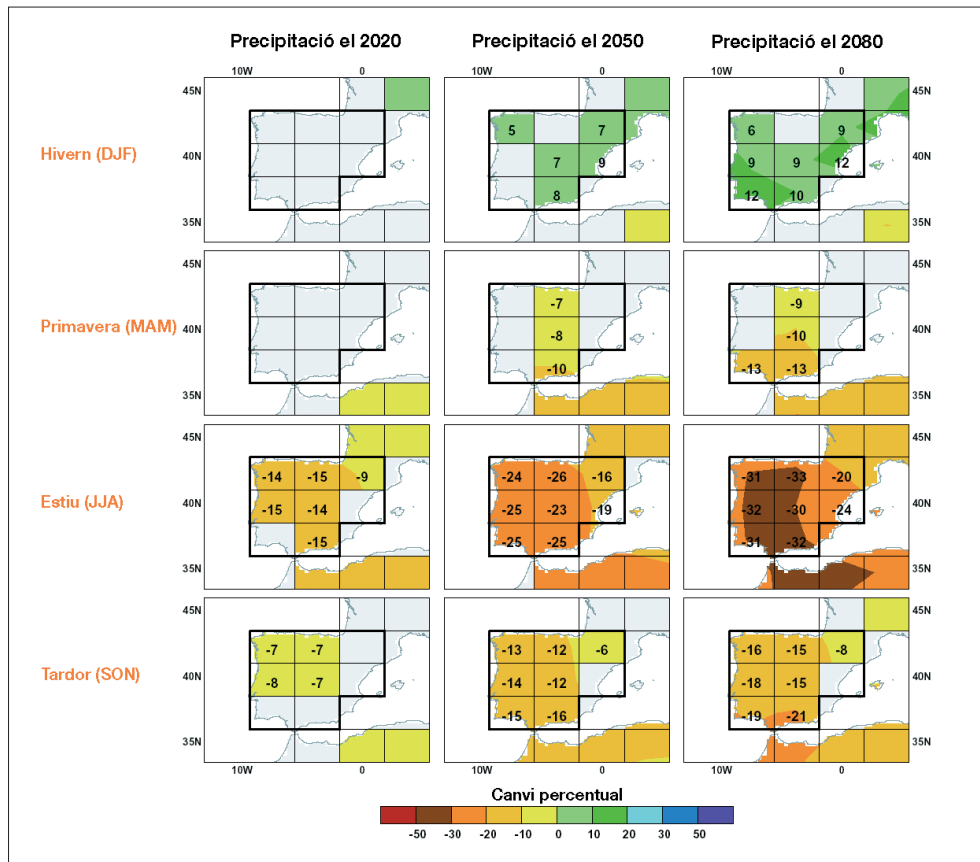


Figura A6.11. Canvis en la precipitació estacional mitjana (expressats en percentatge respecte de la mitjana de 1961-90) per períodes de 30 anys centrats en les dècades dels anys 2020, 2050 i 2080, i per l'escenari SRES A1 i els models de sensibilitat mitjana. Els nombres indiquen els canvis en cada cel·la, només quan aquests són destacats respecte la variabilitat natural.

Font: Hulme & Sheard (1999).

ma diferent (no exempta d'una certa subjectivitat) cadascun dels elements de la col·lectivitat. Amb aquest procediment els autors troben que és molt probable que, a la regió Mediterrània, a finals del segle XXI la temperatura sigui més de 2°C més alta que l'actual (probabilitat 96% a l'hivern i 99% a l'estiu). De fet, a l'estiu hi ha quasi un 50% de probabilitat que la temperatura augmenti més de 3,5°C. Pel que fa a la precipitació, la probabilitat que es modifiqui en $\pm 10\%$ a l'hivern és molt petita i, en qualsevol cas, és més probable que augmenti en una proporció molt baixa. En canvi, a l'estiu és altament probable (80%) que la precipitació disminueixi a la regió més d'un 10%.

Pel que fa a estudis regionals desenvolupats amb les altres metodologies esmentades (*nesting*, RCM, *downscaling*) i, concretament, per a l'àrea que afecta a Catalunya, l'informe de l'IPCC no aprofundeix en el resultat de cap d'ells. Sí que n'esmenta alguns, però més per comentar les limitacions que presenten o el fet que són estudis molt preliminars que per presentar-ne els resultats. Més específicament, hi ha una llista de models RCM que s'han aplicat arreu del món. Entre ells, només un (Gallardo et al., 2001) sembla que pot ser interessant per a l'àrea d'estudi emprada (la Península Ibèrica), tot i que també n'hi ha d'altres que s'han centrat en el territori europeu. La

resolució espacial d'aquestes simulacions amb RCM és de l'ordre de 50-100 km, però les integracions no s'allarguen més de 20 anys en cap cas. També hi ha una llista equivalent pel que fa a anàlisis efectuades mitjançant mètodes estadístics empírics o dinàmics; aquesta llista inclou fins a 7 referències a treballs que basen el seu interès en la Península Ibèrica o en l'Estat espanyol. Alguns d'aquests treballs, així com també altres treballs dels que l'informe IPPC no fa referència, seran comentats a continuació.

Per començar cal fer un comentari sobre un treball força pioner, publicat per Cubasch et al. (1996). En aquesta publicació es comparen tres dels mètodes esmentats (interpolació directa dels resultats de models globals, les simulacions d'alta resolució espacial però de curta durada temporal i el mètode estadístic) utilitzant com a àrea de referència la del Mediterrani (tal i com la defineix l'IPCC) i més concretament, en el tercer mètode, la Península Ibèrica. El primer dels mètodes dona, segons els autors, massa poca resolució local, mentre que el segon requereix molta potència de càlcul. Pel que fa al tercer, necessita sèries de dades prou llargues i bones com per poder efectuar-ne l'estadística. El model que els autors utilitzen amb alta resolució és el model ECHAM, que proven amb resolucions T42 i T106 (és a dir, el doble i 5 vegades més que la versió utilitzada normalment T21). S'ha de destacar que, quan es comparen els resultats de canvis de temperatura i de precipitació sobre l'àrea d'estudi (el Mediterrani) segons les tres resolucions, a vegades s'observen diferències tan grans que les correlacions resulten ser negatives. En qualsevol cas, però, per a Catalunya i amb el temps de duplicació del CO₂, les tres resolucions indiquen augments de temperatura més petits a l'hivern (al voltant d'1°C) i més grans a l'estiu (entre 1 i 4°C segons la simulació de menys i de més resolució respectivament). Els canvis en la precipitació són, en tots els casos, molt petits.

En el mateix treball es presenta una anàlisi basada en *downscaling* estadístic, que s'aplica a la precipi-

ció hivernal d'11 estacions espanyoles, incloent la de Barcelona. En primer lloc s'estableixen relacions empíriques entre les sèries de dades i els resultats a gran escala d'un model (ECHAM1/LSG), i després les mateixes relacions s'utilitzen per predir els canvis en la precipitació, quan s'apliquen a la sortida del mateix model en el cas de duplicació de CO₂. El resultat és un augment de la precipitació hivernal a Barcelona. Evidentment, aquests resultats tenen una validesa força limitada.

També cal destacar el treball de Gallardo et al. (2001), que utilitza el model PROMES, un model inicialment pensat per a simulacions meteorològiques de mesoscala i que els autors van estendre a les simulacions climàtiques. El model va ser executat en dues simulacions, una de control i l'altra corresponent a l'escenari de clima canviant. En els dos casos es va anuar el model RCM amb el model global HadCM2, que es va executar, en el cas de l'escenari de clima canviant, en les condicions corresponents a l'escenari IS92a de l'informe de l'IPCC de l'any 1995. El període simulat pel RCM (que es va executar amb una resolució espacial de 50 km) va ser de 10 anys, entre 2040 i 2049, que correspon aproximadament al període en què la concentració de CO₂ assoleix el doble del valor preindustrial segons l'escenari d'emissions emprat. A continuació es comentaran les diferències més significatives entre la simulació de l'escenari futur i la de control. La temperatura augmenta a la Península Ibèrica, de mitjana, 2,8°C a la primavera i 3,9°C a la tardor. Segons els mapes que es presenten, a Catalunya aquests augments podrien ser en general una mica superiors a la mitjana peninsular, sobretot a les comarques interiors. Una raó important per explicar l'augment de temperatura resulta ser la disminució de la nuvolositat. La precipitació experimenta canvis, que en mitjana per a tota la península són disminucions de 0,4 mm per dia a l'estiu i augments de 0,7 mm per dia a l'hivern. Observant els mapes corresponents, el tret més allunyat de la mitjana peninsular és la disminució de la precipitació hivernal en les comarques catalanes nord-occidentals.

Un dels treballs basats en disminució d'escala mitjançant tècniques estadístiques (*downscaling*) és el que van desenvolupar per a la *Asociación para la Investigación del Clima* (AIC) diversos investigadors de la *Fundación para la Investigación del Clima* (FIC, una entitat independent sense ànim de lucre) i del *Instituto Nacional de Meteorología* (INM). La metodologia i els resultats d'aquest treball (Borén et al., 1999; Ribalaygua et al., 1999) es descriuen resumidament a continuació. El mètode emprat conté dos passos, que els autors anomenen analògic i de regressió respectivament. En el primer pas, s'agrupen els dies més semblants entre ells (des del punt de vista de la situació atmosfèrica de baixa resolució o gran escala) per determinar unes característiques comunes de la situació atmosfèrica amb alta resolució. En el segon pas, es treballa diferent segons es tracti de temperatures (els autors es plantegen de predir les temperatures màximes i mínimes) o de precipitació. La precipitació a un lloc es troba com a mitjana de les precipitacions mesurades en tots els dies que formen part d'un mateix grup. Les temperatures es troben mitjançant regressió lineal múltiple, utilitzant diversos predictors que representen els factors meteorològics, estacionals i d'inèrcia tèrmica del terreny. La validació del mètode la fan els autors amb dades del període 1961-1994, que consideren que és prou llarg com per garantir que les relacions trobades siguin vàlides per a un clima lleugerament diferent que es pot donar en el futur. Aquesta validació els indica que, excepte per a la precipitació durant la tardor, el mètode és vàlid per tal d'emprar la sortida d'un model AOGCM de baixa resolució per fer estimacions d'alta resolució sobre el territori espanyol. Concretament, els autors utilitzen els resultats dels experiments HadCM2SUL (és a dir, el model HadCM2 amb forçament d'un 1% d'augment de CO₂ i aerosols de sofre incorporats) com a dades d'entrada al seu mètode. Amb això, arriben a obtenir els resultats que es presenten a la figura A6.12.

Aquests resultats mostren, pel que fa a la precipitació i a Catalunya, que la mitjana anual d'a-

questa gairebé no hauria de canviar en el futur, ni en l'horitzó de mitjan de segle ni en el de finals. En tot cas, els petits canvis anirien en el sentit d'augmentar la precipitació. Això seria el resultat d'augment molt significatiu de la precipitació durant l'hivern, canvis menors a la primavera i estiu, i disminucions de la precipitació a la tardor. Pel que fa a les temperatures, tant les màximes com les mínimes, tendeixen a augmentar en totes les estacions. Les mínimes ho fan uniformement i amb valors mitjans anuals a l'entorn d'1°C el 2050 i de 2°C el 2100. L'augment de les màximes és més gran i més heterogeni: augmenten més a l'interior que a la costa (aquí, durant l'estiu, es nota l'efecte moderador de les brises marines). En tot cas, en l'horitzó de finals de segle XXI hi ha augments de més de 4°C a l'estiu i de més de 2°C a l'hivern. Malauradament, els mateixos autors adverteixen de la validesa limitada dels resultats, ja que l'experiment global de base (HadCM2SUL) no és capaç de reproduir perfectament el clima actual (1961-1990) i, per tant, pot tenir desviacions importants en les projeccions futures.

Un altre exercici de *downscaling* que es preocupa de Catalunya (de fet, incideix sobre tota la costa mediterrània espanyola) és el de Sumner et al. (2003). Aquest treball se centra en els canvis experimentats per la precipitació, i el mètode es pot classificar com a estadístic-dinàmic ja que relaciona les configuracions atmosfèriques a 925 i 500 hPa amb les precipitacions diàries a què donen lloc. S'utilitza com a model de gran escala l'ECHAM-OPYC3 (amb el forçament corresponent a l'1% d'augment del CO₂), els resultats del qual per al període present 1971-1990 són emprats com a base per establir els patrons atmosfèrics més probables per a un període futur (2080-2099). Com que els patrons es poden vincular a unes precipitacions, es pot fer l'estimació d'aquestes. La metodologia s'avalua i calibra en base a les anàlisis del Centre Europeu per a Predicció a Mitjà Termini (ECMWF) i a dades del període 1984-1993. Sembla que les situacions que resulten més difícils de reproduir amb la metodologia

El canvi climàtic a Catalunya Projeccions futures sobre el clima a Catalunya

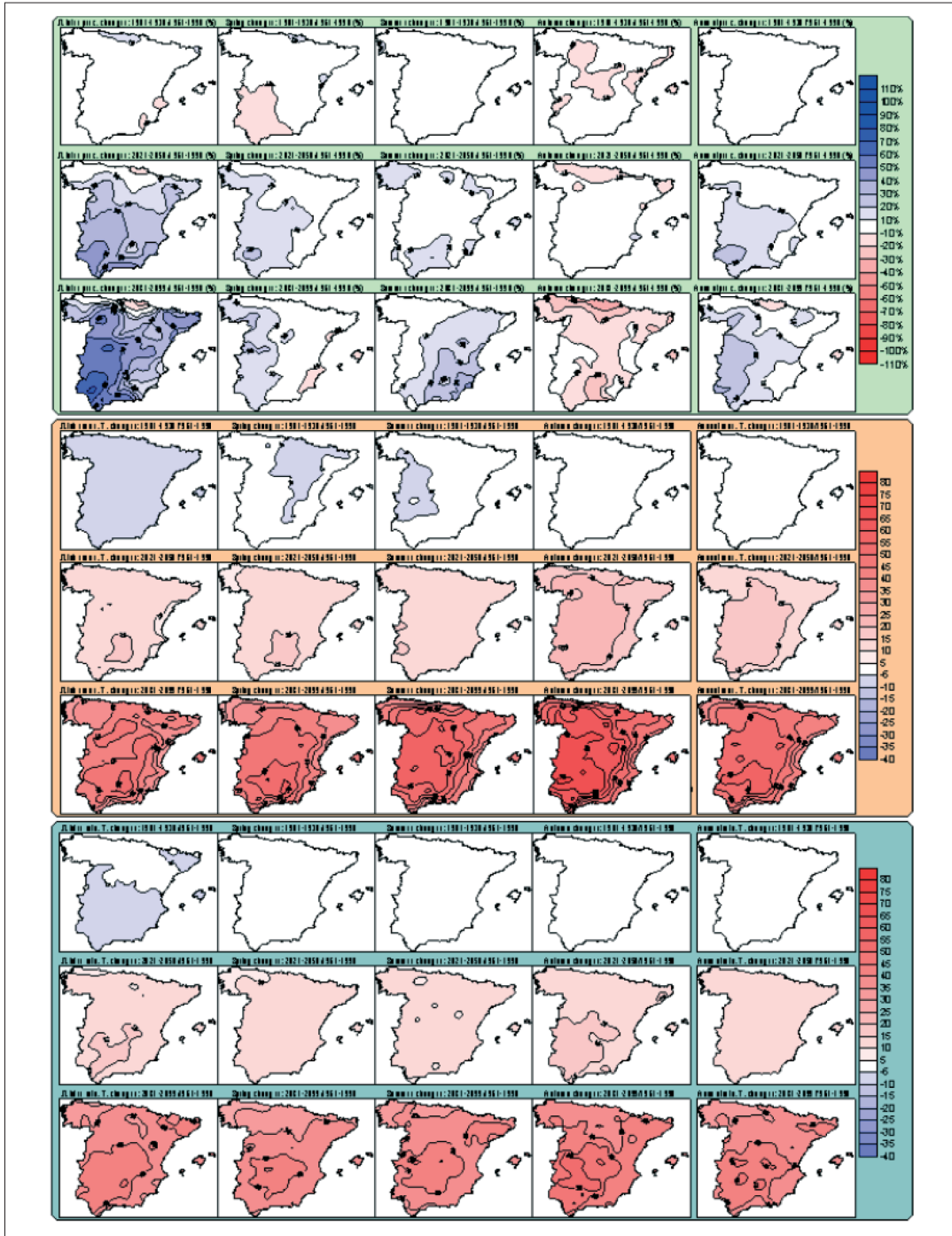


Figura A6.12. Canvis en la precipitació, les temperatures màximes i les temperatures mínimes a l'Estat espanyol. Per a cada variable hi ha tres files de mapes. La fila superior es la diferència entre el període 1901-1930 i el període de referència (1961-1990); la del mig es la diferència entre 2021-2050 i la referència; i la inferior és la diferència entre 2081-2099 i la referència. En cada fila hi ha cinc mapes, un per cada estació (hivern, primavera, estiu, tardor) i de la mitjana anual. Les diferències de precipitació es mostren en %, les de temperatures, en dècimes de grau.
Font: Ribalaygua et al. (1999).

emprada són les de llevant. De nou, se suposa que les relacions actuals entre situacions sinòptiques i precipitació es mantindran invariables en el futur. Els resultats (figura A6.13) indiquen, en termes mitjans anuals, augments de la precipitació de fins al 8% al sud de Catalunya i disminucions de fins al 4% a la part nord-occidental (Vall d'Aran i comarques properes).

Hi ha altres treballs científics sobre la regionalització de les projeccions de canvi climàtic realitzades amb models globals. Per exemple, Jean P. Palutikof, amb diversos col·laboradors, té una sèrie de publicacions sobre mètodes de *downscaling* i aplicacions a la Península Ibèrica o a alguna part d'aquesta (vegeu per exemple, Goodess i Palutikof, 1998). Com els treballs apuntats anteriorment, aquests estan més centrats en la presentació de la validesa del mètode que no pas en la validesa dels resultats de l'aplicació.

Per altra banda, hi ha diverses publicacions, entre les que cal destacar les comunicacions de l'Estat espanyol al Conveni Marc de les Nacions Unides sobre Canvi Climàtic o molts documents a l'entorn del Pla Hidrològic Nacional, on es presenten o s'utilitzen escenaris futurs de clima a escala estatal, sense fer referència clara a les fonts científiques originals que avalen aquests escenaris. En les publicacions que se centren en els recursos hídrics, s'assumeixen escenaris d'augment moderat de la temperatura (1°C el 2030, 2,5°C el 2060) i reduccions petites (5%) de la precipitació (MIMAM, 2002). En aquesta línia, són destacables també diverses publicacions de F.J. Ayala-Carcedo, que sempre recalquen la importància de tenir en compte no només la variació de la precipitació sinó també de l'evapotranspiració abans d'estimar els canvis en l'aigua disponible (vegeu, per exemple, Ayala-Carcedo i Iglesias López, 2001). En aquest dar-

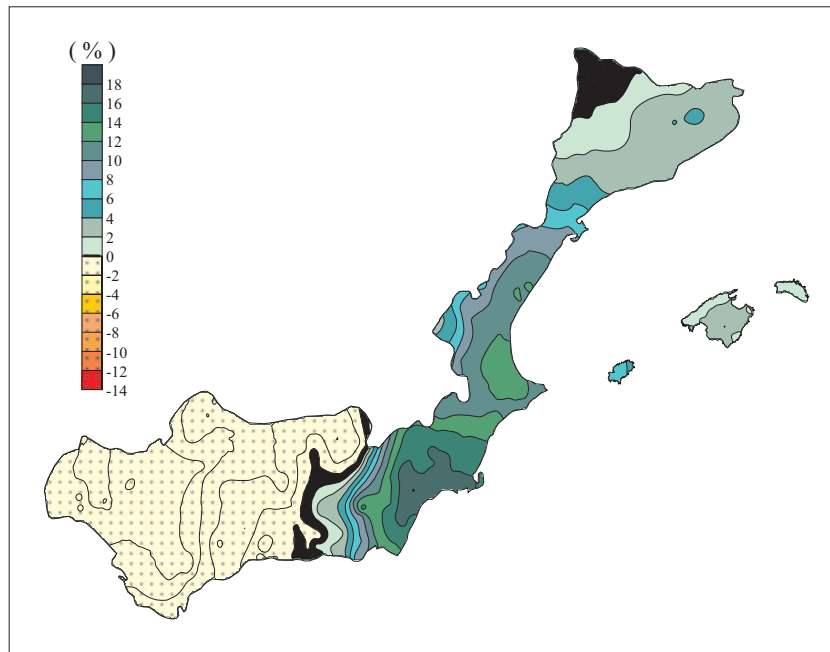


Figura A6.13. Estimació del canvi en la precipitació des de la dècada 1984-1993 a la 2090-2099, d'acord amb el treball de Sumner et al. (2003).

Font: extreta de la comunicació de S. Alonso a les jornades «Tradició i innovació en la gestió de l'aigua», Girona, gener de 2002, organitzades per l'Institut Joan Lluís Vives.

rer treball, i citant com a font un informe del *Instituto Nacional de Meteorologia*, en l'horitzó de l'any 2060 es presenten reduccions de les precipitacions del 6-7% en les conques hidrogràfiques que afecten el territori català.

A6.3.3. Canvis en la variabilitat i els esdeveniments extrems

Si els resultats sobre variabilitat i fenòmens extrems ja eren molt limitats en l'àmbit global, ho són més encara a escala regional. No obstant això, l'informe IPCC 2001 conté diverses referències a treballs que donen indicis sobre canvis en la variabilitat o els esdeveniments extrems. Per exemple, pel que fa a la temperatura, diversos treballs semblen indicar que la variabilitat diària tendeix a augmentar durant l'estiu i a disminuir durant l'hivern. Les mateixes tendències es poden esperar per a la variabilitat mensual i estacional, en particular al sud d'Europa. Sovint, els canvis previstos en la variabilitat de la temperatura són semblants encara que es dedueixin mitjançant models RCM.

Pel que fa a la precipitació, també es troben estudis que, especialment al sud d'Europa, indiquen una tendència a augmentar la variabilitat, tant a escala diària com mensual. Aquesta tendència a un increment de variabilitat motivada per un forçament radiatiu positiu es reflecteix en un augment en la intensitat i la freqüència de situacions de precipitacions molt intenses: alguns estudis indiquen que les precipitacions intenses corresponents a un període de retorn d'un any poden ser entre un 10% i un 25% més altes que les actuals. La variabilitat de la precipitació acostuma a incrementar-se encara més quan s'analitza en base als resultats d'un model regional RCM, i les diferències entre els models globals i regionals són particularment grans durant l'estiu. Curiosament, quan s'analitzen les precipitacions intenses (per exemple, superiors a 30 mm per dia) aquests augments no són tan alts com els que indiquen els models globals, tot i que els models regionals també indiquen, a Europa, augments en la probabilitat d'aquestes precipitacions.

A part d'aquests resultats tant limitats que es poden trobar a l'informe IPCC, s'han identificat pocs treballs més detallats, centrats en la regió mediterrània, que donin resultats sobre canvis en la variabilitat o els esdeveniments extrems. Alguns dels treballs ressenyats en la secció anterior fan referència indirecta a aquests canvis, però en general els seus autors no destaquen cap conclusió en aquest sentit. Una de les excepcions és el treball de Gallardo et al. (2001), que indica que la variabilitat interanual de les temperatures disminuirà a l'hivern i augmentarà, en canvi, a l'estiu. La variabilitat interanual de la precipitació també augmenta, sobretot durant la tardor i l'hivern. També a Cubasch et al. (1996) es fa alguna referència als canvis d'esdeveniments extrems, en concret les pluges intenses i els períodes de sequera. Aquests autors no troben canvis significatius, quan utilitzen el model ECHAM1 amb diferents resolucions, en la freqüència de pluges intenses, més enllà d'un lleuger augment a l'hivern. Pel que fa a períodes secs, sí que sembla manifestar-se un augment de la probabilitat de sequeres en totes les estacions. Cal recordar que aquests darrers resultats corresponen al conjunt de l'àrea mediterrània.

A6.4. Conclusions

1. La necessitat de prendre decisions polítiques en l'àmbit nacional i internacional per tal de fer front als problemes que es poden derivar d'un clima ràpidament canviant com a conseqüència de l'activitat humana, obliguen a millorar i reduir la incertesa de les previsions que es fan del clima del futur. En efecte, els que tenen la capacitat, oportunitat i responsabilitat de prendre decisions ho han de fer en base a les millors prediccions i més contrastades des del punt de vista científic; en cas contrari, es poden excusar en l'absència de prediccions fiables per no emprendre accions d'adaptació i/o mitigació dels efectes del canvi climàtic.
2. És ben acceptat per la comunitat científica internacional, representada, per exemple, al Grup Intergovernamental d'Experts sobre Canvi Cli-

màtic (IPCC), que les millors prediccions del clima del futur s'obtenen amb l'aplicació de models numèrics de simulació del clima, en particular dels models tridimensionals acoblats, anomenats AOGCM (Atmospheric Oceanic General Circulation Models). Aquests models han millorat diversos aspectes en els darrers anys. Per una banda, en general han augmentat la seva resolució espacial, amb la millora de la potència de càlcul dels ordinadors. Els models actuals acostumen a treballar amb resolucions de l'ordre de 2,5° de latitud i longitud. Per altra banda, han millorat les descripcions físiques dels diversos fenòmens, com ara la interacció oceà-atmosfera (molts dels models ja no requereixen ajustos artificials dels fluxos de calor i matèria) o altres fenòmens que s'han de parametritzar ja que presenten escales espacials característiques inferiors a les de la malla de treball. Els millors models emprats per l'IPCC, que no són més d'una vintena i s'estan executant en no més d'una desena de països diferents, acostumen a reproduir força bé el clima present i els canvis passats (del darrer segle), per la qual cosa els seus resultats pel que fa a les prediccions futures són cada cop més fiables.

3. Malgrat tot, encara existeixen incerteses, que es reflecteixen, per exemple, en el fet que diversos dels models AOGCM integrats amb el mateix forçament radiatiu (és a dir, amb el mateix augment de concentració de CO₂ i d'aerosols) donen resultats (prediccions) prou diferents. Un paràmetre que il·lustra les diferències entre models és la sensibilitat climàtica, que es pot definir com l'augment de temperatura que el model preveu en condicions d'equilibri, quan la concentració de CO₂ s'hagi duplicat. Hi ha tot un rang de sensibilitats al voltant de la que es considera una mitjana, que es troba entre els 2,5 i 3°C. Aquestes diferències entre models poden venir de les divergències de parametritzacions (núvols, convecció, etc.), de com consideren les diverses retroaccions (del gel, del vapor d'aigua, etc.), de si in-

corporen o no un tractament explícit dels intercanvis amb la superfície continental, de la biota, etc.

4. Per tal de donar previsions el màxim de fiables possible, l'IPCC opta per realitzar simulacions per conjunts o col·lectivitats: es tracta d'integrar diversos models en les mateixes condicions i donar com a resultat el rang de valors obtinguts pels diversos models, com a mesura de la incertesa.
5. Qualsevol projecció del clima futur té com a punt de partida una predicció pel que fa al creixement demogràfic, econòmic i a diversos aspectes d'aquest creixement (més igualitari o més divergent entre regions, intensiu en l'ús de combustibles fòssils o d'energies renovables, etc.). L'informe IPCC 2001 es basa en diversos escenaris de creixement que es corresponen a escenaris d'emissions de gasos i aerosols, generats per una comissió específica i recollits en l'informe SRES (*Special Report on Emission Scenarios*). De menys a més emissions acumulades de CO₂ fins l'any 2100, tenim com a escenaris principals (entre un conjunt de quasi 40 escenaris possibles) els anomenats B1, B2, A1 i A2.
6. Considerant doncs els diversos escenaris i els diversos models, l'augment de la temperatura mitjana de la Terra es preveu que sigui d'entre 1,4 i 5,8°C de cara a l'any 2100. En general, sigui quin sigui l'escalfament mitjà, l'augment de temperatura serà superior en latituds altes i sobre els continents, que en els tròpics i sobre els oceans.
7. A escala global, també s'espera un augment de la precipitació, que podria ser d'unes poques unitats percentuals respecte la precipitació actual. L'augment, que no és gens homogeni al llarg de la superfície del planeta (hi ha zones on s'esperen disminucions de la precipitació) podria ser més significatiu a latituds altes dels dos hemisferis.

8. Com a conseqüència de la dilatació tèrmica provocada per l'augment de temperatura, i també com a resultat de la fosa de un cert volum de gel continental, es preveuen increments del nivell del mar. El rang d'augment previst, depenent de l'escenari i del model escollit, es troba entre 9 i 88 cm.
9. Hi ha diverses prediccions, molt més incertes que les que fan referència a les mitjanes globals, relatives als canvis en variabilitat i esdeveniments extrems. En particular, diversos estudis mostren una disminució de dies amb precipitació, la qual cosa, combinada amb un augment de la precipitació total, implica un augment de la intensitat de les precipitacions. També es dona versemblança a les prediccions que indiquen temperatures màximes més altes i més dies calorosos sobre les àrees continentals, augment de l'índex de xafogor, i augment de l'evaporació durant l'estiu als continents, amb el risc associat de sequeres i incendis forestals que això comporta.
10. La regionalització de les prediccions del canvi climàtic és un tema de gran actualitat, sobre el que s'està duent a terme molta investigació, però que encara no està prou madur com perquè prediccions regionals tinguin ni molt menys la mateixa fiabilitat i robustesa que les projeccions globals. De fet, la pròpia definició del clima comporta intrínsecament un augment de la dificultat en la seva predicció a mesura que anem reduint l'escala espacial a on es vol fer. En particular, la predicció del clima futur per a una àrea tant petita com la del territori català serà altament complicada i incerta. En realitat, tots els resultats de projeccions futures que es donen a continuació han estat extrets d'estudis que s'apliquen a àrees molt més grans (des de la Mediterrània en el seu conjunt, passant per la Península Ibèrica, fins a la costa mediterrània peninsular).
11. Hi ha diverses metodologies proposades per a la regionalització de les projeccions climàtiques. Totes elles depenen d'una manera o altra dels models d'escala global. Aquestes metodologies es poden agrupar en tres línies: l'anàlisi acurada dels resultats dels models globals; l'ús de models globals d'alta resolució o de tècniques d'aniuament (*nesting*) de models regionals (RCM); i les tècniques estadístiques per obtenir resultats d'escala menor (*downscaling*).
12. La temperatura de l'aire prop de la superfície augmentarà a tot el territori català en el decurs del proper segle, com a conseqüència de l'escalfament global. L'augment exacte és difícil de predir, ateses el gran nombre d'incerteses associades i la pròpia complexitat del sistema climàtic. No obstant això, hi ha un acord força general entre els diversos investigadors que han analitzat el canvi de temperatura previsible per regions que inclouen Catalunya en el fet que l'augment serà superior al de la mitjana del planeta. Això voldria dir un augment a l'entorn de 3,5°C (1,5-6,3) a finals de segle XXI. Aquest augment no seria uniforme ni en el temps (probablement augments més acusats a l'estiu que a l'hivern) ni en l'espai (probablement augments més importants a l'interior que a la costa).
13. Pel que fa a la precipitació, la situació és molt més complexa (com de fet ja ho és l'estructura de la precipitació a Catalunya en el clima present). Els diversos resultats regionalitzats donen prediccions una mica diferents. A tall de síntesi es podria dir que a Catalunya la precipitació no hauria de canviar de forma gaire significativa, ja que les diverses prediccions oscil·len entre disminucions moderades i augments molt lleugers. Amb una mica més de detall, en general hi ha acord per predir disminucions entre petites i moderades (fins un 20%) de la precipitació durant l'estiu, i augments petits (fins un 10%) a l'hi-

vern. No s'han trobat prediccions de canvis significatius pel que fa a la primavera, mentre que de cara a la tardor la disminució de la precipitació seria encara menor que la de l'estiu. L'únic estudi que permet distingir variacions espacials d'aquests canvis indica disminucions de precipitació a la zona del Pirineu i Pre-pirineu occidental (podria anar lligat a les disminucions estiuenques) i augments a la resta del territori. Tots aquests resultats corresponen a finals del segle XXI.

14. Hi ha encara una gran tasca d'investigació a realitzar pel que fa a les qüestions de regionalització de les projeccions del canvi climàtic i, en particular, a les projeccions per l'àrea de Catalunya. De fet, no s'ha trobat cap estudi centrat estrictament en el territori català. Amb tota seguretat, a escala internacional en els propers anys es desenvoluparan projectes de recerca per tal de millorar les prediccions regionals, atesa aquesta necessitat clara de resultats el màxim de robustos possible. Per la seva proximitat, cal citar tres projectes finançats per la Comissió Europea (PRUDENCE, STARDEX, MICE) que se centren en la regionalització de les previsions de canvi climàtic. Seria molt convenient que, simultàniament, es desenvolupessin projectes semblants, vinculats d'alguna manera als d'escala superior, i que estiguessin centrats en el territori català.

Referències bibliogràfiques

- AYALA-CARCEDO, Francisco Javier; IGLESIAS LÓPEZ, Alfredo. «Impactos del posible cambio climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en la España peninsular». A: BALAIRÓN, Luís, *El cambio climático*, Madrid: Servicio de Estudios del BBVA, 2000.
- BORÉN, R.; RIBALAYGUA, J.; BENITO, L.; BALAIRÓN, L. «A two step analogical/regression downscaling method. Part I: description and validation». (Comunicació privada).
- CUBASCH, U.; VON STORCH, H.; WASKEWITZ, J.; ZORITA, E. «Estimates of climate change in Southern Europe derived from dynamical climate model output». *Climate Research*, vol. 7 (1996), p. 129-149.
- GALLARDO, C.; ARRIBAS, A.; PREGO, J.A.; GÄRTNER, M.A.; CASTRO, M. «Multi-year simulations using a regional-climate model over the Iberian Peninsula: Current climate and doubled CO₂ scenario». *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 127 Part A, núm. 575 (July, 2001) p. 1659-1681.
- GIORGI, Filippo; O MEARNS, Linda. «Introduction to special section: Regional climate modeling revisited». *Journal of Geophysical Research*, vol. 104, núm. D6 (March 27, 1999), p.6335-6352.
- GIORGI, Filippo; O MEARNS, Linda. «Probability of regional climate change based on the reliability Ensemble Averaging (REA) method». *Geophysical Research Letters*, vol. 30, núm. 12 (2003), p. 31-1-31-4.
- GOODESS, C.M.; PALUTIKOF, J.P. «Development of daily rainfall scenarios for Southeast Spain using a circulation-type approach to downscaling». *International Journal of Climatology*, vol. 10 (1998), p. 1051-1083.
- GRASSL, Hartmut. «Status and Improvements of Coupled General Circulation Models». *Science*, vol. 288 (June 2000), p.1991-1997.
- HOUGHTON, J.T.; DING, Y.; GRIGGS, D.J.; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P.J.; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C.A. *Climate Change 2001: The Scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2001.
- HOUGHTON, John. *Global Warming: The Complete Briefing*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- HULME, M.; SHEARD, N. *Escenarios de Cambio Climático para la Península Ibérica*. Norwich: Climatic Research Unit, University of East Anglia, 1999.
- MCGUFFIE, K.; HENDERSON-SELLERS, A. «Forty years of numerical climate modelling». *International Journal of Climatology*, vol. 21 (2001), p. 1067-1109
- MIMAM (Ministerio de Medio Ambiente). *Tercera comunicación nacional de España a la Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, 2002.
- NOGUER, María. «Modelos climáticos». A: BALAIRÓN, Luís, *El cambio climático*. Madrid, España: Servicio de estudios del BBVA, 2000.
- PAETH, H.; RAUTHE, M.; HENSE, A. «Relative Importance of the AO, NAO and Aleutian Low in Predicting

Regional Climate Change». *Geophysical Research Abstracts*, vol.5, 06152 (2003).

PRINN, R.; JACOBY, H.; SOKOLOV, A.; WANG, C.; XIAO, X.; YANG, Z.; ECKHAUS, R.; STONE, P.; ELLERMAN, D.; MELILLO, J.; FITZMAURICE, J.; KICKLIGHTER, D.; HOLIAN, G.; LIU, Y. «Integrated Global System Model for climate policy assessment: Feedbacks and sensitivity studies». *Climatic Change* vol. 41, núm. 3/4 (1999), p. 469-546.

RIBALAYGUA, L.; BORÉN, R.; BENITO, J. «A two step analogical/regression downscaling method. Part II: application to HadCM2SUL output». (Comunicació privada).

SUMNER, G. N.; ROMERO, R.; HOMAR, V.; RAMIS, C.; ALONSO, S.; ZORITA, E. «An estimate of the effects of climate change on the rainfall of Mediterranean Spain by the late twenty first century». *Climate Dynamics*, vol 20 (2003), p. 789-805.