

Regionalització d'escenaris de canvi climàtic a Andorra:

regionalització estadística
a partir de la sèrie
climàtica de Ransol

Marc Pons
Elena Puigdemasa
Laura Trapero



Vall de Ransol.

la revista del cenma 31



En aquest estudi s'ha fet una primera aproximació a la regionalització d'escenaris de canvi climàtic per obtenir projeccions locals que incorporin la variabilitat climàtica a escala local, imprescindible per a l'estudi dels possibles impactes sobre el recurs hídric, la neu, els ecosistemes o la salut. D'altra banda, s'ha analitzat la incertesa i la dispersió de diferents models per tal de fer una primera pinzellada de la forquilla de canvis esperats tant en les temperatures com en la precipitació. A causa de la inherent incertesa dels models climàtics de circulació general, s'observa un increment de la dispersió de les projeccions a mesura que s'incrementa l'horitzó temporal. Malgrat les incerteses dels models i la incertesa mateixa dels escenaris globals d'emissions, els resultats coincideixen a mostrar un increment progressiu de les temperatures tant mínimes com màximes. Aquest increment es detecta més marcat als mesos d'estiu que als d'hivern. Pel que fa a la precipitació, es projecta una disminució en el total anual, especialment marcada en els mesos d'estiu, i un increment poc significatiu durant els mesos d'hivern.

Paraules claus > Canvi climàtic, regionalització, projeccions, Andorra.

abstract/résumé

Regionalization of climate change scenarios in Andorra: statistical regionalization using climatic series with data from the Ransol weather station

This study seeks to achieve a first attempt of downscaling climate change scenarios in order to generate local projections including climate variability at local scale that will be essential for studying the impact of this change on water and snow resources, ecosystems or health studies. As well, the uncertainty and dispersion of various models is analyzed as an initial approach to the range of expected change in both temperatures and precipitation. However, given the inherent uncertainty of general climatic circulation models, an increase in the dispersion of projections appears as the time scale is increased. Despite the uncertainties of the models and global emission scenarios, the results show a progressive increase in both minimum and maximum temperatures. These increases are more significant in summer than in winter. An annual fall in precipitation is also projected, mainly in summer, along with a non significant increase in winter.

KEYWORDS > Climate change, downscaling, projections, Andorra.

Régionalisation de scénarios de changement climatique en Andorre : régionalisation statistique à partir de la série climatique de Ransol

Dans cette étude a été réalisée une première approche de la régionalisation de scénarios de changement climatique pour obtenir des projections locales qui intègrent la variabilité climatique à échelle locale, essentielle pour l'étude des impacts potentiels sur les ressources en eau, la neige, les écosystèmes ou la santé. En outre, l'incertitude et la dispersion des différents modèles ont été analysés dans le but de jeter un premier coup d'œil sur la frange de changements attendus en ce qui concerne à la fois les températures et les précipitations. En raison de l'incertitude inhérente des modèles climatiques de circulation générale, une augmentation de la dispersion des projections s'observe au fur et à mesure qu'augmente l'horizon temporel. Malgré les incertitudes des modèles et de la propre incertitude des scénarios globaux d'émissions, les résultats coïncident à indiquer une hausse progressive des températures à la fois minimales et maximales, davantage prononcée en été qu'en hiver. Quant aux précipitations, il est prévu une diminution dans le total annuel, particulièrement prononcée les mois d'été, ainsi qu'une hausse des précipitations peu significative les mois d'hiver.

MOTS-CLÉS > Changement climatique, régionalisation, projections, Andorre.

CENTRE	MODEL CLIMÀTIC	ACRÒNIM	ESCENARIS D'EMISSIONS*	HORITZONS TEMPORALS
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	CGCM33.1 (T47)	CGMR	A1B	2020, 2055, 2090
Centre National de Recherches Météorologiques	CNRM-cm3	CNCM3	A1B, A2	2020, 2055, 2090
Max-Planck Institute for Meteorology	ECHAM5-OM	MPEH5	A1B, A2, B1	2020, 2055, 2090
UK Meteorological Office	HadCM3	HADCM3	A1B, A2, B1	2020, 2055, 2090
	HadGEM1	HADGEM	A1B, A2	2020, 2055, 2090
National Center for Atmospheric Research	PCM	NCPCM	A1B, B1	2020, 2055
	CCSM3	NCCCS	A1B, A2, B1	2020, 2055, 2090

* A1B: Creixement econòmic ràpid, introducció de noves tecnologies més eficients, ús equilibrat de les fonts d'energia.

A2: Població en continu creixement, introducció més lenta i fragmentada de noves tecnologies més eficients.

B1: Canvi cap a una societat més sostenible. Conversió cap a una economia més de serveis i d'informació, menys intensiva en materials i amb introducció de tecnologies netes.

Taula 1. Models climàtics globals (MCG), escenaris d'emissions i horitzons temporals seleccionats, a partir dels quals s'ha realitzat la regionalització estadística amb les dades històriques de l'estació de Ransol.

ESCENARIS, MODELS I PROJECCIONS REGIONALITZADES DE CANVI CLIMÀTIC

Durant les últimes dècades, la comunitat científica ha constatat amb unanimitat l'existència d'un canvi climàtic d'origen antropogènic degut principalment a l'increment continuat de les emissions dels gasos d'efecte hivernacle (GEH) (Anderegg, 2010; Cook *et al.*, 2013; Doran i Zimmerman, 2009). Tot i que s'espera un increment futur de la magnitud dels canvis observats, fins avui encara existeix molta incertesa sobre quins poden ser el grau, la direcció i la variabilitat dels futurs canvis en el clima. En aquest context, els escenaris de canvi climàtic constitueixen un fonament imprescindible per a la realització d'estudis sobre els possibles impactes, les vulnerabilitats i les estratègies d'adaptació més adequades (Lu, 2006). Els models climàtics són l'eina utilitzada per representar i simular les interaccions entre l'atmosfera, els oceans i la superfície terrestre. Els models permeten analitzar des de diferents escenaris la sensibilitat del clima a pertorbacions com poden ser l'increment de les emissions de GEH o els aerosols. Per generar els diferents escenaris, es construeixen futurs plausibles en funció de la previsió de com pot evolucionar la demografia, l'activitat econòmica o la innovació tecnològica (IPCC, 2013). Diferents instituts i centres de recerca d'arreu del món han utilitzat models de circulació general climàtics (MCGC) per generar escenaris sobre l'evolució futura del clima a escala global. Aquests models tenen una resolució típica d'entre 100 i 300

km, sovint insuficient per poder estudiar les característiques del clima a escala regional o local, i per tant no són suficients per poder analitzar els possibles impactes que es poden donar a aquest nivell. A més a més, en zones d'orografia complexa, com és el cas d'Andorra, els processos mesoescalars, com ara les pluges orogràfiques o els processos convectius, tenen un paper clau en la seva climatologia i per tant encara és més palesa la necessitat d'utilitzar models amb més resolució. Per aquest motiu, es recorre a la regionalització climàtica (*downscaling* en anglès) per generar escenaris futurs d'alta resolució (IPCC, 2013).

Existeixen nombroses tècniques de regionalització climàtica, les quals es poden dividir en dos grans grups: les dinàmiques i les estadístiques. Els models climàtics regionals (MCR) són l'exemple paradigmàtic de la regionalització dinàmica (*dynamical downscaling*). També anomenat *downscaling numeric*, aquest mètode es basa en l'ús de models meteorològics mesoescalars (d'àrea limitada) per obtenir els mateixos camps atmosfèrics que els models globals, però amb una resolució espacial propera a la desena de quilòmetres o fins i tot inferior. El principal inconvenient d'aquesta metodologia és el seu cost, ja que requereix una gran capacitat de càlcul per poder generar i processar els resultats. Per aquest motiu, sovint es disposa de projeccions amb un nombre limitat de simulacions, és a dir amb un nombre limitat de possibles escenaris i horitzons temporals (Benestad *et al.*, 2008).

D'altra banda, existeixen les tècniques estadístiques, les quals busquen relacions empíriques que vinculin les variables a gran escala disponibles dels models de circulació general (predictors) amb les variables regionals o locals observades (predictands). L'essència de la regionalització estadística és identificar la sincronia entre els canvis de les variables a escala global i a escala local (Benestad *et al.*, 2008).

REGIONALITZACIÓ DE LES PROJECCIONS DE CANVI CLIMÀTIC A ANDORRA

Per fer una primera aproximació a la generació de projeccions locals de canvi climàtic a Andorra, s'ha realitzat una regionalització estadística a partir de les sèries històriques de temperatura i de precipitació de l'estació de Ransol (1.645 m). D'una banda, aquestes dades representen un registre amb suficient longitud temporal (mínim de 30 anys) per poder fer una caracterització climàtica adequada. D'altra banda, Esteban *et al.* (2009; 2012) van dur a terme un control de qualitat exhaustiu i l'homogeneïtzació de la sèrie. Això fa que les dades tinguin una gran qualitat i fiabilitat per poder realitzar aquest tipus d'estudis.

Per tal d'obtenir una forquilla dels possibles canvis en les temperatures i la precipitació i la seva dispersió, s'ha fet la regionalització de diferents MCG, en diferents escenaris proposats per l'IPCC (2000) i en diferents horitzons temporals (taula 1), mitjançant el model LARS-WG (Semenov *et al.*, 1998).

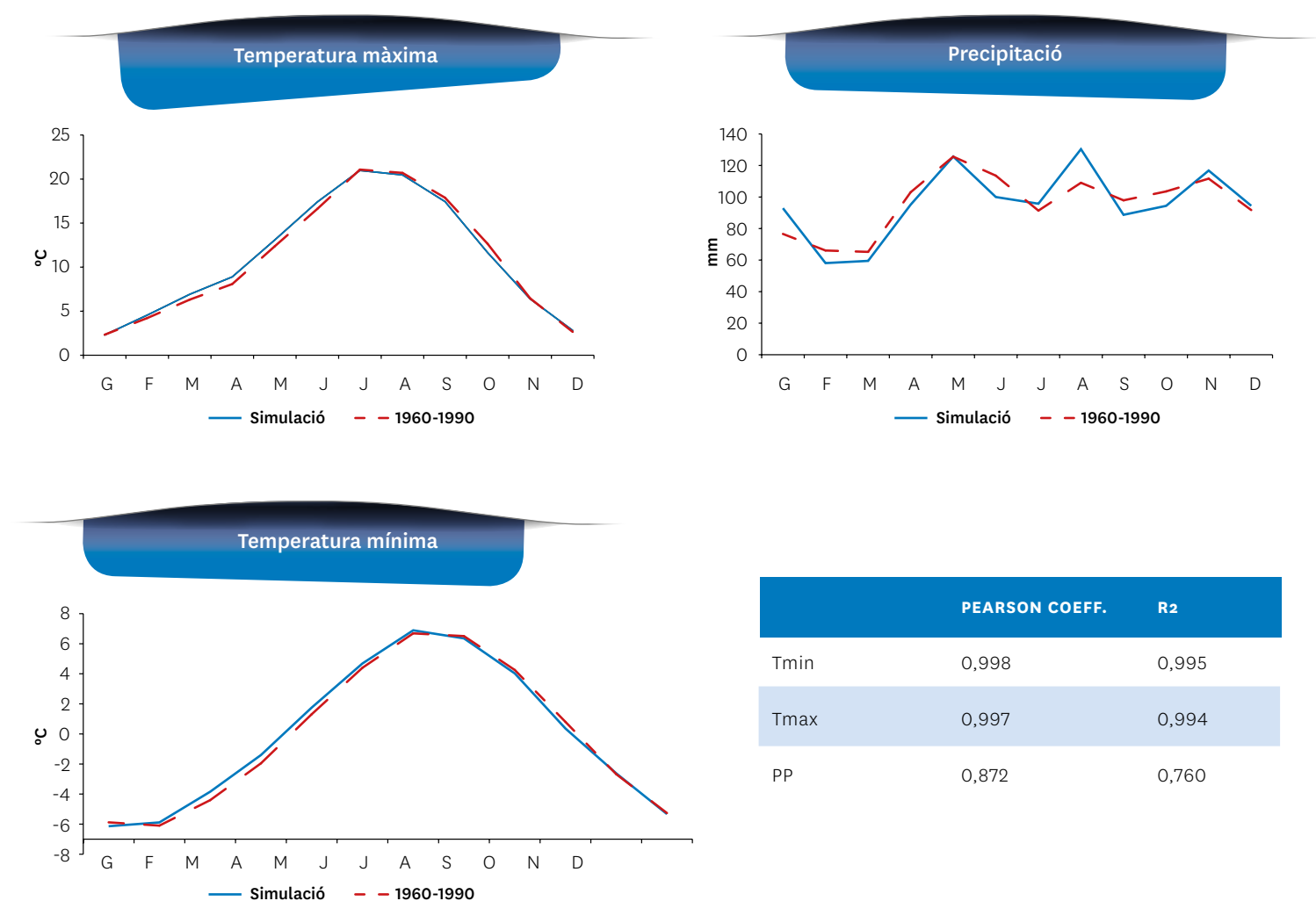


Figura 1. Validació de la capacitat del model per simular la temperatura mínima i màxima i la precipitació durant el període de control.



El model estocàstic LARS-WG utilitza una distribució semiempírica (SED) per aproximar les distribucions de probabilitat de la precipitació diària, la temperatura mínima i màxima i la radiació solar. Per calibrar el model s'ha utilitzat la sèrie històrica de Ransol de les tres primeres variables per al període 1961-1990. Un cop calibrat el model, s'ha simulat una sèrie estocàstica de la precipitació diària, la temperatura mínima i màxima diària per a un període de 30 anys i s'ha comparat amb el període de control per validar la capacitat de reproduir el comportament d'aquestes variables. La figura 1 mostra que el model és vàlid per simular la temperatura mínima i màxima ($R^2 > 0,9$). Aquest model sobreestima

Foto 1. Garita meteorològica i pluviòmetre manual de l'estació meteorològica de Ransol. El pluviòmetre manual tipus Hellmann ha estat substituït per aparells automàtics moderns. (P. Esteban)

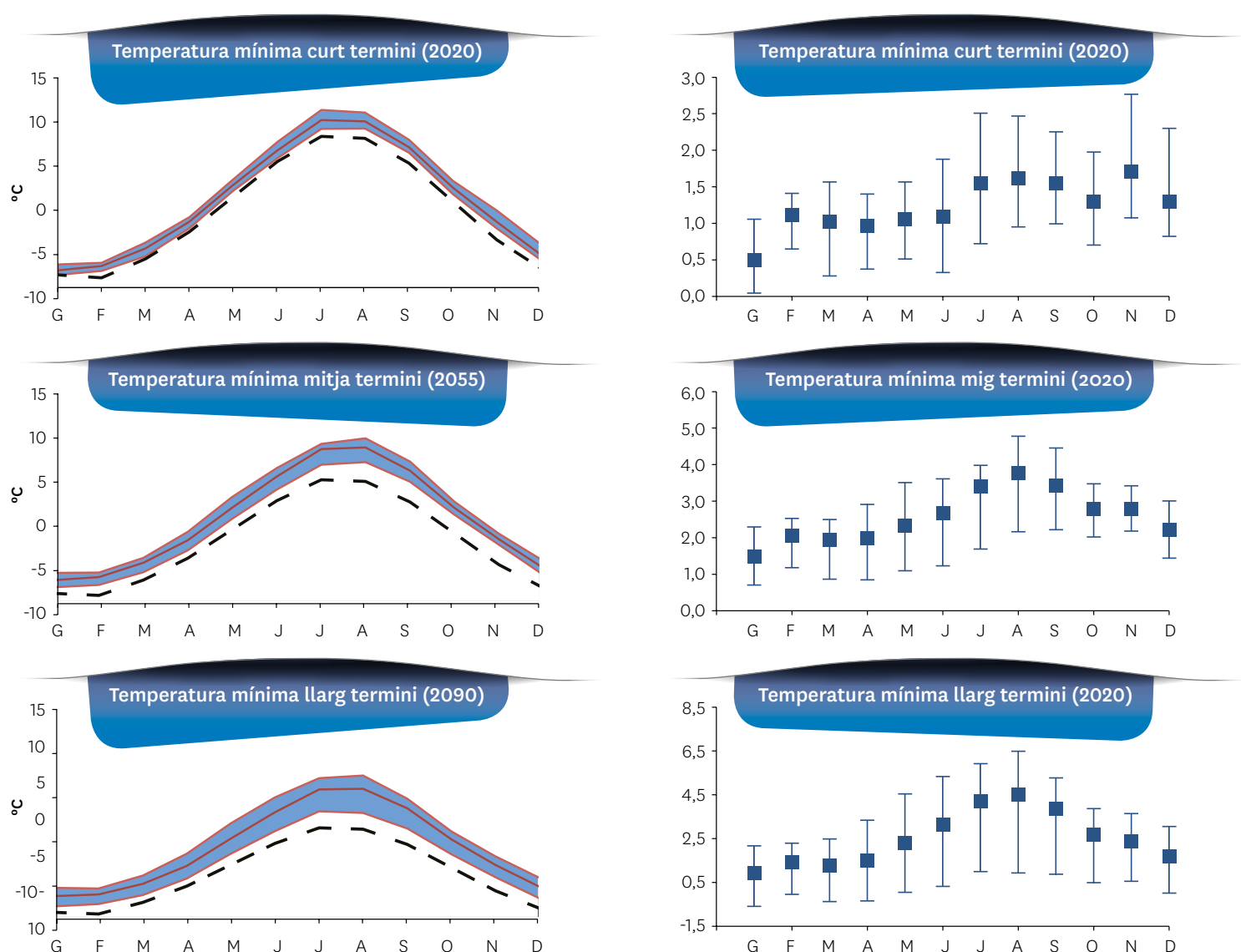


Figura 2. Mitjana i rang de projeccions de la temperatura mínima segons diferents models climàtics a curt, mitjà i llarg termini respecte al període 1961-1990 (línia discontinua).

molt lleugerament les temperatures durant els mesos de primavera i les subestima de manera poc significativa a l'estiu. En el cas de la precipitació, tot i que la correlació és menor ($R^2 = 0,87$), el model també reproduïx satisfactòriament aquesta variable. En aquest cas, però, el model sí que sobreestima de manera més significativa els valors mensuals de precipitació tant de gener com d'agost.

Un cop calibrat i validat el model, s'han regionalitzat les diferents projeccions dels models climàtics de circulació general presentats a la taula 1 per a diferents horitzons temporals. Aplicant els valors delta (Δ) de canvi de cada model i cada variable d'estudi als paràmetres estadístics calculats durant el període de control a l'estació de Ransol, s'ha obtingut una forquilla de projeccions de canvi climàtic a escala local. Aquestes projeccions han permès analitzar quin és el nivell de

canvi que diferents models projecten per als anys vinents, tenint en compte la variabilitat climàtica local de Ransol i també la dispersió dels models en tres horitzons temporals diferents: curt termini (2020), mitjà termini (2055) i llarg termini (2090).

Canvis projectats en la temperatura

Pel que fa a la temperatura mínima anual, s'espera un increment en el curt termini d'entre $+0,5^{\circ}\text{C}$ i $+1,84^{\circ}\text{C}$ amb una mitjana entre tots els models i escenaris de $+1,17^{\circ}\text{C}$. Aquest canvi s'espera que sigui més important durant els mesos d'estiu i tardor ($+1,35^{\circ}\text{C}$ i $+1,44^{\circ}\text{C}$, respectivament) que a l'hivern i la primavera ($+0,92^{\circ}\text{C}$ i $+0,96^{\circ}\text{C}$, respectivament). A mitjà termini, s'estima un increment d'entre $+1,47^{\circ}\text{C}$ i $+3,37^{\circ}\text{C}$, amb una mitjana de $+2,57^{\circ}\text{C}$. En aquest horitzó també s'espera un major

increment durant els mesos d'estiu i de tardor ($+3,28^{\circ}\text{C}$ i $+3,01^{\circ}\text{C}$, respectivament) que en els d'hivern i primavera ($+1,92^{\circ}\text{C}$ i $+2,09^{\circ}\text{C}$, respectivament). A llarg termini, l'increment esperat se situa entre els $+1,73^{\circ}\text{C}$ i $+5,53^{\circ}\text{C}$, amb una mitjana de $+3,98^{\circ}\text{C}$. En aquest cas, s'espera un increment mitjà de $+2,83^{\circ}\text{C}$ en la temperatura mínima durant els mesos d'hivern, mentre que en els d'estiu l'increment esperat és de $+5,43^{\circ}\text{C}$ (figura 2).

Pel que fa a la temperatura màxima anual, els increments projectats encara són lleugerament superiors als projectats per a la temperatura mínima. S'espera que en el curt termini la temperatura màxima augmenti entre $+0,62^{\circ}\text{C}$ i $+1,87^{\circ}\text{C}$, amb una mitjana de $+1,2^{\circ}\text{C}$ i amb un increment més significatiu durant els mesos d'estiu i tardor ($+1,35^{\circ}\text{C}$ i $+1,42^{\circ}\text{C}$, respectivament). A mitjà termini, s'espera que aquest increment sigui d'entre $+1,5^{\circ}\text{C}$ i

+3,41°C, amb una mitjana de +2,61°C (+2°C durant els mesos d'hivern i +3,29°C durant l'estiu). Finalment, a llarg termini s'estima que la temperatura màxima anual podria incrementar-se entre +1,75°C i +5,55°C, amb un increment de +4°C de mitjana. En aquest últim cas, l'increment mitjà esperat durant els mesos d'hivern seria de 2,92°C, mentre que durant els mesos d'estiu la temperatura màxima podria incrementar-se en +5,44°C (figura 3).

Canvis projectats en la precipitació

En el cas de la precipitació, a diferència de la temperatura, s'identifica una dispersió més elevada pel que fa a les projeccions dels diferents models. Tot i que en diferent grau i temporalitat, tant en el cas de la temperatura mínima com en el de la màxima tots els models convergeixen a projectar un increment durant les pròximes dècades. En el cas de la precipitació, no només és diferent entre

models el grau del canvi projectat, sinó també la tendència dels canvis esperats. Mentre que alguns models projecten una reducció en tots els mesos de l'any, d'altres projecten un increment principalment durant els mesos d'hivern (figura 4).

Tot i la dispersió existent, en el curt termini i considerant la mitjana de tots els models analitzats s'espera una reducció de la precipitació total anual al voltant

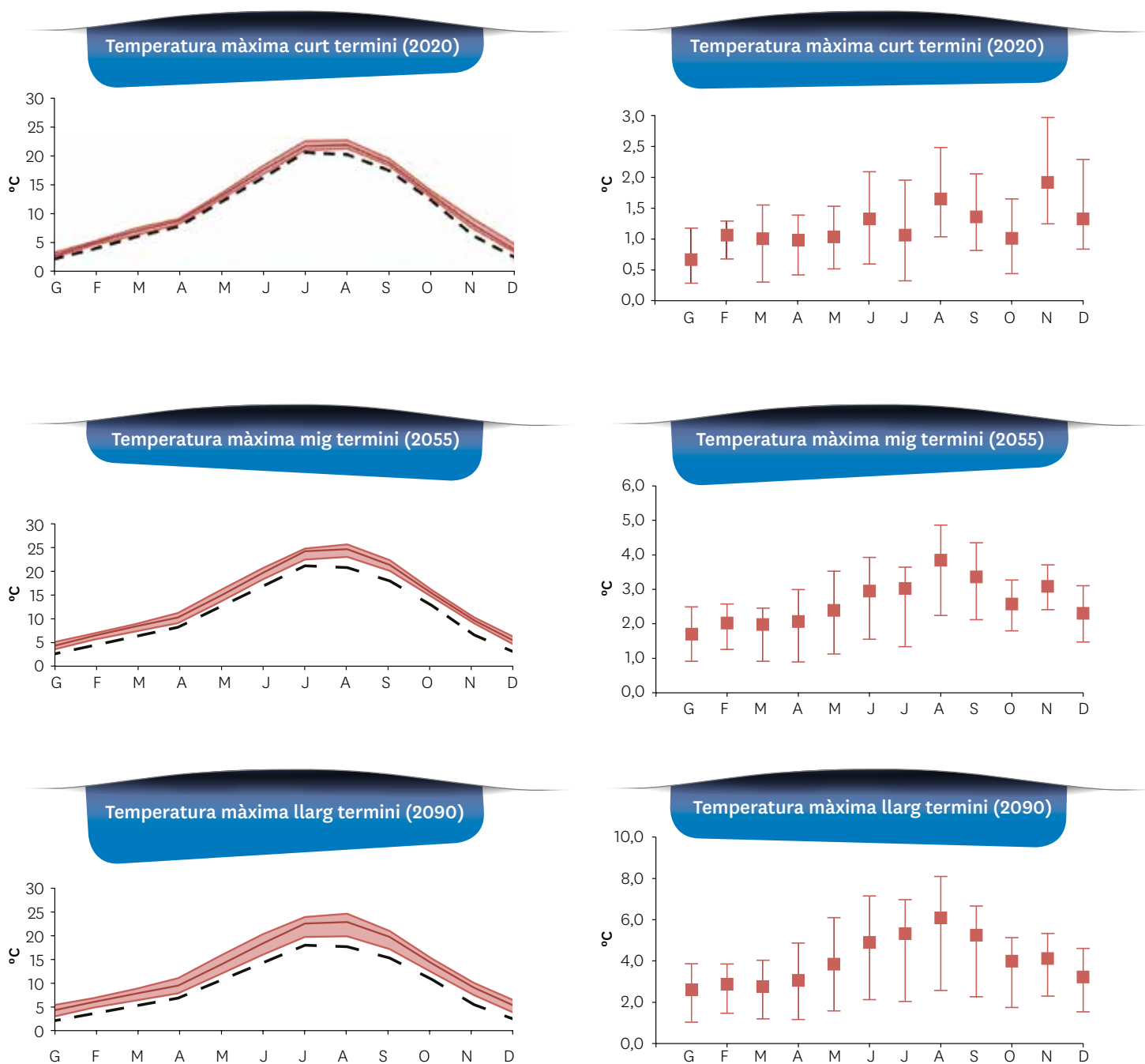


Figura 3. Mitjana i rang de projeccions de la temperatura màxima segons diferents models climàtics a curt, mitjà i llarg termini respecte al període 1961-1990 (línia discontinua).

d'un 4%. Des del punt de vista estacional, aquesta reducció és generalitzada excepte per als mesos d'hivern, on es projecta un increment del voltant del +4%. A mitjà termini, s'accentua la disminució projectada amb una mitjana anual de -12%. En aquest cas, els canvis projectats durant el mesos d'estiu són molt més significatius (-22%), mentre que a l'hivern la variació projectada seria molt baixa (+2%). Finalment, a llarg termini, la mitjana dels models projecten

una reducció de la precipitació total anual de -21% respecte al període 1961-1990. En aquest cas, es repeteix el comportament mensual previst en els anteriors horitzons temporals, amb una variació més marcada a l'estiu (-36%) i una de poc significativa a l'hivern (+3%) (figura 4). Cal remarcar que a diferència de les temperatures, en el cas de les precipitacions el model sobreestimava lleugerament la precipitació sobretot dels mesos de gener i agost (figura 1). Aquest

error del model es veu traslladat en les projeccions obtingudes mostrant també una sobreestimació dels resultats per a aquests mesos, tal com es pot observar a la figura 4. Tot i que a escala anual i estacional els valors mitjans quedarien compensats per la lleugera subestimació del model en els altres mesos, probablement les projeccions per als mesos d'estiu i hivern podrien ser lleugerament inferiors als resultats obtinguts.

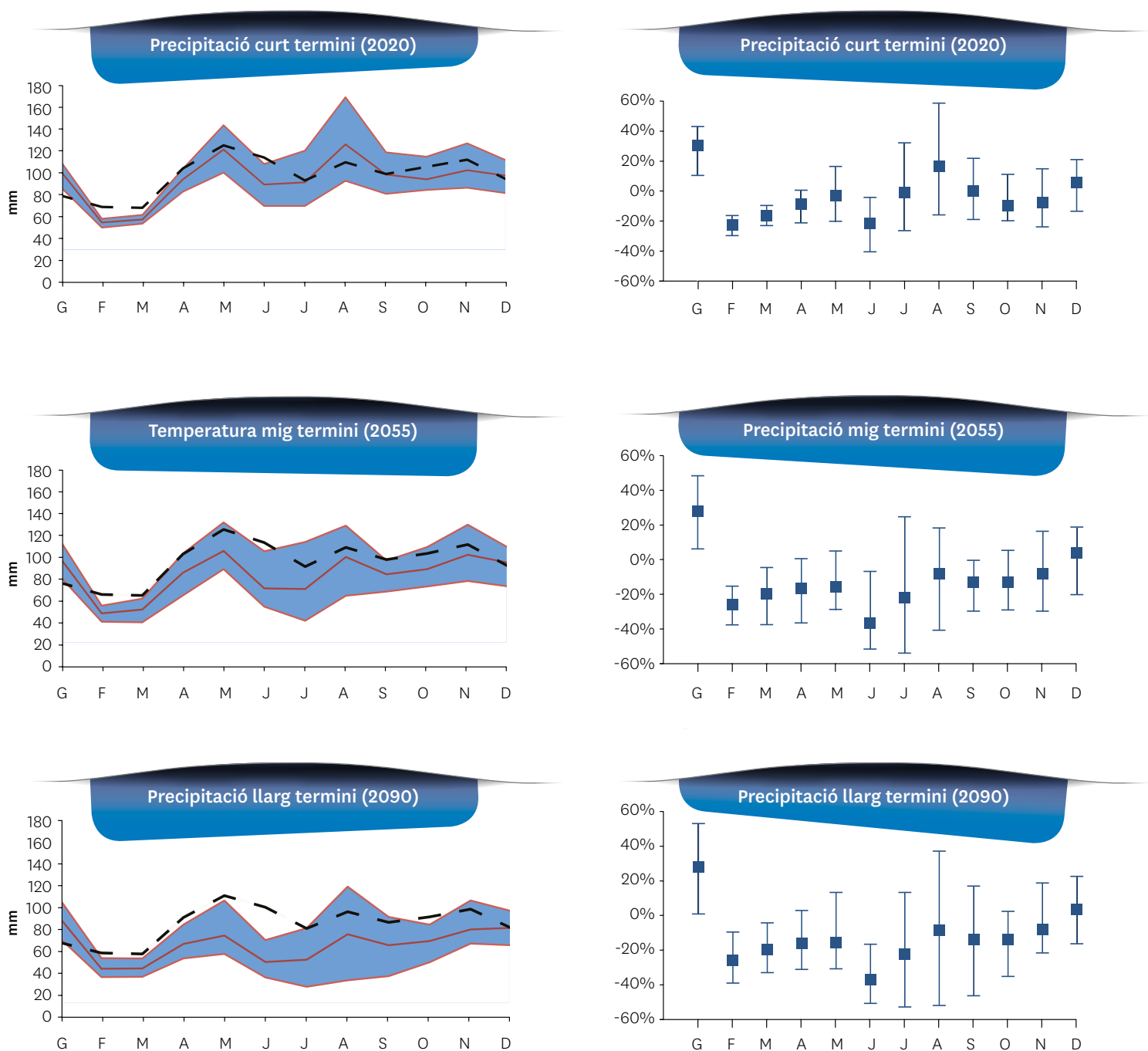


Figura 4. Mitjana i rang de projeccions de la precipitació mensual segons diferents models climàtics a curt, mitjà i llarg termini respecte al període 1961-1990 (línia discontinua).

CONCLUSIONS

En aquest estudi s'ha fet una primera aproximació a la regionalització d'escenaris de canvi climàtic per obtenir projeccions climàtiques locals que incorporin la variabilitat climàtica pròpia de la zona d'estudi, imprescindible per a l'estudi d'alguns possibles impactes. La metodologia utilitzada ha facilitat la possibilitat de regionalitzar diferents models climàtics de circulació general en diferents escenaris i horitzons temporals. Així doncs, s'ha pogut analitzar la incertesa i la dispersió de diferents models per tal de fer una primera pinzellada de la forquilla de canvis esperats per a les properes dècades, tant en les temperatures com en la precipitació. A causa de la inherent incertesa dels models climàtics de circulació general, s'observa un increment de la dispersió de les projeccions a mesura que s'incrementa l'horitzó temporal (augment de l'àrea en color de les figures 2 i 4). D'altra banda, la metodologia emprada, basada en un generador estadístic (Weather Generator),

facilitarà l'anàlisi dels canvis esperats en els valors extrems diaris de temperatures i precipitació. A més a més, ha permès obtenir sèries sintètiques climàtiques diàries, necessàries per analitzar els futurs impactes del canvi climàtic en la neu, el recurs hídic, els ecosistemes o la salut. Aquesta metodologia, àmpliament utilitzada en una gran varietat d'estudis d'impacte, ha demostrat representar de manera consistent i robusta els canvis projectats en les mitjanes i la variabilitat futura (Benestad *et al.*, 2009). No obstant, aquesta metodologia tendeix a subestimar la variabilitat de les sèries observades. Actualment s'està treballant en la utilització d'altres aproximacions en la regionalització estadística com és l'Statistical Downscaling Model (SDSM; Wilby *et al.*, 2002), per tal de comparar-ne els resultats, i en l'actualització amb els trentennis de referència 1971-2000 i 1981-2010 i els nous escenaris AR5 (IPCC, 2013) (figura 5).

Tot i que els resultats obtinguts fins ara no es poden agafar com a projeccions definitives, sinó

com una primera aproximació metodològica, els resultats van en consonància amb els obtinguts al Pirineu pel Servei Meteorològic de Catalunya (Barrera-Escoda i Cunillera, 2011; SMC, 2012) i Météo France (SCAMPEL, 2012), a partir d'una regionalització dinàmica de més qualitat. Malgrat les incerteses esmentades en la modelització, i la inherent dels escenaris globals d'emissions, els resultats mostren un increment progressiu de les temperatures mínimes i màximes. Aquest increment serà més marcat en els mesos d'estiu que en els d'hivern. Pel que fa a la precipitació es projecta una disminució en el total anual, especialment marcada en els mesos d'estiu, i un increment poc significatiu durant els mesos d'hivern.

Marc Pons ^{1,2}
Elena Puigdemasa ²
i Laura Trapero ¹

¹ Centre d'Estudis de la Neu i de la Muntanya d'Andorra (CENMA) - Institut d'Estudis Andorrans (IEA)

² Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra (OBSA)



Figura 5. Portada del darrer informe de l'IPCC sobre les bases físiques del canvi climàtic.
(<https://www.ipcc.ch/report/ar5/>)

BIBLIOGRAFIA

● ANDEREGG, W.R. (2010). «The Ivory Lighthouse: communicating climate change more effectively». *Climatic Change*, núm. 101, p. 655-662.

● BARRERA-ESCODA, A.; CUNILLERA, J. (2011) «Projeccions de canvi climàtic per a Catalunya (NE Península Ibèrica). Part I: Modelització climàtica regional». *Tethys*, núm. 8, p. 77-89.

● BENESTAD, R.E.; HANSSEN-BAUER, I.; CHEN, D. (2008). *Empirical-statistical downscaling*. World Scientific.

● COOK, J.; NUCCITELLI, D.; GREEN, S. A.; RICHARDSON, M.; WINKLER, B.; PAINTING, R.; WAY, R.; JACOBS, P.; SKUCE, A. (2013). «Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature». *Environmental Research Letters*, vol. 8, núm. 2, 024024.



Foto 2. Les emissions derivades del transit són una de les principals fonts de gassos d'efecte hivernal a Andorra.
(Font: Tony Lara, El Periòdic d'Andorra)

● DORAN, P.T.; ZIMMERMAN, M. K. (2009). «Examining the scientific consensus on climate change». *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 90, núm. 3, p. 22-23.

● ESTEBAN, P.; PROHOM, M. J.; AGUILAR, E.; MESTRE, O. (2009). «Evolució recent de la temperatura i de la precipitació a Andorra (1934-2008): Resultats anuals i estacionals». Andorra: CENMA (Centre d'Estudis de la Neu i de la Muntanya d'Andorra de l'Institut d'Estudis Andorrans).

● ESTEBAN, P.; PROHOM DURAN, M.; AGUILAR, E. (2012) «Tendencias recientes e índices de cambio climático de la temperatura y la precipitación en Andorra, Pirineos (1935-2008)». *Pirineos*, núm. 167, p. 87-106.

● IPCC (2000). *Special Report on Emissions Scenarios: A special report of working group*

III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [NAKIĆENOVIĆ, N.; SWART, R. (eds.)]. Cambridge University Press.

● IPCC (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [FIELD, C.B.; BARROS, V.; STOCKER, T. F.; QIN, D.; DOKKEN, D. J.; EBI, K. L.; MAstrandrea, M. D.; MACH, K.J.; PLATTNER, G.-K.; ALLEN, S. K.; TIGNOR, M.; MIDGLEY, P.M. (eds.)]. Cambridge i Nova York: Cambridge University Press.

● IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S.K.;

BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P.M. (eds.)]. Cambridge i Nova York: Cambridge University Press.

● IPCC (2014). *Climate change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. WorkingGroup II*. Disponible en línia a <http://www.ipcc-wg2.gov/AR5/> [Consulta: 1abril 2014]

● LU, X. (2006). *Guidance on the Development of Regional Climate Scenarios for Application in Climate Change Vulnerability and Adaptation Assessments, within the Framework of National Communications from Parties not Included in Annex I to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Nova York: National Communications Support Programme, UNDP-UNEP-GEF.

● SCAMPEI (2012). *Scénarios climatiques adaptés aux zones de montagne: Phénomènes*

extrêmes, enneigement et incertitudes. <<http://www.cnrm.meteo.fr/scampe/>>

● SEMENOV, M.A.; BROOKS, R.J.; BARROW, E.M.; RICHARDSON, C.W. (1998). «Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates». *Climate Research*, núm. 10, p. 95-107.

● SERVEI METEOROLÒGIC DE CATALUNYA (2012). *Projecte ESCAT, Generació d'escenaris climàtics amb alta resolució per a Catalunya (Resum executiu)*. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat.

● WILBY, R.L.; DAWSON, C.W.; BARROW, E.M. (2002). «SDSM - A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts». *Environmental Modelling & Software*, núm. 17, p. 147-159.