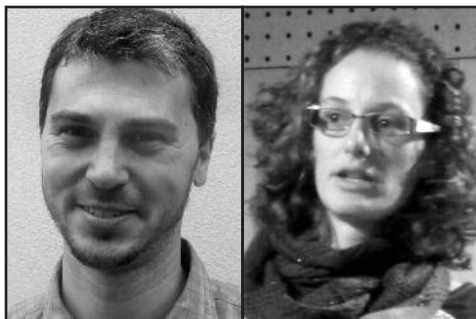




# Projeccions regionalitzades de canvi climàtic a Andorra



**Marc PONS i PONS, Laura TRAPERO i BAGUÉ**

## 1. Introducció

En les darreres dècades la comunitat científica ha constatat de forma unànime 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 *et al.*, 2010; Cook *et al.*, 2013; Doran & Zimmerman, 2009). Tot i que s'espera un increment futur en la magnitud dels canvis observats, fins a l'actualitat, encara existeix molta incertesa en quin pot 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 adients (UNDP-UNEP-GEF, 2009). 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 sota diferents escenaris la sensibilitat del clima a perturbacions com poden ser l'increment de les emissions de GEH i/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 en aquest nivell. A més a més, en zones d'orografia complexa, com és el cas d'Andorra, els processos mesoescalars, com poden ser 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 una major 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 (*downscaling* dinàmic). També anomenat *downscaling* numèric, 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 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 només 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 que 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).

## 2. Projeccions climàtiques per Andorra de 'l'ensemble' de models climàtics regionals de l'Euro-Cordex

Per a aquest treball, s'ha analitzat la base de dades del projecte Euro-Cordex. Aquesta nova base de dades és un *ensemble* de simulacions de diferents models climàtics regionals d'alta resolució per tot Europa, obtinguts mitjançant *downscallings* (regionalitzacions) dinàmics i estadístics forçats per diferents models climàtics globals.

La següent taula mostra els models climàtics regionals (RCM) utilitzats en l'ensemble de simulacions així com el model climàtic global (GCM) utilitzat per fer el forçament.

Escenari	Productor	GCM	RCM
RCP4.5 10 models	SMHI	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RCM4
	CLMcom	CNRM-CM5	CCLM4-8-17
	DMI	ICHEC-EC-EARTH	HIRHAM5
	SMHI	ICHEC-EC-EARTH	RCM4
	IPSL	IPSL-IPSL-CM5A-MR	WRF331F
	KNMI	MnEir-ECEARTH	RACMO22E
	SMHI	MOHC-HadGEM2-ES	RCM4
	CLMcom	MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17
	CSC	MPI-ESM-LR	REM0019
	CNRM	CNRM-CM5	CNRM-ALADIN53
RCP8.5 11 models	SMHI	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RCM4
	DMI	ICHEC-EC-EARTH	HIRHAM5
	SMHI	ICHEC-EC-EARTH	RCM4
	SMHI	IPSL-IPSL-CM5A-MR	RCM4
	IPSL	IPSL-IPSL-CM5A-MR	WRF331F
	KNMI	MnEir-ECEARTH	RACMO22E
	SMHI	MOHC-HadGEM2-ES	RCM4
	CLMcom	MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17
	CSC	MPI-ESM-LR	REM0019
	SMHI	MPI-MPI-ESM-LR	RCM4
	CNRM	CNRM-CM5	CNRM-ALADIN53

Taula. Models climàtics regionals (RCM) utilitzats en l'ensemble de simulacions així com el model climàtic global (GCM) utilitzat per fer el forçament

utilitzats en l'ensemble de simulacions així com el model climàtic global (GCM) utilitzat per fer el forçament. Aquest conjunt de simulacions té una resolució de 12,5 km i estan disponibles per diferents escenaris d'emissions i per diferents horitzons temporals.

### 2.1. Canvis projectats ens els valors climàtics mitjans

D'aquest *ensemble* de simulacions s'ha analitzat la projecció futura de les següents variables:

- Temperatura màxima
- Temperatura mínima
- Temperatura mitjana
- Amplitud tèrmica
- Precipitació

- En els següents horitzons temporals:
- Període de referència (1975-2005)
  - Curt termini (2021-2050)
  - Mitjà termini (2041-2070)
  - Llarg termini (2071-2100)

- I en el següents escenaris climàtics (descrits en l'annex I):
- RCP 4,5
  - RCP 8,5

La figura 2.1 ens mostra la forquilla dels canvis màxims mínims i mitjans en la temperatura mitjana tenint en compte tots els escenaris d'emissions i alguns horitzons temporals analitzats i segregades per horitzó temporal (2.2 i 2.3).

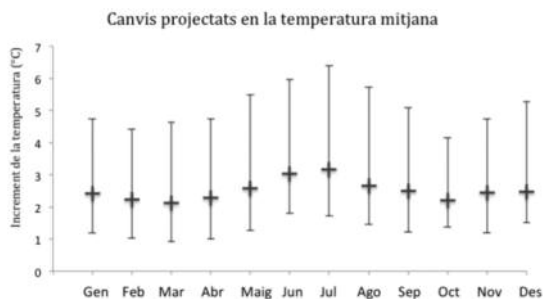


Figura 2.1. Increment màxim, mínim i mitjà de la temperatura mitjana mensual esperat respecte de l'escenari de referència

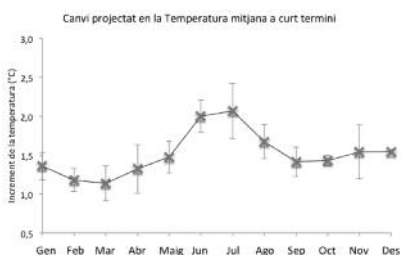


Figura 2.2. Increment màxim, mínim i promig de la temperatura mitjana mensual a mitjà termini

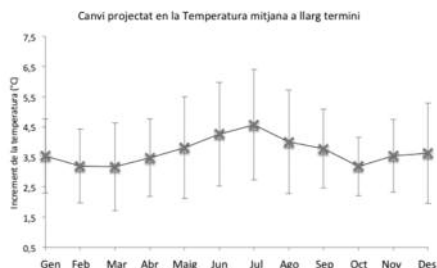


Figura 2.3. Increment màxim, mínim i mitjà de la temperatura mitjana mensual a llarg termini

La figura 2.4 ens mostra la forquilla dels canvis màxims mínims i mitjans en la precipitació total mensual tenint en compte tots els escenaris d'emissions i horitzons temporals analitzats i segregades per alguns horitzons temporals (2.5 i 2.6).

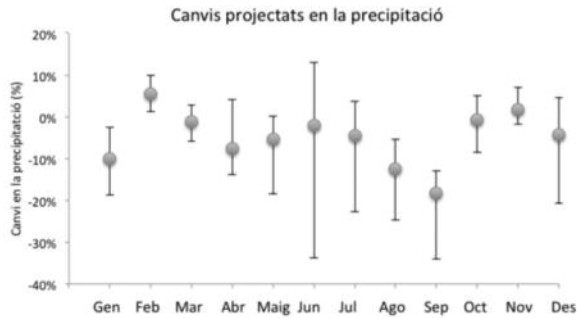


Figura 2.4. Variació màxima, mínima i promig de la precipitació mensual respecte l'escenari de referència

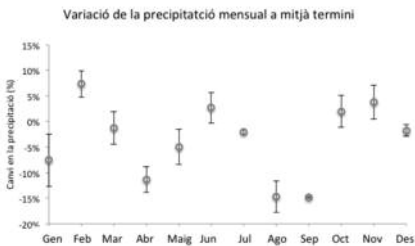


Figura 2.5. Variació màxima, mínima i mitjana de la precipitació mensual a mitjà termini

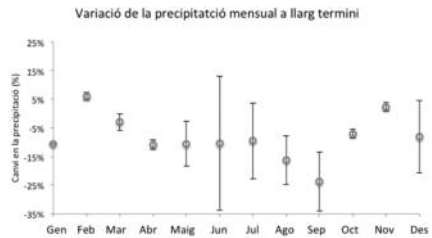


Figura 2.6. Variació màxima, mínima i mitjana de la precipitació mensual a llarg termini

### 3. Canvis projectats en els extrems climàtics

Finalment, a partir de la mateixa base de dades de l'ensemble de simulacions de l'Euro-Cordex s'han analitzat els canvis en els extrems climàtics de variables de precipitació i temperatura. Per als mateixos escenaris i horitzons temporals que per als valors mitjans s'han obtingut les projeccions de les següents variables:

- Dies anormalment càlids  
Dies en què la temperatura màxima supera de més de 5 °C el valor climàtic de referència.
- Dies anormalment freds  
Dies en què la temperatura mínima és 5 °C inferior al valor climàtic normal de referència.
- Nits anormalment càlides  
Dies en què la temperatura mínima supera de més de 5 °C el valor normal climàtic de referència.
- Dies d'onada de calor  
Dies en què s'assoleix un període consecutiu de més de 5 dies anormalment càlids.
- Dies d'onada de fred  
Dies en què s'assoleix un període consecutiu de més de 5 dies anormalment freds.
- Dies gèlids  
Dies en què la temperatura mínima és inferior o igual a 0 °C.
- Dies d'estiu  
Dies en què la temperatura màxima és superior a 25 °C.
- Nits tropicals  
Dies en què la temperatura mínima supera els 20 °C.
- Dies de fortes precipitacions ( $\geq 20$  mm).
- Dies de sequera ( $< 1$  mm).

#### 4. Conclusions

En aquest estudi s'ha analitzat la base de dades de l'*ensemble* de l'Euro-Cordex. D'aquesta manera s'han obtingut les projeccions regionalitzades per nou punts distribuïts per la geografia andorrana. Això ens ha permès obtenir les projeccions climàtiques mitjanes per a tot el conjunt del país. D'altra banda, a partir d'aquesta base de dades també s'ha pogut analitzar la variació futura d'alguns indicadors d'extrems climàtics de temperatures i precipitacions. Per tant, considerem que amb vista a la realització d'estudis de vulnerabilitat i d'impacte, aquestes últimes projeccions, resumides en el capítol 4, són les més completes i adients per a aquest tipus d'estudi.

Aquestes projeccions ens indiquen un increment de la temperatura mitjana anual a Andorra d'entre 1,3 °C i 1,7 °C a curt termini (període 2021-2050) respecte del període 1975-2005. A mitjà termini (període 2041-2070), s'espera un increment d'entre 1,7 °C i 3 °C, i a llarg termini (2071-2100) s'espera un increment d'entre 2,2 i 5,1 °C. Aquests increments s'esperen encara més significatius durant els mesos d'estiu (entre 1,7 °C i 2,2 °C a curt termini, entre 2,1 °C i 3,3 °C a mitjà termini i entre 2,5 °C i 6 °C a llarg termini).

Pel que fa a les precipitacions, es projecta una disminució d'un 3% del total anual a curt termini respecte del període de referència (1975-2005), d'entre un 2% i 5% menys a mitjà termini, i d'entre un 2% i un 15% menys a llarg termini. Tot i aquesta tendència, les diferències entre estacions seran marcades i es projectaran disminucions marcades de les precipitacions totals els mesos d'estiu especialment a llarg termini de fins a un -27%, mentre que en altres estacions com l'hivern o la tardor els canvis seran poc significatius i oscil·laran entre increments i disminucions d'entre +4% i -8% en funció de l'escenari d'emissions i de l'horitzó temporal. Pel que fa la primavera, els canvis projectats

a curt termini són poc significatius amb una tendència a l'alça cap a l'horitzó de llarg termini on es projecten disminucions d'entre -4% i -12% del total de precipitació.

Finalment, també s'han analitzat alguns indicadors d'extrems climàtics. Dels indicadors de temperatures destaca un increment progressiu per als diferents horitzons temporals tant dels dies anormalment càlids, dels d'estiu, així com de la freqüència d'onades de calor. D'altra banda, es projecta una disminució també progressiva del nombre de dies anormalment freds i de dies gèlids. Pel que fa a les precipitacions intenses, en les projeccions no s'observa una variació significativa de la freqüència d'aquests esdeveniments.

**Marc Pons i Pons,**

doctor en enginyeria de la sostenibilitat i investigador del CENMA i de l'OBSA, i

**Laura Trapero i Bagué,**

doctora en ciències físiques i investigadora del CENMA

## Referències

- ANDEREGG, W. R. (2010) "The ivory lighthouse: communicating climate change more effectively". *Climatic Change*, 101, 655-662.
- BARRERA-ESCODA, A., CUNILLERA, J. (2011) "Projeccions de canvi climàtic per a Catalunya (NE Península Ibèrica). Part I: Modelització climàtica regional". *Tethys*, 8, p. 77-89.
- BENESTAD, R. E.; HANSEN-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*. 8 (2), 024024.
- DORAN, P. T. & ZIMMERMAN, M. K. (2009) "Examining the scientific consensus on climate change". *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 90(3), 22-23.
- ESCAT. *Generació d'escenaris climàtics amb alta resolució per a Catalunya (Resum executiu)*. (2012). Servei Meteorològic de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat. Generalitat de Catalunya.
- IPCC (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (2013a). *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, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen; J. Boschung; A. Nauels; Y. Xia; V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge & New York: Cambridge University Press.
- JACOB, D.; PETERSEN, J.; BASTIAN E.; ALIAS, A.; BOSSING CHRISTENSEN, O.; BOUWER, L. M.; BRAUN, A.; COLETTE, A.; DÉQUÉ, M.; GEORGIEVSKI, G.; GEORGOPOULOU, E.; GOBIET, A.; MENUT, L.; NIKULIN, G.; HAENSLER, A.; HEMPELMANN, N.; JONES, C.; KEULER, K.; KOVATS, S.; KRÖNER, N.; KOTLARSKI, S.; KRIEGSMANN, A.; MARTIN, E.; VAN MEIJGAARD, E.; MOSELEY, C.; PFEIFER, S.; PREUSCHMANN, S.; RADERMACHER, C.; RADTKE, K.; RECHID, D.; ROUNSEVELL, M.; SAMUELSSON, P.; SOMOT, S.; SOUSSANA, J.; TEICHMANN, C.; VALENTINI, R.; VAUTARD, R.; WEBER, B.; YIOU, P. *Euro-Cordex: new high-resolution climate change projections for European impact research*. Regional Environmental Change, 2014, 563-578. DOI: 10.1007/s10113-013-0499-2.
- SCAMPEI (2012) *Scénarios climatiques adaptés aux zones de montagnes: 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 WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates". *Climate Research*, 10, 95-107.
- UNDP/UNEP/GEF (2008) *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*.