

MODELIZACIÓN DUN ESCENARIO DE FUTURO CAMBIO CLIMÁTICO EN GALICIA

A. Martínez de la Torre e G. Miguez Macho

Grupo de Física non Lineal
Universidade de Santiago de Compostela.

RESUMO

Neste estudo rexionalizouse o escenario de cambio climático xerado polo modelo de circulación global atmosfera-océano HadCM3 para o escenario de emisións SRES A1B. Utilizouse para iso a técnica do “downscaling dinámico”, é dicir, aniñouse un modelo climático rexional (RAMS) no modelo global (HadCM3). A malla do modelo global ten unha resolución de $3,75^\circ \times 2,5^\circ$, mentres que a do modelo rexional ten unha resolución espacial de 25 km centrada en Galicia, o que permite alcanzar un detalle moi superior. O período simulado corresponde a mediados do século XXI (2034-2051) e comparouse co clima actual representado por 12 anos coa composición da atmosfera dos anos 80-90 do século XX. Os resultados obtidos indican para mediados do século XXI un quentamento de arredor de $1,5^\circ\text{C}$ en toda Galicia con respecto ao clima actual, moito máis acusado na primavera e no verán que no outono e no inverno. O aumento da temperatura afecta tanto ás máximas como ás mínimas e prodúcese un notable aumento de días e noites cálidas no verán e un aumento máis moderado nas demais estacións. En canto á precipitación, tanto o modelo global como o rexional indican unha diminución acusada na primavera e no verán e un aumento tamén importante no outono e no inverno. Aínda que os resultados para a precipitación son menos robustos debido ao limitado número de anos simulados e á incerteza entre diferentes modelos globais para a nosa zona, todo indica que responden a unha acentuación da “mediterraneidade” do clima cunha maior estacionalidade no réxime de chuvias consistente coa expansión da cela de Hadley (avance do deserto do Sáhara cara ao norte) que moitos modelos predín como resposta a un quentamento global.

SUMMARY

In this study we have regionalized a climate change scenario generated by the Atmosphere-Ocean Global Circulation Model HadCM3 for SRES emission scenario A1B. We have employed a dynamical downscaling technique, where a regional climate model (RAMS) is nested within the global model (HadCM3). The global model grid has a resolution of $3.75^\circ \times 2.5^\circ$, whereas that of the regional model has 25 km, centered in Galicia, which allows for a much finer spatial detail. The simulation period covers the mid 21st century (2034-295), and we have used for comparison a present climate represented by 12 years with the atmospheric composition of the 1980's and 90's. Results indicate for the mid 21st century a warming of around 1.5°C in Galicia with respect to the current climate, much more pronounced in spring and summer than in the autumn and winter. The temperature increase affects both maxima and minima, and there is a much higher frequency of hot nights and hot days in the summer, with a more moderate frequency rise in the other seasons. In terms of precipitation, both the global and regional model indicate a remarkable reduction in spring and summer, and an increase, very important as well, in the autumn and winter. Even though results for precipitation are less robust due to the limited number of years in the simulation and to the uncertainty among different global models for our region, they suggest an increase in the “mediterraneity” of the climate, with a larger seasonality in the precipitation regime consistent with the expansion of the Hadley cell (northward advance of the Sahara desert) that many models predict as a response to global warming.

1. INTRODUCCIÓN

O Panel Intergubernamental para o Cambio Climático (IPCC) no seu segundo informe (IPCC, 1996) trouxo a primeiro plano da atención internacional o crecente consenso científico sobre que as actividades humanas estaban a causar alteracións no clima que posiblemente tivesen efecto non só no presente senón en escalas de tempo moito máis longas. En anos posteriores, novas análises confirmaron estas hipóteses (IPCC, 2007) e, polo tanto, era obvia a necesidade de cuantificar e explorar a natureza deses cambios no clima para preparar e defender a humanidade das súas posibles consecuencias.

O sistema climático non está formado soamente pola atmosfera, senón que océanos, superficie terrestre e vexetación forman parte importante del. Existen múltiples interaccións que adaptan estas distintas compoñentes entre si, de maneira que o sistema evoluciona como un todo. O tempo de resposta da atmosfera é bastante máis rápido que o dos outros subsistemas, polo que, en xeral, para a predición meteorolóxica a curto e medio prazo se usan modelos numéricos que resolven as ecuacións da atmosfera pero que non consideran cambios en océanos ou vexetación, polo menos de xeito acoplado. Non obstante, cando se consideran períodos de tempo máis longos, como os que se necesitan para definir o clima, faise imprescindible o uso de modelos máis complexos que simulen de xeito comprensivo o sistema climático, con especial énfase nas interaccións océano-atmosfera (de aí que se denominen AOGCM, Atmosphere-Ocean Global Circulation Models). Estes modelos informáticos son a ferramenta fundamental usada para explorar os cambios no clima debidos ao incremento das emisións de gases de invernadoiro de orixe antropoxénica.

Un escenario de cambio climático consiste nunha simulación climática dun destes AOGCM desde unhas condicións presentes cara a un futuro no que a composición da atmosfera vai variando a causa de emisións debidas á actividade antropoxénica. Cómpre, polo tanto, coñecer ou supoñer como van evolucionar esas emisións no futuro, o que vai depender en boa medida da evolución económica, social e tecnolóxica da sociedade a escala global.

2. ESCENARIOS DE EMISIÓNS

No *Informe especial sobre escenarios de emisións*, SRES (Special Report on Emissions Scenarios; IPCC, 2000), un equipo de expertos desenvolveu catro hipóteses plausibles de como será o desenvolvemento das condicións demográficas e económicas da humanidade no futuro próximo. A grandes trazos as catro alternativas son as seguintes:

A1: Un futuro de crecemento económico moi rápido, aumento lento da poboación e introdución rápida de tecnoloxías novas e máis eficientes. Converxencia económica entre as diferentes rexións do globo, cun aumento de interaccións culturais e sociais e unha redución substancial das diferenzas en renda *per capita* rexionais. Esta familia de escenarios A1 subdivídese en catro grupos dependendo de diferentes direccións de cambio tecnolóxico no sistema de produción enerxético.

A2: Un mundo moi heteroxéneo, con preservación das identidades e peculiaridades locais. Os patróns de fertilidade converxen moi lentamente entre as diferentes rexións e segue existindo un rápido crecemento da poboación a escala global. O crecemento económico prodúcese a escala rexional e o incremento de renda *per capita* e cambio tecnolóxico é máis fragmentado e lento que noutros escenarios.

B1: Un mundo converxente co mesmo crecemento lento da poboación que na liña de escenarios A1, pero con cambios rápidos nas estruturas económicas cara a unha economía da información e



de servizos, con introdución de tecnoloxías limpas e eficientes. Hai solucións globais para a sustentabilidade ambiental, económica e social, con diminución das desigualdades pero sen iniciativas climáticas adicionais.

B2: Un mundo en que se resaltan solucións locais para a sustentabilidade ambiental, económica e social. Crecemento da poboación moderado, niveis intermedios de desenvolvemento económico e cambio tecnolóxico menos rápido e máis diverso que nas liñas B1 e A1. Este escenario está tamén orientado cara á protección ambiental e a supresión das desigualdades sociais, pero con maior enfoque a niveis locais e rexionais.

Estas hipóteses ou patróns de desenvolvemento tradúcense a escenarios de emisións, é dicir, cuantifícase a cantidade de gases de invernadoiro que se van ir engadindo á atmosfera en cada un deles usando modelos matemáticos desenvolvidos baseándose na historia previa coñecida. En concreto, seis modelos de diferentes grupos de investigación de todo o mundo foron usados para organizar as catro familias de escenarios xerais en 40 escenarios de emisións. Estes pódense agrupar, pola súa vez, en 4 escenarios patrón, cada un característico dunha das familias (A1, A2, B1, B2), xunto con outros dous adicionais da familia A1, que son suficientes para representar a variabilidade asociada aos 40 escenarios orixinais, moitos dos cales resultan en patróns de emisións similares a pesar de partir de hipóteses de desenvolvemento humano diferentes.

2.a Escenario de emisións deste estudo

O *Informe especial sobre escenarios de emisións* (SRES) non lles asigna *a priori* probabilidades de ocorrencia aos diferentes escenarios; non obstante, debido á imposibilidade de consideralos todos, neste estudo escollemos entre os 6 representativos o escenario A1B, pertencente á familia de escenarios A1 mencionada anteriormente. As emisións globais de CO₂ neste escenario aumentan rapidamente na primeira metade do século XXI para chegar a un máximo ao redor de 2050, momento a partir do cal diminúen. En total a cantidade de emisións de gases de invernadoiro para o escenario A1B atópase nun nivel intermedio entre os demais escenarios, como se reflicte na figura 1.

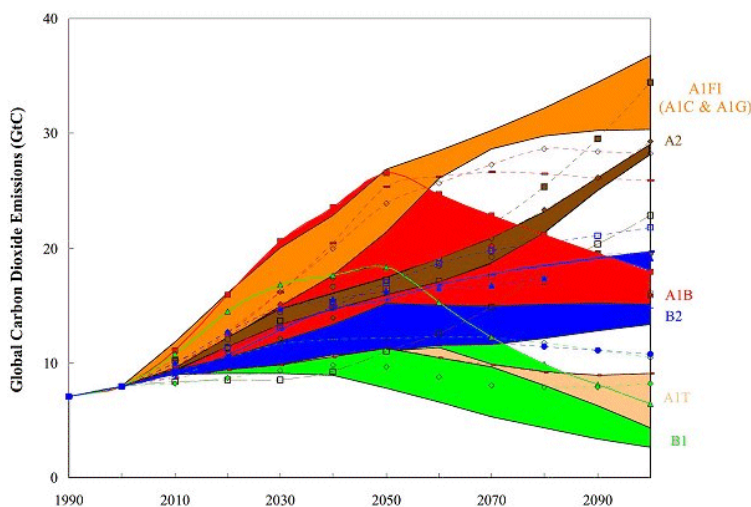


Figura 1. Rango de emisións globais de CO₂ ao longo do século XXI en GtC (xigatoneladas de dióxido de carbono, o peso de 1 km³ de CO₂) nos escenarios de emisións tipo do SRES. O escenario elixido para este estudo é o A1B, en vermello.

3. ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO DESTE ESTUDO: MODELO HADCM3

Despois de asumir unha hipótese de como evolucionarán as emisións de gases de invernadoiro no futuro, débese calcular como se verá afectado o clima a causa desas emisións. Utilízase un modelo climático global no que a composición gasosa da atmosfera e, polo tanto, as súas propiedades, van variando debido ás emisións antropoxénicas que dita o escenario de emisións pertinente. Como se mencionou anteriormente, un modelo climático contén non só un modelo da atmosfera, senón un modelo oceánico e outro de solos-vexetación; daquela, estamos ante unha complexa ferramenta informática que resolve numericamente as ecuacións dinámicas da atmosfera, océano e solos-vexetación simultaneamente. Debido á complexidade dos modelos e os períodos de simulación longos que se deben realizar (orde 100 anos), actualmente é aínda imposible alcanzar altas resolucións espaciais a escala global e por iso as celas dos modelos son de dimensións da orde de centos de quilómetros. O tempo de computación necesario aumenta polo menos nun factor 8 cada vez que se reducen as dimensións horizontais das celas do modelo á metade, xa que o número de puntos nas mallas aumenta un factor 2^2 e o paso de tempo debe reducirse tamén á metade ou menos, polo que se deben cubrir o dobre de pasos de integración para simular un mesmo período.

Aínda que os modelos climáticos están baseados todos nos mesmos principios xerais, é dicir, as ecuacións dinámicas da atmosfera e o océano, difiren nos métodos numéricos usados para resolvelas. Así mesmo, debido á crúa resolución, moitos procesos físicos con escalas espaciais menores que a resolución espacial do modelo, tales como a convención, a absorción e emisión de radiación, a formación e microfísica de nubes, etc., deben parametrizarse, para o que diferentes modelos usan distintas formulacións. Os modelos válidanse reproducindo o clima actual, para o que existen datos con que comparar, e suponse que seguirán simulando correctamente o clima cando se varíe a composición da atmosfera nun escenario futuro.

Existen números modelos globais que simularon escenarios de cambio climático a partir dos escenarios SRES mencionados anteriormente. Para este estudo escollemos o modelo HadCM3 do Hadley Center, pertencente á United Kingdom Met Office (UKMO, Instituto Nacional de Meteoroloxía do Reino Unido), un dos modelos que mellor reproduce o clima actual (Reichler and Kim, 2000). Así mesmo, conta coa peculiaridade de que unha versión do mesmo modelo é a que se utiliza para a predición global do tempo a curto prazo en UKMO, polo que se contrasta constantemente con situacións reais. As simulacións climáticas non reproducen o día a día observado, senón soamente as medias das diferentes variables a longo prazo. A resolución do modelo na atmosfera é de $3,75^\circ \times 2,5^\circ$ con 19 niveis verticais e no océano, de $1,25 \times 1,25$ con 20 niveis en profundidade (Gordon *et al.*, 2000).

3.a Cambio na temperatura estacional e anual

A figura 2 ilustra o cambio na temperatura media das diferentes estacións e a total anual na simulación do modelo global HadCM3 para o escenario de emisións A1B para a península Ibérica desde as condicións actuais cara á metade do século XXI (2030-2060). Cada unha das celas do modelo represéntase cunha cor que corresponde a un valor de diferenza de temperaturas de acordo coa escala mostrada na parte inferior da figura. O cru da resolución de $3,75^\circ \times 2,5^\circ$ só deixa entrever que haberá un aumento xeral da temperatura media, máis moderado na franxa norte e máis acusado na costa mediterránea, oscilando entre $0,5$ - 1°C na cela que engloba Galicia e os $2,5$ - 3°C na costa valenciana. O aumento non será uniforme ao longo do ano. No verán será moi pronunciado en todas as rexións salvo na franxa cantábrica, cunha máxima diferenza de temperaturas medias estivais de $+5^\circ\text{C}$ no Levante. No outono e no inverno os incrementos de temperaturas serán máis leves, de entre 1 - 2°C en toda a Península, mentres que na primavera roldará os $+2,5^\circ\text{C}$, salvo no norte.



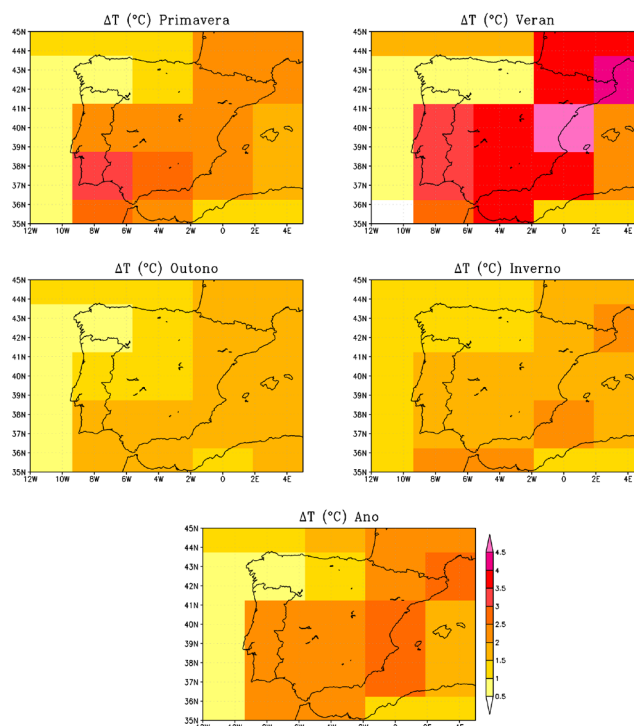


Figura 2. Cambio na temperatura media (°C) das distintas estacións e anual para a península Ibérica entre o clima de mediados do século XXI (2030-2060) e o actual no escenario de cambio climático xerado polo modelo global HadCM3 para o escenario de emisións A1B.

3.b Cambios na precipitación estacional e anual

Os cambios na precipitación total estacional e anual móstranse na figura 3 da mesma forma e para o mesmo período que na figura 2. Así como os cambios na temperatura son sempre na dirección de quentamento con maior ou menor intensidade segundo as estacións e a rexión, os cambios previstos por este modelo na precipitación presentan unha maior variabilidade, non soamente por estacións, senón entre os diferentes anos, con períodos secos e máis húmidos alternando en toda a Península que poden durar ata unha década. Isto complica a interpretación dos resultados mirando só unha ventá de 30 anos cara á metade do século. Este escenario de cambio climático mostra unha acentuada tendencia cara a primaveras significativamente máis secas, agás na franxa mediterránea, onde mesmo na zona máis árida da Península, no sueste, se prevé un incremento das precipitacións. O verán tamén se mostra máis seco en xeral, especialmente no sur. A excepción é de novo a costa mediterránea, especialmente o sueste, onde a cantidade de chuvia aumentará. Un panorama case inverso ao descrito para a primavera e o verán é o que o modelo produce para o outono e o inverno, cando as precipitacións aumentarán notablemente, sobre todo na zona atlántica. No mediterráneo o inverno será máis seco.

No total anual a compensación das tendencias positivas dunhas estacións coas negativas doutras fai que as variacións de precipitación previstas sexan moderadas en toda a Península, con reducións máximas de ao redor dun 20% na zona sur.

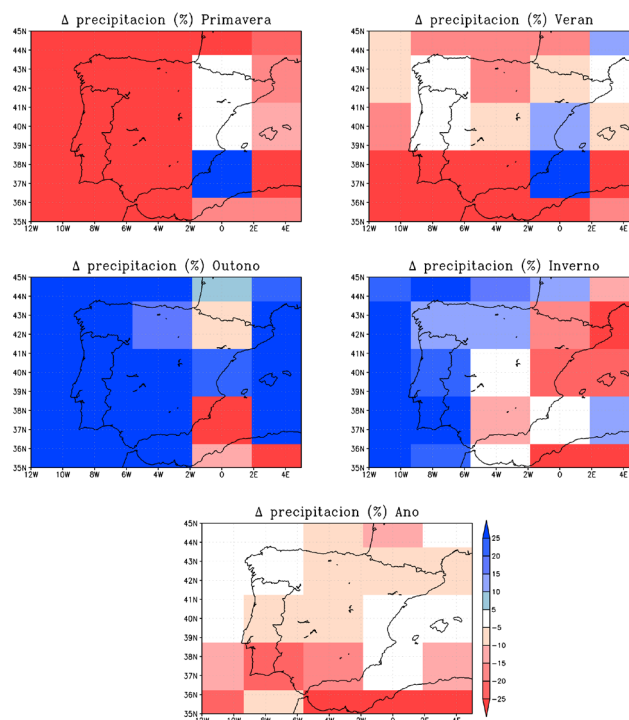


Figura 3. Cambio na precipitación media (%) nas distintas estacións e anual para a península Ibérica entre o clima de mediados do século XXI (2030-2060) e o actual no escenario de cambio climático xerado polo modelo global HadCM3 para o escenario de emisións A1B.

3.c Resultados con outro modelos globais

As seguintes figuras dan unha idea da variación que pode haber para a precipitación entre os resultados de diferentes modelos globais para un mesmo escenario de emisións (neste caso A1B para finais do século XXI). Están tomadas do 3rd Technical Report do proxecto ENSEMBLES (<http://ensembles-eu.metoffice.com>), do 6º Programa Marco da Comisión Europea (Cambio Global e Ecosistemas), no que sete modelos globais se usaron para xerar un conxunto de escenarios de cambio climático a partir dos escenarios de emisións SRES mencionados anteriormente.

Aínda que as desviacións estándar do conxunto de simulacións dos diferentes modelos son maiores nas zonas tropicais, existe tamén unha incerteza alta en canto á variación da precipitación no inverno no Atlántico norte, incluíndo as costas de Europa occidental e polo tanto Galicia. Algúns modelos predín incrementos; outros, reducións, en maior ou menor contía. En cambio, no verán todos os modelos tenden a reducir a precipitación sobre Europa con maior ou menor intensidade.



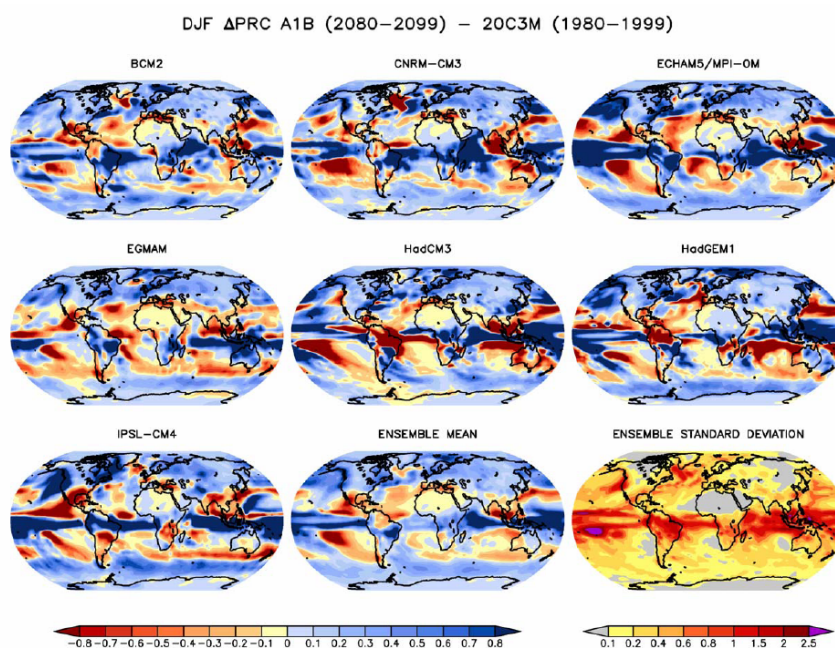


Figura 4. Cambio na precipitación media (mm/día) no inverno entre o período 2080-2099 e o de 1980-1999 en escenario de emisións A1B para modelos globais individuais, así como a media do conxunto de modelos e a desviación estándar dos cambios preditos polos diferentes modelos como medida do “spread” do conxunto. Para o modelo ECHAM5/MPI-OM e EGMAM, móstrase a media de 4 (3) simulacións diferentes. A barra da esquerda refírese ás anomalías de precipitación e a da dereita á desviación estándar. Tomada do 3rd Technical Report do projecto ENSEMBLES.

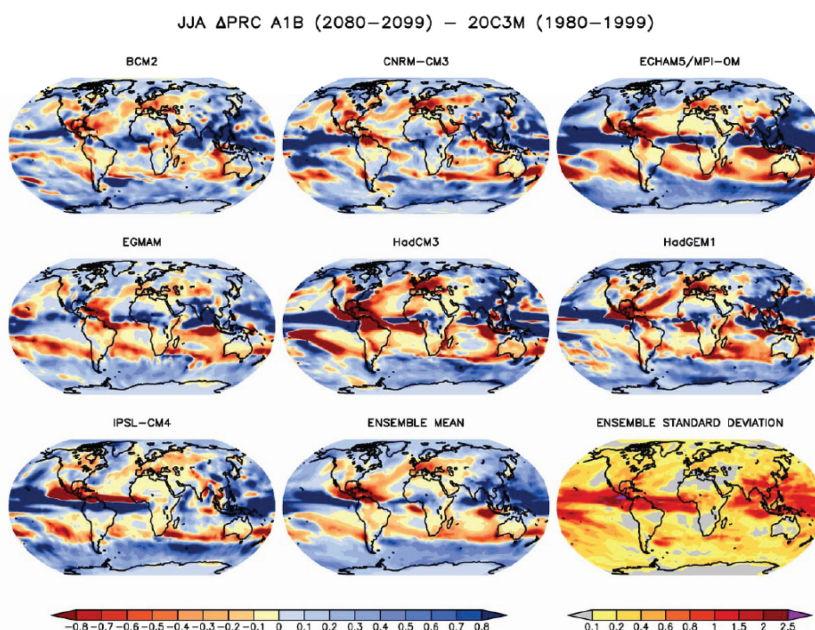


Figura 5. Igual que a figura 4 pero para o verán.

Para a temperatura todos os modelos predín incrementos, que en Europa occidental son moi superiores no verán que no inverno, tal como se mostraba para o modelo que utilizamos neste estudo (HadCM3) xa a mediados de século.

4. ESCENARIOS REXIONALIZADOS

4.a Técnica do “downscaling dinámico”

Debido ao cru da resolución empregada nos modelos globais, resulta difícil avaliar as predicións a unha escala rexional pequena como a galega. Toda Galicia queda contida dentro dunha cela do modelo, polo que a modulación climática que producen as montañas, as diferentes coberturas do terreo, etc., que teñen escalas espaciais moito menores, se perde. Estas simulacións teñen, polo tanto, unha grande incerteza nos cambios a escala rexional e esa incerteza é un obstáculo para avaliar o impacto do cambio climático na sociedade. Para intentar sortear esta dificultade e obter resultados cunha resolución maior sen ter que simular o clima de todo o globo, pódese utilizar unha estratexia chamada “downscaling dinámico”.

O termo “downscaling dinámico” refírese á técnica de obter simulacións moito máis detalladas empregando un procedemento similar a como se realizan predicións do tempo a curto prazo, é dicir usando un modelo de malla limitada a unha pequena porción do globo con condicións de contorno provenientes do modelo global. Que o dominio sexa rexional permite alcanzar unha máis alta resolución e, polo tanto, recrear as escalas dinámicas pequenas non presentes na simulación global de partida, o que posibilita estudar con moito máis detalle os patróns de cambio climático para a rexión de interese.

4.b O modelo RAMS (Regional Atmospheric Modeling System)

O modelo usado para a rexionalización dos escenarios de cambio climático do modelo global é o Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) versión 4.3, desenvolvido orixinalmente na Colorado State University [Pielke *et al.*, 1992; Cotton *et al.*, 2003,], e baseado nas ecuacións hidrodinámicas non hidrostáticas e compresibles. RAMS usa unha coordenada vertical sigma-z que segue o terreo e un esquema temporal de diferenzas finitas híbrido implícito en vertical. Os esquemas de parametrización de procesos físicos que se utilizaron foron para a turbulencia o esquema Mellor and Yamada [1974], o esquema convectivo Kain-Fritsch [Kain and Fritsch, 1990, 1993] e a microfísica de nubes explícita de RAMS con ecuacións prognósticas de auga de nube, xeo e sarabia. Para a radiación desenvolveuse no modelo, especificamente para este estudo climático, o esquema do Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), tanto para radiación de onda longa (Fels and Schwarzkopf, 1975; Schwarzkopf and Fels, 1985; Schwarzkopf and Fels, 1991) como de onda curta (Lacis and Hansen 1974), debido a que foi probado extensivamente en modelos climáticos en simulacións longas con bos resultados. O modelo de solo e vexetación de RAMS, LEAF (Walko *et al.*, 2000) recentemente modificado para incluír hidroloxía (Miguez-Macho *et al.*, 2007), emprégase sen esta, pero conservando o esquema que permite unha maior resolución espacial, tanto horizontal como en profundidade, chegando o solo ata 4 m con 14 capas. Isto aumenta a inercia do solo cunha dinámica máis realista en simulacións longas como as aquí levadas a cabo, especialmente en lugares onde a capa freática non está cerca da superficie.

A malla horizontal usa unha proxección polar rotada, co polo próximo a Galicia, que se atopa aproximadamente no centro do dominio. Esta configuración confire a estas simulacións orixinalidade sobre outras centradas en Europa, xa que Galicia se atopa sempre en estas demasiado preto do bordo dos dominios.



Unha das debilidades da técnica do “*downscaling* dinámico” é que, ao resolverse as ecuacións hidrodinámicas nunha área limitada cos valores das variables nos bordos especificados a partir dos que subministra o modelo global, as condicións de contorno son en numerosas ocasións redundantes. Isto causa conflitos entre a dinámica atmosférica creada polo modelo rexional e a do global que se traducen en distorsións non só locais nas inmediacións dos bordos, senón tamén das ondas sinópticas, o que afecta á calidade da simulación en todo o interior da malla. A versión de RAMS usada aquí inclúe a técnica de “*spectral nudging*” (Miguez-Macho et al., 2004), coa que as ondas sinópticas na solución do modelo rexional se relaxan cara ás do modelo global, de maneira que se alivian en gran parte os problemas derivados das condicións de contorno citados anteriormente.

A resolución espacial empregada é de 25 km en horizontal, con 216 x 180 puntos, e variable en vertical, cun total de 30 niveis máis próximos entre si na parte baixa da atmosfera cerca do terreo e aumentando a separación ao ir ascendendo, de maneira que o dominio alcanza unha altura de aproximadamente 20 km, xa dentro da estratosfera. A resolución vertical mínima é de 100 m, co primeiro nivel a 50 m sobre a superficie, e a máxima de 1.200 m na alta troposfera e a estratosfera.

O solo e a vexetación teñen unha resolución dúas veces superior á da parte atmosférica, de forma que cada cela atmosférica comprende catro celas no solo-vexetación.

4.c Escenario de cambio climático

Aínda que se simula unha parte relativamente pequena do globo, o dominio do modelo rexional RAMS cobre unha parte importante do Atlántico nororiental, Europa occidental e o norte de África, e contén en realidade máis celas que o do modelo global debido á alta resolución empregada. Por este motivo, o tempo investido en realizar as simulacións aínda é considerable e os resultados que aquí se mostran son aínda preliminares. O modelo foi validado exhaustivamente para América do Norte, que contén climas similares ao noso, en estudos anteriores; para o dominio que nos ocupa só se realizou unha validación limitada a algúns anos, usando datos observados, con resultados satisfactorios.

O clima “presente” só cobre 12 anos de condicións atmosféricas cunha composición, incluíndo os gases de invernadoiro, similar á da década dos 80 e 90 do século XX. As condicións de mediados de século XXI refírense aos 18 anos desde 2034 a 2049 do escenario climático do modelo HadCM3 para o escenario de emisións A1B, ao que corresponden os resultados das figuras 2 e 3.

4.c.1 Cambio na temperatura estacional e anual

A figura 6 mostra os cambios na temperatura media das diferentes estacións e na anual entre finais do século XX e mediados do século XXI para este escenario A1B. Prodúcese incrementos en todas as estacións que son máis pronunciados no verán, cando o aumento de temperatura media supera os 2,5 °C en todo o país. Na primavera o quentamento oscila ao redor de 2 °C, algo inferior na costa norte e superior no val do Miño-Sil. No outono, a temperatura media aumenta ao redor de 1 °C en xeral, algo menos na costa norte. No inverno o quentamento é de arredor de 1,25 °C practicamente en toda Galicia. Como resultado destas variacións, a temperatura media anual incrementase ao redor de 1,5 °C bastante uniformemente en Galicia.

A figura 7 corresponde aos cambios nas temperaturas máximas medias para as diferentes estacións. Na primavera as máximas aumentan arredor de 2 °C en case toda Galicia, algo menos na costa noroeste. No verán prodúcese o incremento maior, superior a 2,5 °C nas zonas costeiras e a área

montañosa da provincia de Ourense e arredor de 2,25 °C no resto de Galicia. No outono prodúcese o menor aumento nas máximas, que vai de menos de 1 °C nas zonas montañosas do leste e costa noroccidental a un máximo de 1,25 °C nas Rías Baixas. No inverno o incremento é de 1,5 °C en xeral, algo menor na franxa costeira atlántica e canto máis ao interior.

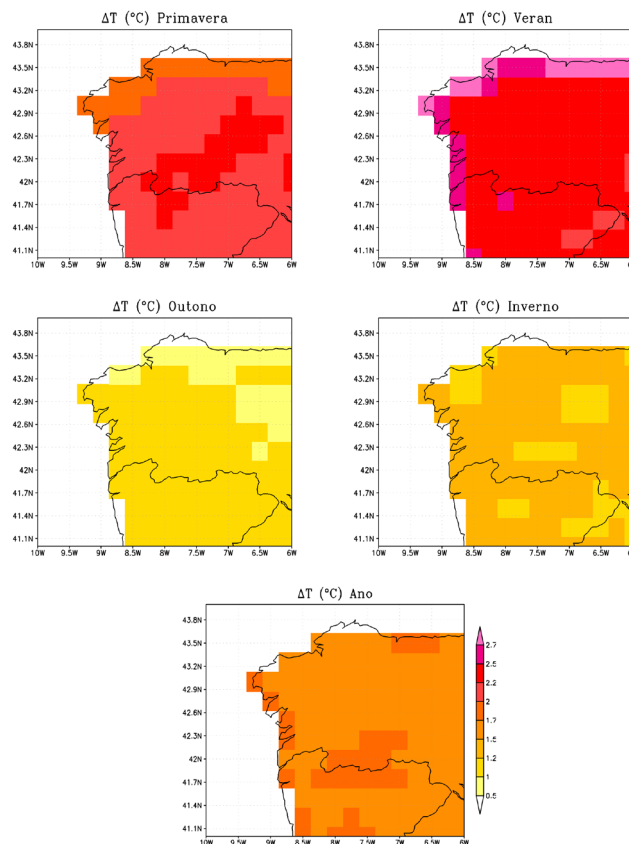


Figura 6. Cambio na temperatura media (°C) das distintas estacións e anual para Galicia entre o clima de mediados do século XXI (2034-2051) e o actual (1984-1995), xerado polo modelo climático rexional RAMS, que usa condicións de contorno do escenario de cambio climático do modelo global HadCM3 para o escenario de emisións A1B.

En canto ás temperaturas mínimas medias, a figura 8 corresponde aos cambios que se predín para as distintas estacións. En primavera o aumento é de maior nas zonas de maior elevación do sueste e leste de Galicia con aumentos superiores aos 2 °C e máis moderado nas provincias atlánticas con valores de 1,5 °C. No verán, como no caso das máximas, prodúcese tamén o maior incremento das temperaturas mínimas medias, con valores que van dos 1,5 °C no val do Miño aos 2,75 °C na costa noroccidental. No outono e no inverno as mínimas aumentan só moderadamente, menos de 1 °C en practicamente todo o país.



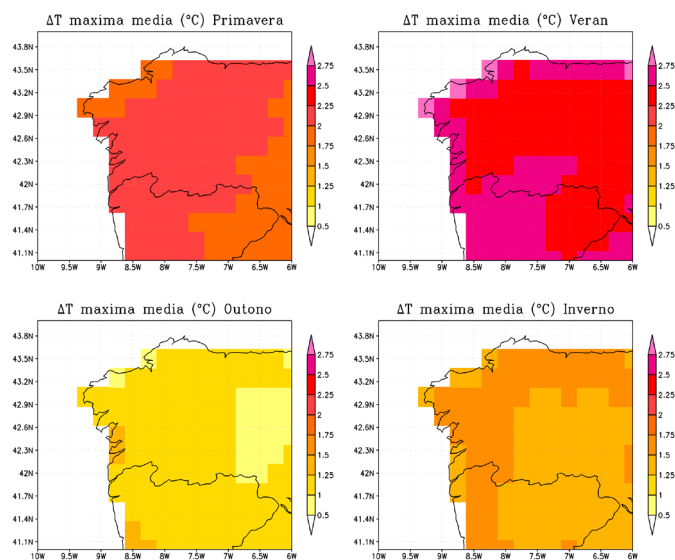


Figura 7. Cambio nas temperaturas máximas medias ($^{\circ}\text{C}$) das distintas estacións para Galicia entre o clima de mediados do século XXI (2034-2051) e o actual (1984-1995) xerado polo modelo climático rexional RAMS, que usa condicións de contorno do escenario de cambio climático do modelo global HadCM3 para o escenario de emisións A1B.

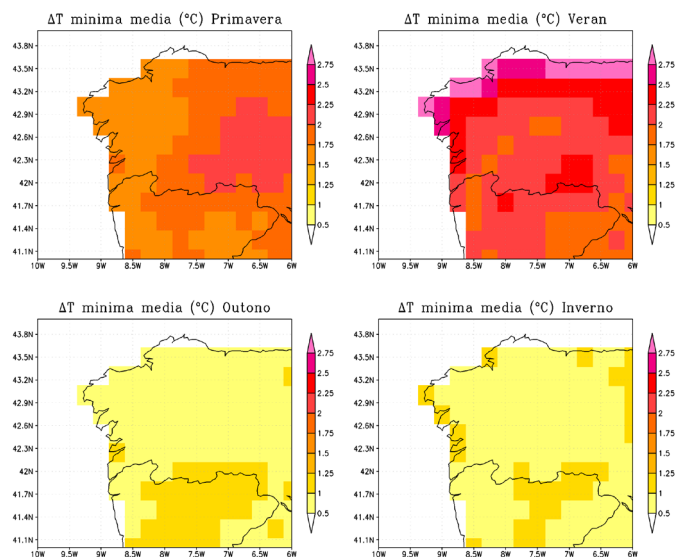


Figura 8. O mesmo que a figura 7 pero para as temperaturas mínimas medias.

4.c.2. Cambio nos extremos de temperatura

A figura 9 mostra o incremento esperado no número de noites cálidas, aquelas onde a temperatura mínima excede o percentil 95 das mínimas calculadas para o clima actual. Na primavera o incremento esperado está entre os 5-10 días en case toda Galicia, algo inferior na zona de Santiago de Compostela e superior a 10 días nos Ancares. No verán o aumento é moi notable na franxa costeira e sueste de Galicia, con incrementos da orde de 25 días. No interior de Galicia o incremento é duns 10 días e algo inferior na zona de Lugo. No outono o número de noites cálidas aumenta só moderadamente, arredor de 3-4 días en boa parte de Galicia, salvo na costa occidental e interior sueste, onde o incremento é de entre 5-10 días. No inverno o aumento é tamén moderado, inferior a 5 días na zona norte e noroeste e algo maior, entre 5 e 10 días, no resto do país.

O número de días cálidos, nos que a temperatura máxima excede o percentil 95 das máximas calculadas para o clima actual, mostra tamén importantes variacións no clima simulado de mediados do século XXI para este escenario de cambio climático (figura 10). En primavera o incremento de días cálidos é de entre 5-10 en toda Galicia, mentres que no verán se produce un notable aumento xeral da orde de 30 días. No outono o aumento é moderado, inferior a 5 días na metade norte de Galicia e algo superior no sur, de entre 5-10 días. No inverno os incrementos son semellantes aos do outono, pero agora a dirección de aumento é diferente, xa que vai desde a costa occidental, con valores inferiores a 5 días, cara ao interior, onde se sitúan entre 5 e 10 días.

O número de días e noites fríos definidos a partir do clima actual diminúe en todas as estacións, especialmente no verán, cando se reducen a frecuencias inferiores ao día por ano.

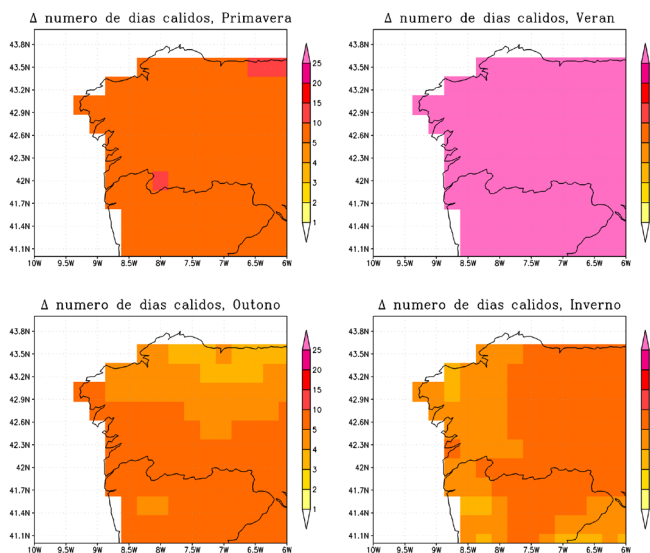


Figura 10. O mesmo que a figura 9 pero para o cambio no número de días cálidos.



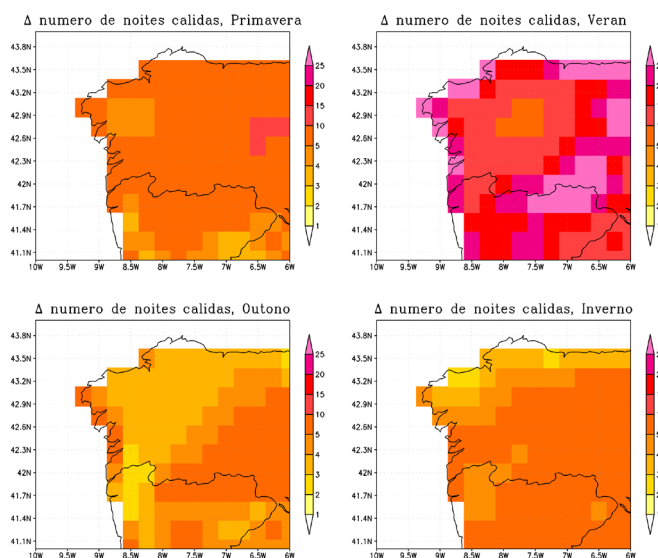


Figura 9. Cambio no número de noites cálidas nas distintas estacións para Galicia entre o clima de mediados do século XXI (2034-2051) e o actual (1984-1995), xerado polo modelo climático rexional RAMS, que usa condicións de contorno do escenario de cambio climático do modelo global HadCM3 para o escenario de emisións A1B.

4.c.3 Cambio na precipitación estacional e anual

A precipitación é a variable máis difícil de simular para os modelos, e tamén a que pode presentar un comportamento máis heteroxéneo, tanto espacial como temporalmente. Debido a que a simulación do modelo rexional non cobre un número suficiente de anos, os resultados deben avaliarse con cautela. A figura 11 mostra as variacións na precipitación estacional e anual entre os 18 anos simulados a mediados do século XXI e 12 anos de finais do século XX. Igual que o modelo global que proporciona as condicións de contorno, obsérvase un comportamento moi dispar entre a primavera e o verán por un lado e o outono e o inverno por outro. Hai grandes reducións de precipitación en toda Galicia superiores ao 25% na primavera. No verán, a costa noroccidental presenta incrementos de precipitación tamén superiores ao 25%, mentres que o resto do país mostra na súa maior parte reducións importantes. No outono e no inverno os aumentos de precipitación superan o 25% en toda Galicia. Os totais anuais mostran incrementos practicamente en todo o país, sobre todo nos montes que compoñen a dorsal galega, onde alcanzan o 25%.

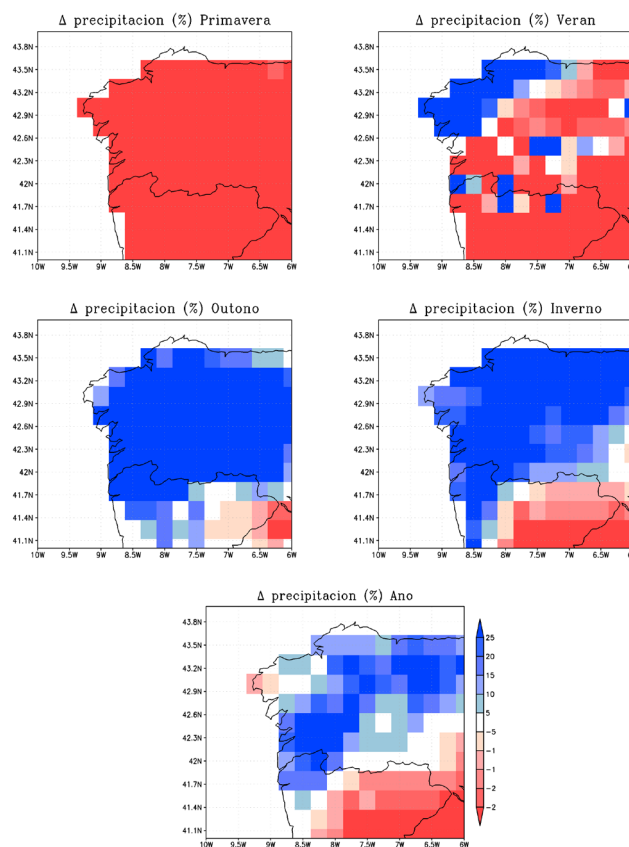


Figura 11. Cambio na precipitación media (%) das distintas estacións e anual para Galicia entre o clima de mediados do século XXI (2034-2051) e o actual (1984-1995), xerado polo modelo climático rexional RAMS, que usa condicións de contorno do escenario de cambio climático do modelo global HadCM3 para o escenario de emisións A1B.

5. RESULTADOS DOUTROS ESTUDOS

Para acoutar a incerteza asociada ás predicións feitas polo modelo rexional, convén comparar os resultados cos doutros estudos realizados con outros modelos e para diferentes escenarios de emisións. Na figura 12 represéntanse (esquerda de cada panel) as proxeccións medias anuais correspondentes a varios modelos globais, escenario de emisións (A2 e B2) e métodos de rexionalización (dinámico como o deste estudo ou ben estatístico). Os resultados rexionalizados proveñen do 5º Programa Marco de Investigación e Desenvolvemento da Unión Europea relacionados con modelización climática, rexionalización dinámica (proxecto PRUDENCE; <http://prudence.dmi.dk/>) e estatística (proxecto STARDEX, <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex>).

Á dereita de cada panel sinálase a evolución dos valores medios e da dispersión (*spread*) representada en forma de +/- desviación estándar arredor do valor medio. As rexionalizacións están baseadas en diferentes métodos estatísticos, salvo nos últimos trinta anos do século XXI, cando se incorporan as proxeccións realizadas no marco do proxecto PRUDENCE, feitas de xeito similar á deste traballo, usando modelos climáticos rexionais pero enfocadas sobre o conxunto de Europa e a unha resolución espacial de 50 km. A gráfica está obtida do *Primer informe de seguimiento sobre*



el desarrollo del Plan Nacional de Adaptación al Cambio climático 2008, elaborado pola Dirección General de la Oficina Española de Cambio Climático do Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, en colaboración coa Agencia Estatal de Meteorología, a Dirección General del Agua, a Dirección General de Medio Natural y Política Forestal e a Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar.

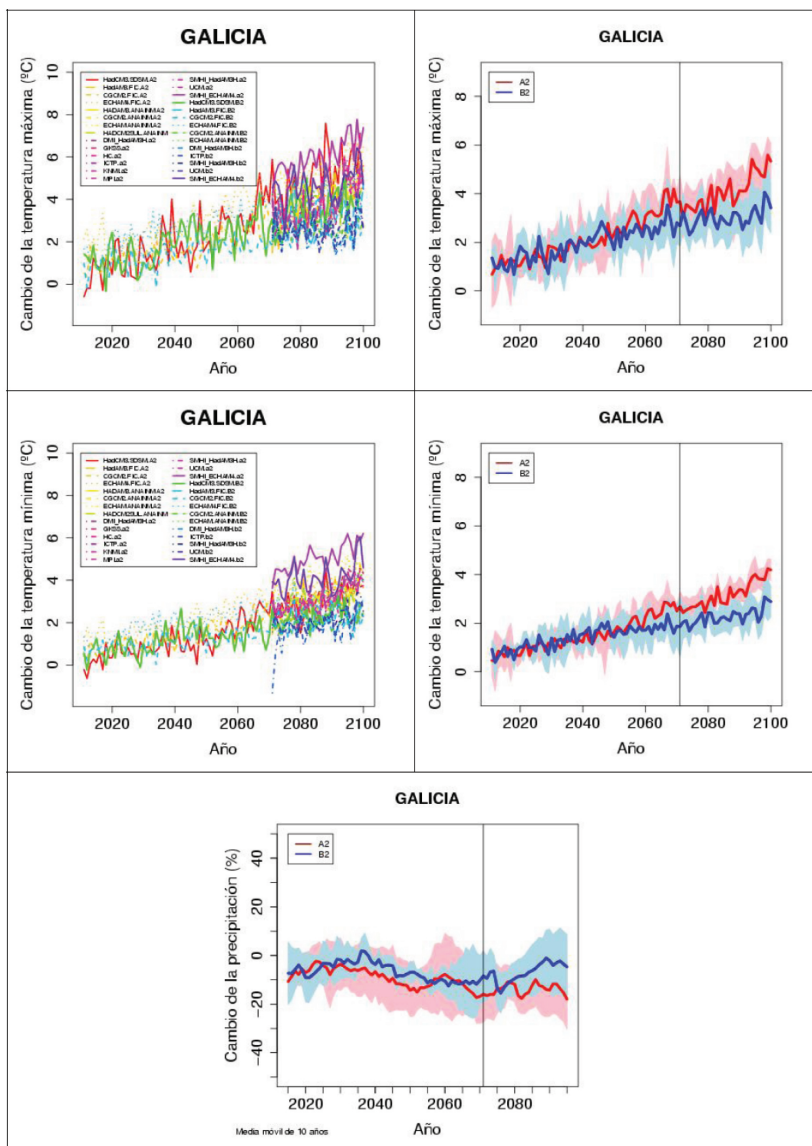


Figura 12. Evolución do cambio de Tmax (arriba esquerda) e Tmin (centro esquerda) anual media en Galicia obtida con diferentes modelos globais, técnicas de rexionalización e escenarios de emisión respecto ao valor media de referencia no período (1961-1990). Evolución do valor medio (curva continua) e valor medio \pm desviación estándar (sombreado) para Tmax (arriba dereita), Tmin (centro dereita) e precipitación (abaixo). [A curva correspondente ao valor medio da precipitación representa a media móbil centrada para un período de 10 anos]. Figura tomada do *Primer informe de seguimiento sobre el desarrollo del Plan Nacional de Adaptación al Cambio climático 2008*, elaborado pola Dirección General de la Oficina Española de Cambio Climático do Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Os resultados de todos o modelos predín un incremento de temperatura para Galicia ao longo do século XXI, que a mediados de século alcanzará un valor semellante ou un pouco superior ao obtido neste estudo, duns 2 °C. En canto á precipitación, prevese nestas simulacións unha variación pequena seguida dunha redución na segunda metade do século. É de destacar que, ao incorporar os resultados dos modelos rexionais nos últimos 30 anos do século, a tendencia se inverte, e, no caso do escenario B2 (curva azul), cunha cantidade de emisións semellante á do escenario A1B usado neste estudo, algúns modelos presentan un incremento de precipitación con respecto ao clima actual.

6. CONCLUSIÓN

Todos os estudos con modelos globais e rexionais mostran que, se as emisións de gases de invernadoiro se seguen incrementando a un ritmo semellante ao actual, no século XXI producirase un cambio climático global (probablemente xa este a producirse). Neste traballo realizamos un estudo máis detallado da evolución do clima de Galicia no futuro próximo (mediados do século XXI) usando un modelo climático rexional (RAMS) aniñado no escenario de cambio climático xerado polo modelo HadCM3 para un escenario de emisións intermedio A1B.

Os resultados máis destacados que obtemos son os seguintes:

O aumento da temperatura media anual roldará o 1,5 °C en toda Galicia, e será moi superior na primavera e, especialmente, no verán que no outono e inverno. O número de días cálidos aumentará sensiblemente no verán, así como as noites cálidas na costa e algo menos en zonas do interior.

En canto á precipitación, prevese unha diminución importante na primavera e no verán (agás na costa noroeste) e un aumento considerable na mesma magnitude no outono e no inverno, superior ao 25%. A media anual terá un aumento máis moderado, pero, aínda así, alcanzará o 25% nas montañas da dorsal galega.

Os resultados de temperatura son consistentes cos de practicamente todos os modelos globais e rexionais en diferentes escenarios de emisións, polo que se poden considerar robustos.

Os resultados de precipitación, en parte debido a que o número de anos simulados non é o suficientemente extenso, non se poden considerar tan firmes. A precipitación é o parámetro máis difícil de modelar e o que presenta maior variación espacial e temporal. Os resultados do noso estudo son cualitativamente semellantes aos do escenario global no que se aniña o modelo rexional. Non obstante, hai que ter presente que, malia que todos os modelos globais indican un aumento da precipitación global debido a que unha atmosfera máis quente pode conter unha maior cantidade de humidade, a distribución deste incremento de precipitación non é homoxénea e, en moitas zonas, aparecen importantes reducións.

No caso do sur de Europa, estas reducións de precipitación e o aumento da estacionalidade están relacionados coa expansión cara ao norte da cela de Hadley (Lu *et al.*, 2007) que predín os modelos nun clima máis quente, é dicir, da extensión cara ao norte do deserto do Sáhara. Galicia atópase o suficientemente ao norte como para que en moitos modelos no outono-inverno aínda se vexa afectada polo paso das fronte e borrascas como no clima actual, coa excepción de que o aire contén unha maior humidade debido ao quentamento global. Isto explica o posible aumento da precipitación. Non obstante, a estación de chuvias vese reducida ao aumentar a “mediterraneidade” do clima e o verán e a primavera serán moito máis secos e cálidos que os actuais. Abondaría con que a expansión da rama norte da cela de Hadley fose un pouco máis pronunciada para que a redución de precipitación en Galicia se estendese a practicamente todo o ano, de aí a incerteza considerable que existe nos modelos na nosa zona en canto á precipitación total.



BIBLIOGRAFÍA

- Cotton R. W. and coauthors (2003). RAMS 2001: Current status and future directions. *Meteor. Atmos. Phys.*, **82**, 5-29.
- Dirección General de la Oficina Española de Cambio Climático del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, en colaboración coa Agencia Estatal de Meteorología, Dirección General del Agua, Dirección General de Medio Natural y Política Forestal e Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar (2008). *Primer informe de seguimiento sobre el desarrollo del Plan Nacional de Adaptación al Cambio climático 2008*, 63 pp.
- Gordon C., Cooper C., Senior C. A., Banks H., Gregory J. M., Johns T. C., Mitchell J. F. B. and Wood R. A. (2000). The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transport in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dyn.*, **16**, 147-168.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (1996). *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. J. T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell, (eds.), 572 pp. Cambridge University Press. Cambridge, U. K
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2000). *Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. N. Nakicenovic and R. Swart (eds.), 599 pp. Cambridge Univ. Press, New York.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. S. Solomon *et al.* (eds.), 987 pp. Cambridge Univ. Press, New York.
- Fels S. B. and Schwarzkopf M. D. (1975). The simplified exchange approximation: a new method for radiative transfer calculations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **32**(7), 1475-1488.
- Kain J. S. and Fritsch J. M. (1990). A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1890-1910.
- Kain J. S. and Fritsch J. M. (1993). Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*, *Meteor. Monogr.*, **46**, Amer. Meteor. Soc., 165-170.
- Lacis A. A. and Hansen J. E. (1974). A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 118-133
- Lu J., Vecchi G. A. and Reichler T. (2007). Expansion of the Hadley cell under global warming, *Geophys. Res. L.*, **34**, DOI:10.1029/2006GL028443.
- Miguez-Macho G., Fan Y., Weaver C. P., Walko R. and Robock A. (2007). Incorporating water table dynamics in climate modeling: 2. Formulation, validation, and soil moisture simulation, *J. Geophys. Res.*, **112**, D13108, DOI:10.1029/2006JD008112
- Mellor G. L. and Yamada T. (1974). A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1791-1806.
- Miguez-Macho G., Stenchikov G. and Robock A. (2004). Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate model simulations, *J. Geophys. Res.*, **109**, D13104, doi:10.1029/2003JD004495.

- Niehörster F., Fast I., Huebener H. and Cubasch U. (2008). The stream one ENSEMBLES projections of future climate change. ENSEMBLES Technical Report N.º 3 (http://ensembles-eu.metoffice.com/tech_reports.html), 30 pp.
- Pielke R. A. and coauthors (1992). A comprehensive meteorological modeling system—RAMS. *Meteor. Atmos. Phys.*, **49**, 65-78.
- Reichler T. and Kim J. (2008). How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 303-311.
- Schwarzkopf M. D. and Fels S. B. (1991). The simplified exchange method revisited: An accurate, rapid method for computation of infrared cooling rates and fluxes. *Journal of Geophysical Research*, **96**(D5), 9075-9096.
- Schwarzkopf M. D. and Fels S. B. (1985). Improvements to the algorithm for computing CO₂ transmissivities and cooling rates. *Journal of Geophysical Research*, **90**(C10), 10,541-10,550.
- Walko, R. L. and coauthors (2000). Coupled atmosphere-biophysics-hydrology models for environmental modeling. *J. Appl. Meteor.*, **39**, 931-944.

