

# Alterações Climáticas em Portugal: projeções de alta resolução

Rita M. Cardoso<sup>1</sup>, Pedro M.M. Soares<sup>1</sup>, Daniela C.A. Lima<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa, Portugal  
rncardoso@fc.ul.pt

## Resumo

Os últimos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas afirmam de forma explícita que as alterações climáticas são o resultado da ação antrópica. Os modelos globais e regionais de clima são a única forma para avaliar e efetuar projeções de alterações climáticas futuras. Assim, estabeleceram-se consórcios internacionais de modelação climática que permitem o estabelecimento de cenários climáticos futuros. Aqui, recorrendo às simulações climáticas do consórcio do EURO-CORDEX, apresentam-se os resultados das projeções sintetizadas para Portugal. De acordo com os cenários aqui apresentados, Portugal terá uma redução significativa da precipitação, associada a um aumento de eventos com precipitação extrema. As alterações climáticas far-se-ão sentir mais intensamente no final do século, particularmente na primavera e outono. Estes cenários revelam a intensificação da vulnerabilidade hídrica do país não só em termos de precipitação média com também em termos de extremos (secas ou inundações). As alterações da temperatura em território nacional serão mais severas nas zonas do interior, particularmente no nordeste transmontano e Beira Interior. Em termos de média anual, são expectáveis subidas máximas de 4,5 °C no interior e de 3 °C a 4 °C nas zonas costeiras. Mesmo no cenário mais moderado, a temperatura máxima média será, a meio do século, 1 °C mais elevada do que a de 1971-2000. No caso da temperatura mínima, projeta-se uma redução significativa de dias frios e com geada, mas também aumentos significativos de noites tropicais. As subidas de ambas as temperaturas nas estações intermédias (primavera e outono) terão reflexos no aumento do período de crescimento das plantas e antecipação dos períodos de florescimento e maturação de várias espécies. A amplificação das temperaturas máximas no verão conjugada com a redução da precipitação aumentará o stress hídrico podendo amplificar a mortalidade de algumas espécies.

## 1. Introdução

O clima das zonas mediterrânicas é caracterizado por invernos temperados e húmidos e por verões secos e quentes, representando os grandes gradientes espaço-temporais de

precipitação a grande vulnerabilidade desta região às alterações climáticas. De 1850 até 2020, a temperatura média global aumentou em média 1,09 °C, entre 0,95 °C e 1,20 °C, sendo os derradeiros 30 anos os mais quentes dos últimos 1400 anos [1] e com cada década mais quente do que as anteriores. Paralelamente ao aquecimento médio, registou-se uma intensificação dos eventos extremos [2, 3] e na Europa ocidental, de 1880 até 2005, a amplitude térmica diária não só aumentou cerca de 6 % como triplicou a frequência do número de dias com temperaturas acima dos 35 °C [4]. Estas alterações são inequivocamente resultantes da ação antrópica [1]. A avaliação integrada destas transformações e das projeções de futuras alterações climáticas, a qualquer escala espacial (da global até à local) e temporal (da secular à horária) só podem ser realizadas recorrendo a conjuntos de resultados de simulações climáticas provenientes de modelos globais de clima (GCM) ou modelos regionais de clima (RCM). Só recorrendo a um ensemble de projeções é que é possível uma avaliação quantitativa destas e uma caracterização da sua incerteza inerente. Com este fim, a comunidade científica tem desenvolvido um conjunto de projetos coordenados para facultar projeções climáticas à escala planetária CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*), cujos modelos partilham vários aspetos computacionais. As projeções futuras do clima para diferentes cenários climáticos segue os procedimentos estabelecidos pelo Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC [1]). No projeto global CMIP5, utilizaram-se GCM, alicerçados na dinâmica e física da atmosfera, para obter uma coletânea de cenários passados (1800 até 2005) e de futuros (2005-2100). Nestes últimos, consideraram-se 4 cenários de emissão de gases com efeito de estufa, caracterizados pelo incremento da irradiância no final do sec XXI, em comparação com o período pré-industrial (RCP2.6, RCP4.5, RCP6, RCP8.5). O primeiro corresponde a um incremento do forçamento radiativo de 2,6 W/m<sup>2</sup> e neste caso, dois terços dos modelos pro-

jetam temperaturas globais superiores à temperatura pré-industrial entre 0,3 °C e 1,7 °C [5,6]. Dado o irrealismo do calendário de redução das emissões dos gases com efeito de estufa e dos desenvolvimentos tecnológicos necessários para a mitigação dos efeitos do aumento do CO<sub>2</sub>, este é o cenário menos verosímil e simulado. Em contrapartida, o cenário RCP8.5 assume emissões crescentes dos gases de efeito de estufa ao longo de todo o século XXI [7], representando um aumento da irradiância de 8,5 W/m<sup>2</sup> e um agravamento da temperatura entre 2,6 °C e 4,8 °C no final do século. Embora este seja o cenário mais severo e extremo, é também o mais credível se não houver alterações da taxa de emissões. No cenário intermédio, RCP4.5, as emissões estabilizam cerca de 2040 e em 2070 serão inferiores às atuais, enquanto no cenário RCP6 as emissões só estabilizam cerca de 2080. As projeções de dois terços dos modelos são, temperaturas superiores entre 1,1 °C e 2,6 °C no primeiro caso e 1,4 °C e 3,1 °C no segundo cenário. Todos os GCMs envolvidos no CMIP5 preveem um aumento maior das temperaturas de verão, com um incremento maior nas temperaturas máximas do que nas mínimas e vice-versa no inverno. Todos os modelos menos um, projetam uma redução da severidade e número dos eventos extremos de frio e inversamente, uma amplificação dos eventos extremos associados à temperatura máxima. Devido à amplificação da temperatura, é expectável que a quantidade de vapor de água na atmosfera aumente cerca de 7 %/K induzindo um incremento de precipitação global, que, no entanto, não será igualmente distribuída por todas as regiões. São expectáveis alterações de intensidade e dos padrões de precipitação, com as zonas secas tornando-se ainda mais secas e as húmidas mais húmidas [8, 9]. A resolução horizontal destes modelos é, no entanto, insuficiente para caracterizar os processos termo-hidrodinâmicos da atmosfera à escala regional ou local. Assim, para se efetuar uma avaliação dos impactos das alterações climáticas a estas escalas é necessária a utilização de coletâneas de modelos regionais de clima (RCM). Estes representam apenas uma fração do globo, necessitando por isso, de informação nos limites externos da região representada. Esta é facultada pelos GCM e, é o binómio RCM/GCM que é utilizado nas projeções regionais de clima. Nas últimas décadas, três projetos, coordenando os principais centros de meteorologia europeus, dedicaram-se à elaboração de cenários climáticos para o século XXI - PRUDENCE [10], ENSEMBLES [11, 12] e EURO-CORDEX [13]. Este último corresponde ao domínio europeu do *World Climate Research Program Coordinated Regional Downscaling Experiment* (CORDEX), onde um grande conjunto de simulações à escala continental é realizado usando os GCM do CMIP5 como condições fronteira. No EURO-CORDEX, foi definido um domínio europeu comum a todos os modelos, tendo as simulações duas resoluções horizontais – 0,44° (~50 km) e 0,11° (~12 km). Todos os modelos efetuaram simu-

lações para o período 1970-2100. A análise dos resultados revelou que a resolução mais baixa representa igualmente bem as características médias da atmosfera para grandes sub-regiões e para largas escalas temporais (anuais e sazonais). Os resultados das simulações revelaram a capacidade dos modelos de simular corretamente as características do clima europeu, incluindo a sua variabilidade espaço-temporal [14]. No entanto, e de uma forma geral, certas zonas da Europa são excessivamente húmidas com temperaturas inferiores às observadas e nalguns modelos, as temperaturas do sul e sudoeste europeu são mais elevadas do que as observadas. Os cenários do EURO-CORDEX evidenciam alterações robustas e significativas de temperatura e precipitação, que embora estejam alinhadas com as dos modelos globais, apresentam um maior detalhe espacial e temporal e alguma amplificação dos extremos em algumas regiões. Muito embora a representação dos extremos de temperatura e precipitação tenha associada uma maior incerteza, o aumento da resolução espacial reduz os erros, particularmente nas regiões costeiras e montanhosas, consubstanciando a necessidade da realização de simulações de alta resolução.

Dada a dispersão dos resultados individuais dos diversos modelos e dado que a qualidade dos modelos individuais varia consoante a variável analisada e das métricas utilizadas na avaliação, impossibilitando a determinação de o melhor modelo, a análise dos resultados deve ser efetuada de forma probabilística. A metodologia consensual para a redução da incerteza baseia-se na construção de ensembles onde os resultados dos modelos individuais são pesados de acordo com a sua performance [15]. Assume-se, assim, que se consegue reduzir a incerteza se os resultados dos “melhores” modelos pesarem mais na construção das projeções probabilísticas.

Os resultados da precipitação, temperatura máxima e mínima dos modelos do EURO-CORDEX para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, juntamente com os resultados de uma simulação de alta resolução do modelo WRF [16] para o cenário RCP8.5, são aqui analisados de modo a quantificar as alterações climáticas expectáveis para Portugal. A análise focar-se-á nos períodos 2041-2070 e 2071-2100, propondo-se a construção de ensembles multimodelo, de modo a reduzir a incerteza associada às projeções. Primeiro, os resultados correspondentes ao período histórico (1971-2000) são comparados com observações do Instituto Português do Mar e Atmosfera e é estabelecido um ranking de modelos. Em seguida, é efetuada a construção de ensembles, sendo estes igualmente avaliados. Por fim, analisam-se as projeções, quantificando o sinal das alterações climáticas dos períodos 2041-2070 e 2071-2100 relativamente ao clima de 1971-2000.

## 2. Dados e Métodos

### 2.1 Simulações EURO-CORDEX

A precipitação diária, temperatura máxima e mínima diária para as duas resoluções horizontais, 0,44° e 0,11°, do EURO-CORDEX foram obtidas no portal ESGF<sup>1</sup> (*Earth System Grid Federation*). Os resultados são provenientes de 9 institutos europeus (incluindo o Instituto Dom Luiz), correspondendo a 9 RCM diferentes. Dado que alguns dos RCMs utilizaram vários GCM como condições fronteira, esta análise inclui 19 simulações a 0,44° de resolução e 15 a 0,11°. Pormenores do

binómio RCM/GCM encontram-se descritos nas tabelas 1 de [17] e [18].

## 2.2 Simulações WRF

O modelo Weather Research and Forecasting (WRF) provou ser uma ferramenta assaz eficaz na simulação de alta resolução do clima atual da Península Ibérica; e.g. temperatura e precipitação [19,20]; ciclo de humidade [21]; vento junto à costa [22]; ciclo diurno da nebulosidade costeira [23]; estudos de propagação de fogo [24, 25] e caracterização de potencial de arrefecimento de edifícios [26]. A qualidade dos resultados validou as configurações da simulação de clima presente de modo a permitir a sua utilização em simulações de cenários climáticos. Os resultados para a precipitação e temperatura máxima e mínima do WRF forçado pelo GCM EC-EARTH [27] são aqui apresentados. Dada a elevada resolução horizontal destas simulações (9 km), optou-se por simular apenas o cenário RCP8.5 e os períodos 1971-2000 e 2071-2100.

## 2.3 Observações

A temperatura máxima e mínima para o período de 1971 a 2000 empregue na validação dos modelos, proveio de 42 estações meteorológicas do Instituto Português do Mar e Atmosfera (figura 1) e a validação da precipitação baseou-se na precipitação diária da grelha regular a 0,2° (~22 km) de resolução [28].

## 2.4 Construção do ensemble

A metodologia aqui descrita corresponde à de [17] e [18]. A capacidade de cada um dos modelos para descrever as características espaço-temporais do clima presente é avaliada recorrendo ao cálculo de métricas estatísticas. Assim, procurou-se investigar a correspondência entre os resultados dos modelos e as observações para o período 1971-2000. Para cada modelo, os valores da temperatura correspondem aos valores do ponto de grelha mais próximo da localização das estações observacionais. No caso da precipitação diária, a grelha de cada modelo foi interpolada para a grelha a 0,2° das observações. Para ambas as resoluções (0,44° e 0,11°) estabeleceu-se um ranking dos modelos para cada uma das métricas e o ensemble foi construído através da seleção dos três melhores modelos, no caso da precipitação [18] e através do produto ou da média dos rankings normalizados nos casos das temperaturas [17]. Para cada resolução, foi igualmente criado um ensemble resultante da média de todos os modelos. Para a precipitação, de todos os ensembles, o que revelou melhor performance foi aquele resultante da média dos três melhores modelos com

0,11° de resolução. Nas temperaturas, o ensemble a 0,11° de resolução resultante do produto dos rankings revelou ser o que exibiu melhores resultados. A tabela 1 apresenta os resultados de algumas das métricas calculadas para estes ensembles. A qualidade dos resultados é comprovada pelos baixos valores de vies e erros médios absolutos, a elevada correlação espacial, a sobreposição entre as distribuições ( $S = 100$ , sobreposição perfeita) e na proximidade de 1 do desvio padrão normalizado. De uma forma geral, os modelos são ligeiramente mais secos e frios do que as observações (vieses negativos).

A figura 1 ilustra a representação da precipitação e temperatura máxima e mínima dos dados observacionais do IPMA, dos ensembles multimodelo do EURO-CORDEX e do modelo WRF. Esta evidencia a clara capacidade do ensemble e WRF para representarem os gradientes norte-sul da precipitação e temperatura máxima, assim como os gradientes nordeste-sudoeste da temperatura mínima.

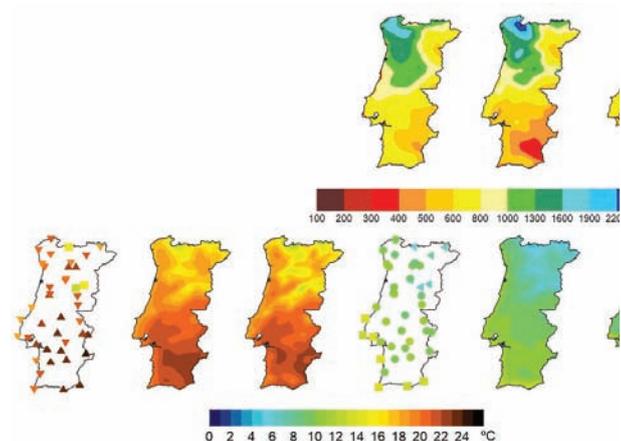


Figura 1 - Precipitação anual para a grelha 0,2° do IPMA, para o ensemble multimodelo EURO-CORDEX e WRF9km (linha superior). Temperatura máxima para as estações observacionais do IPMA, ensemble multimodelo EURO-CORDEX e WRF9km e temperatura mínima para as estações observacionais do IPMA, ensemble multimodelo EURO-CORDEX e WRF9km (linha inferior)

Tabela 1 Erros globais do ensemble multimodelo do EURO-CORDEX e do WRF9km

	Ensemble	Vies%	EMA%	Desvio Padrão Normalizado	Correlação Espacial	S
Prec.	ENS_S_0.11	-6.54	15.76	1.08	0.93	95.53
	WRF9km	-7.04	20.3	1.05	0.80	94.2
	Ensemble	Vies	EMA	Desvio Padrão Normalizado	Correlação Espacial	S
Tmax	ENS_WP_0.11	-0.84	1.09	1.06	0.96	90.69
	WRF9km	-1.01	1.22	1.05	0.95	91.54
Tmin	ENS_WP_0.11	-0.36	1.08	1.05	0.87	92.60
	WRF9km	-1.41	1.82	1.05	0.73	87.95

## 3 Alterações climáticas para Portugal

### 3.1 Precipitação

A figura 2 apresenta as anomalias relativas da precipitação anual para o WRF e para o ensemble multimodelo EURO-CORDEX. Para cada um dos cenários consideraram-se projeções para dois períodos de 30 anos (2041-2070 e 2071-2100); sendo estes comparados com o período de referência 1971-2000. Para o primeiro período, prevêem-se reduções de precipitação inferiores a 10 % em praticamente todo o território continental exceto no sudoeste alentejano onde decréscimos entre 10 % e 15 % são expetáveis. O sinal das alterações climáticas para meio do século é semelhante para os dois cenários. No final do século, o sinal dos dois cenários é deveras díspar. No cenário RCP4.5 as emissões no final do século são inferiores às do período 2041-2070 prevendo-se um desagravamento das condições secas. Assim, nes-

te cenário a projeções apontam para uma redução maioritariamente inferior a 5 %. No cenário RCP8.5 as alterações da precipitação anual são muito significativas, sendo exetáveis decréscimos superiores a 20 % no sudoeste e sul de Portugal no caso do ensemble e maiores do que 25 % no caso da simulação WRF. Excetuando o litoral norte e algumas zonas do sudeste transmontano, as projeções apontam para precipitações anuais no período 2071-2100 inferiores entre 15 % e 20 % relativamente ao período histórico (1971-2000). Segundo [18] as alterações das taxas de precipitação ocorrerão essencialmente na primavera (-30 % a -40 %) e outono (-20 % a -30 %), não se prevendo alterações significativas na precipitação de inverno. Associada à redução da precipitação, é igualmente expectável uma redução de dias de chuva (figura 3). Enquanto entre 2041 e 2070 ambos os cenários apontam para diminuições entre 10 % e 15 %; no final do século XXI, o cenário mais drástico prevê reduções entre 15 % e 25 %. Este padrão é comum a todas a resoluções dos ensembles do EURO-CORDEX representando por isso um sinal robusto de alteração do número de dias com pluviosidade. A maior resolução da simulação WRF indica um decréscimo ainda mais acentuado no sul de Portugal. Reduções desta ordem de grandeza aumentam significativamente a vulnerabilidade hídrica do país. Segundo os mesmos autores, no final do século são expectáveis cerca de 120 dias por ano com precipitação no Noroeste, contrastando com apenas 70 dias no sudeste. As características da precipitação sofrerão também alterações significativas; prevendo-se um aumento da precipitação intensa (maior que 20 milímetros por dia) e uma redução dos dias com precipitações inferiores a 20 mm. A conjugação destes fatores não só reduzirá a capacidade dos solos para reterem água devido ao aumento da escorrência, como potenciará a erosão destes.

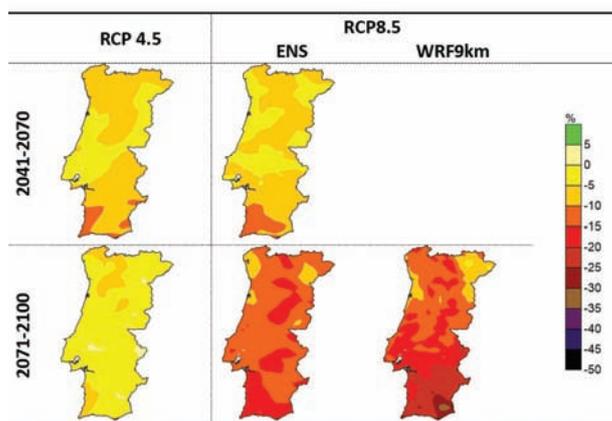


Figura 2 - Anomalias relativas da precipitação anual para WRF9km e para o *ensemble* multimodelo EURO-CORDEX ([2041-2070 menos 1971-2000]/[1971-2000] e [2071-2100 menos 1971-2000]/[1971-2000]).

### 3.2. Temperatura

As projeções para as alterações da temperatura são algo severas, particularmente para o cenário RCP8.5 (figuras 4 e 5). Note-se que as projeções para o meio

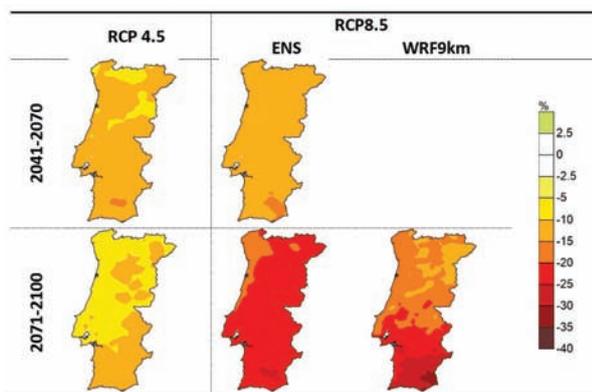


Figura 3 - Anomalias relativas do número de dias por ano com precipitação superior a 1mm. ([2041-2070 menos 1971-2000]/[1971-2000] e [2071-2100 menos 1971-2000]/[1971-2000]).

do século (2041-2070), no cenário RCP8.5 são semelhantes às do cenário RCP4.5 para o final do século. Em todas a projeções, as zonas do interior estarão sujeitas a maiores incrementos de temperatura e as alterações são mais significativas na temperatura máxima do que na mínima. Apesar do cenário RCP4.5 ser considerado um cenário moderado, a subida média da temperatura máxima entre 2041-2070 é superior a 1 °C relativamente a 1971-2000 e no final do século registar-se-ão aumentos superiores a 2 °C. No caso do cenário RCP8.5, as regiões do nordeste transmontano e Beira interior sofrerão incrementos superiores a 4,5 °C, enquanto as zonas costeiras registarão aumentos de 3 °C a 4 °C. As projeções do modelo WRF são mais amenas, no entanto, algumas zonas do interior sofrerão temperaturas máximas superiores em 4 °C relativamente ao período 1971-2000. [17] demonstra que apesar das diferenças entre os modelos individuais, o sinal dos vários modelos do ensemble do EURO-CORDEX é consistente entre cenários. No caso da temperatura máxima os incrementos mais relevantes ocorrem no verão e outono. No verão, projeta-se que no final do século, as temperaturas máximas no nordeste transmontano sejam superiores em 6 °C a 7 °C em relação a 1971-2000 (RCP8.5) e no outono esta será 5 °C a 6 °C mais elevada. A evolução decadal de dias com temperaturas muito quentes (máximas acima de 35 °C), exibe uma taxa de amplificação ao longo de todo o século no cenário RCP8.5, enquanto no cenário RCP4.5 esta abranda a partir de 2040. Entre 1971 e 2000 projetam-se cerca de 3 dias com temperatura máxima acima de 35 °C no ensemble multimodelo do EURO-CORDEX no período 1971-2000 e final do século, estes valores são 4 a 5 vezes mais elevados no cenário RCP8.5

Tal como para a temperatura máxima, em média, a temperatura mínima em 2041-2070 já será entre 1 °C a 2 °C superior à temperatura mínima de 1971-2000 (RCP4.5 e RCP8.5 respetivamente). Para o último trinténio do século XXI, as projeções no cenário mais severo (RCP8.5) apontam para temperaturas mínimas superiores em 3 °C a 4 °C. No caso do modelo WRF, o padrão das alterações está intimamente ligado à topografia e as projeções indicam incrementos de cerca de 3 °C. Tal como na temperatura máxima, é no verão que as alterações mais expressivas são expectáveis (maiores que 5 °C no nordeste transmontano). A evolução decadal, para todo o século XXI, do número de dias frios revela uma redução 12 dias para cerca de 1 dia por ano em 2071-2100 [17].

Em contraste, o número de noites tropicais (temperaturas mínimas superiores a 20 °C) aumenta de cerca de 10 dias por ano para 50 no cenário mais severo. Enquanto temperaturas mínimas mais elevadas no inverno contribuem para um aumento do conforto térmico, redução das geadas e redução da mortalidade associada ao frio, no verão contribuem para aumentar o desconforto térmico e a mortalidade pois dificultam o arrefecimento noturno do corpo humano.

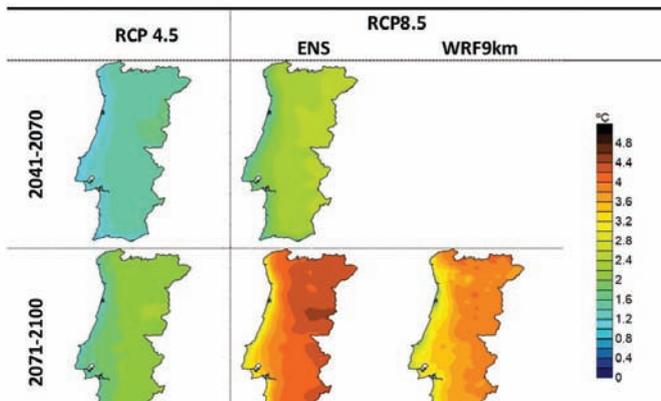


Figura 4 - Anomalias relativas da temperatura máxima média anual para WRF9km e para o *ensemble* multimodelo EURO-CORDEX ([2041-2070 menos 1971-2000]/[1971-2000] e [2071-2100 menos 1971-2000]/[1971-2000]).

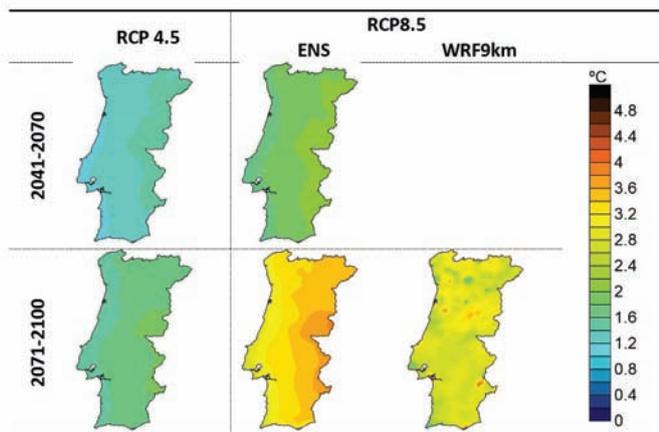


Figura 5 - Anomalias relativas da temperatura mínima média anual para WRF9km e para o *ensemble* multimodelo EURO-CORDEX ([2041-2070 menos 1971-2000]/[1971-2000] e [2071-2100 menos 1971-2000]/[1971-2000]).

#### 4. Considerações finais

O clima resulta de interações não lineares entre as várias componentes do sistema Terra, i.e., atmosfera, hidrosfera, criosfera, biosfera e litosfera. A complexidade dos processos termo-hidrodinâmicos, químicos e bioquímicos e o acoplamento entre os seus sistemas, levam a que a modelação climática seja a única ferramenta disponível para a obtenção de projeções futuras robustas. Nos anos 70, os GCM reproduziam apenas a dinâmica atmosfera, hoje, todo ciclo hidrológico, as interações com a superfície (oceano, solo e gelo), circulação oceânica, ciclo do carbono, química da atmosfera, cobertura vegetal e sua evolução sazonal a decadal e evolução da composição da atmosfera encontram-se representados nos modelos globais. Além da incerteza associada às projeções da evolução da composição da atmosfera e da ocupação do solo, nenhum modelo é capaz de simular de

forma perfeita todas as componentes do sistema. No entanto, estes já conseguem proporcionar uma imagem realista do clima atual e projetar de forma consistente um clima futuro que, devido ao aumento dos gases de efeito de estufa, será inevitavelmente mais quente. Os esforços para a redução da incerteza têm sido ajudados pelo aumento da capacidade computacional, possibilitando a ampliação da resolução horizontal e vertical dos modelos e um incremento do detalhe da representação de todos os processos, nomeadamente os de pequena escala (ex: convecção, formação de nuvens). No entanto, os progressos têm sido lentos, pois a inclusão destes últimos também introduz novas fontes de incerteza relacionadas com a sua representação. A construção de ensembles multimodelo demonstrou ser uma técnica que permite não só reduzir a incerteza dos resultados dos modelos como melhorar a qualidade das projeções, pois os ensembles têm uma performance melhor do que os modelos individuais. Embora os modelos individuais apresentem alguma dispersão de resultados, estes são na generalidade consistentes com as projeções do ensemble multimodelo.

Os grandes desafios que a modelação climática enfrenta estão relacionados com a representação do gelo terrestre, dos aerossóis e da química da atmosfera e a introdução de uma biosfera dinâmica que interage com o clima, alterando-o e sendo por ele transformada. Todos eles com impactos significativos no ciclo da água e do carbono, que podem atuar como amplificadores do efeito de estufa.

Nos próximos dois anos, vai ser efetuado um novo exercício de projeção climática à escala regional, utilizando os mais modernos modelos regionais de clima. Neste novo exercício do EURO-CORDEX, não só se utilizarão como forçadores os resultados provenientes da nova geração de modelos globais de clima, mas também serão incorporados novos processos, como aerossóis e alterações da vegetação. O Instituto Dom Luiz vai novamente participar neste consorcio, visando contribuir para uma avaliação robusta do impacto das alterações climáticas à escala regional.

#### Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através dos projetos LEADING (PTDC/CTA-MET/28914/2017) e UIDB/50019/2020 - Instituto Dom Luiz (IDL). Os autores gostariam de agradecer ao IPMA, I.P. pela disponibilização dos dados observados. Os autores gostariam igualmente de agradecer ao *World Climate Research Programme's Working Group on Regional Climate*, e ao *Working Group on Coupled Modelling*, coordenador do CORDEX e responsável pelo CMIP5. Por fim, os autores gostariam de agradecer aos grupos de modelação climática participantes no EURO-CORDEX, pela disponibilização dos seus dados.

## Referências

- [1] IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- [2] Della-Marta PM, Luterbacher J, Weissfluh HV, Xoplaki E, Brunet M, Wanner H (2007) Doubled length of Western European summer heat waves since 1880. *J Geo-phys Res* 112 doi:10.1029/2007JD008510
- [3] Moberg A, Jones P, Lister D, Walther A, Brunet M, Jacobeit J, Alexander L, Della-Marta P, Luterbacher J, Yiou P, Chen D, Tank A, Saladie O, Sigro J, Aguilar E, Alexandersson H, Almarza C, Auer I, Barriendos M, Begert M, Bergstrom H, Bohm R, Butler C, Caesar J, Drebs A, Founda D, Gerstengarbe F, Micela G, Maugeri M, Osterle H, Pandzic K, Petrakis M, Srnec L, Tolasz R, Tuomenvirta H, Werner P, Linderholm H, Philipp A, Wanner H, Xoplaki E (2006) Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901–2000. *J Geophys Res* 111 doi:10.1029/2006JD007103
- [4] Fischer EM, Schär C (2010) Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nat Geosci* 3(6):398–403. doi:10.1038/ngeo866
- [5] Moss RH, Edmonds JA et al (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463(7282):747–756
- [6] van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M et al. (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109: 5. doi:10.1007/s10584-011-0148-z
- [7] Riahi K, Rao S, Krey V, Cho C, Chirkov V, Fischer G, Kindermann G, Nakicenovic N, Rafaj P (2011) RCP 8.5 - A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 109: 33–57, doi: 10.1007/s10584-011-0149-y
- [8] Meehl GA, Stocker TF, Collins WD, Friedlingstein P et al (2007) Global climate projections. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds) *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the 4th assessment report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 747–846
- [9] Westra S, Fowler H, Evans JP, Alexander LV, Berg P, Johnson F, Kendon EJ, Lenderink G, Roberts NM (2014) Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Rev Geophys* 52. <http://dx.doi.org/10.1002/2014RG000464>
- [10] Christensen JH, Christensen OB (2007) A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of the century. *Clim Change* 81:7–30
- [11] Hewitt CD (2005) The ENSEMBLES project: providing ensemble based predictions of climate changes and their impacts. *EGGS Newsl* 13:22–25
- [12] van der Linden P, Mitchell J (Eds.) (2009) *ENSEMBLES: Climate change and its impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Report, 160 pp, Met Off. Hadley Cent, Exeter, U. K.
- [13] Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G. and Georgopoulou, E. (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional environmental change*, 14, 563–578, <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- [14] Kotlarski S, Keuler, K., Christensen, O. B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., Goergen, K., Jacob, D., Lüthi, D., van Meijgaard, E., Nikulin, G., Schär, C., Teichmann, C., Vautard, R., Warrach-Sagi, K., and Wulfmeyer, V (2014) Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geosci Model Dev* 7:1297–1333. doi:10.5194/gmd-7-1297-2014
- [15] Christensen JH, Kjellström E, Giorgi F, Lenderink G, Rummukainen M (2010) Weight assignments regional climate models: exploring the concept. *Clim Res* 44:179–194 doi: 10.3354/cr00916
- [16] Skamarock WC et al (2008) A description of the advanced research WRF version 3. NCAR tech. note TN-475\_STR, 113 pp
- [17] Cardoso RM, Soares PMM, Lima DCA, Miranda PMA (2018) Mean and extreme temperatures in a warming climate: EURO CORDEX and WRF regional climate high-resolution projections for Portugal. *Climate Dynamics* DOI: 10.1007/s00382-018-4124-4
- [18] Soares PMM, Cardoso RM, Lima DCA, Miranda PMA (2017) Future precipitation in Portugal: high-resolution projections using WRF model and EURO-CORDEX multi-model ensemble *Climate Dynamics*, 49:2503–2530, DOI:10.1007/s00382-016-3455-2
- [19] Soares PMM, Cardoso RM, Miranda PMA, Medeiros J de, Belo-Pereira M, Espirito-Santo F (2012) WRF high resolution dynamical downscaling of ERA-Interim for Portugal. *Climate Dynamics* 39:2497– 2522. DOI: 10.1007/s00382-012-1315-2
- [20] Cardoso RM, Soares PMM, Miranda PMA, Belo-Pereira M (2013) WRF high resolution simulation of Iberian mean and extreme precipitation climate. *Int. J Climatol* 33:2591–2608. doi:10.1002/joc.3616.
- [21] Rios-Entenza A, Soares PMM, Trigo RM, Cardoso RM, Miguez-Macho G (2014) Precipitation recycling in the Iberian Peninsula: spatial patterns and temporal variability. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 5895–5912 doi: 10.1002/2013JD021274
- [22] Soares, P.M., Cardoso, R.M., Semedo, Á., Chinita, M.J. and Ranjha, R. (2014) Climatology of the Iberia coastal low-level wind jet: weather research forecasting model high-resolution results. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 66, 22377, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v66.22377>
- [23] Martins JPA, Cardoso RM, Soares PMM, Trigo I, Belo-Pereira M, Moreira N, Tomé R (2016) The summer diurnal cycle of coastal cloudiness over west Iberia using Meteosat/SEVIRI and a WRF regional climate model simulation. *International Journal of Climate*, 36(4):1755–1772, DOI: 10.1002/joc.4457
- [24] Pinto RMS, Benali A, Sá ACL, Fernandes PM, Soares PMM, Cardoso RM, Trigo RM, da-Camara CC, Pereira JMC (2016) Probabilistic Fire Spread Forecast as a Tool for Fire Management in an Operational Setting. *SpringerPlus* 5:1205, DOI 10.1186/s40064-016-2842-9

- [25] Sá A, Benali A, Fernandes PM, Pinto RM, Trigo RM, Salis M, Russo A, Jerez S, Soares PMM, Shroeder W, Pereira JM (2017) Evaluating fire growth simulations using satellite active fires data. *Remote Sensing of Environment*, 190:302-317, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.023>
- [26] Campaniço H, Soares PMM, Hollmuller P, Cardoso RM (2016) Climatic cooling potential of direct ventilation and evaporative cooling: high resolution spatiotemporal analysis for Iberia. *Renewable Energy*, 85:766-776, DOI 10.1016/j.renene.2015.07.038
- [27] Hazeleger W et al (2010) EC-Earth: A seamless earthsystem prediction approach in action. *Bull Amer Meteor Soc* 91:1357-1363. doi:10.1175/2010BAMS2877.1
- [28] Belo-Pereira M, Dutra E, Viterbo P (2011) Evaluation of global precipitation datasets over the Iberian Peninsula. *J Geophys Res* 116: D20101. doi:10.1029/2010JD015481



Rita M Cardoso, é investigadora no Instituto Dom Luiz (IDL) da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL). Doutorou-se em Meteorologia Na Universidade de Leeds (Reino Unido) em 2005, focando-se o seu trabalho na análise e modelação da interacção da superfície terrestre com a atmosfera. Na última década colaborou na implementação e execução das primeiras simulações regionais de clima em Portugal, assim como na execução das primeiras simulações de alterações climáticas de alta resolução. É membro do CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*), um consórcio internacional patrocinado pelo *World Climate Research Programme*. É a coordenadora do projeto FCT, *LEADING – “Land Use Changes And Mitigation Of Global Warming”* e a coordenadora portuguesa das simulações de alterações climáticas âmbito da *Flagship Pilot Study LUCAS (Land-Use and Climate Across Scales)* participando na elaboração e implementação de estudos especializados na área do impacto das alterações do uso do solo nas alterações climáticas.



Pedro Miguel Matos Soares é Investigador Principal do Instituto Dom Luís (IDL) e Docente do Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, ambos da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Concluiu o seu Doutoramento em Física (área de Meteorologia) na Universidade de Lisboa em 2004. Durante a última década, o seu trabalho focou-se em modelação climática regional, mudanças climáticas, eventos extremos e interações terra-atmosfera-oceano. Atualmente coordena o “Roteiro Nacional para Adaptação no Sec XXI - Avaliação da Vulnerabilidade do Território Português às Alterações Climáticas do Sec XXI”, e é o coordenador da equipa portuguesa do CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*) e da participação portuguesa no CORDEX *Flagship Pilot Studies* “Fenómenos convectivos em alta resolução na Europa e no Mediterrâneo”, ambos patrocinados pelo *World Climate Research Program*.



Daniela C. A. Lima. Concluiu a Licenciatura em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica em 2011 pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa; Mestrado em Ciências Geofísicas em 2013 pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa; e Doutoramento em Ciências Geofísicas e da Geoinformação em 2019 pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. É Investigadora no projecto *LEADING – “Land Use Changes And Mitigation Of Global Warming”* (PTDC/CTA-MET/28914/2017) no Instituto Dom Luiz da Universidade de Lisboa, e participa na *Flagship Pilot Study LUCAS – “Land Use and Climate Across Scales”*.