

Alterações climáticas, o ponto da situação

Ricardo Trigo

Instituto Dom Luiz, IDL, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa 1749-016

rmtrigo@fc.ul.pt

1. Introdução

Foi a partir de finais do século XIX que se começou a equacionar a possibilidade de a humanidade poder alterar o clima em consequência da emissão para a atmosfera de grandes quantidades de dióxido de carbono, por via das crescentes atividades industrial e de transportes (Somerville e Hassol, 2011). Desde os finais do século XX que a comunidade científica sabe, sem grandes margens para dúvidas, que a resposta a essa questão é afirmativa (Stocker *et al.*, 2013). Em 1896, Svante Arrhenius, futuro Prémio Nobel da Química em 1903, calculou que uma duplicação da concentração de CO₂ (em torno de 300 ppm à época) se poderia traduzir num aumento da temperatura média em cerca de 6 °C. Na verdade, todos os anos são publicados milhares de artigos científicos contendo novos resultados sobre os múltiplos aspetos das mudanças climáticas. Para se chegar ao atual estado de grande consenso em torno do impacto antropogénico nas alterações climáticas, foi instrumental o papel desempenhado pelo Painel Internacional de Alterações Climáticas (IPCC), organismo criado em 1988 pela iniciativa conjunta das Nações Unidas e da Organização Meteorológica Mundial. Até à data, o IPCC produziu cinco grandes relatórios de avaliação do estado da arte (*Assessment Reports*), tendo o último (AR5) sido publicado no biênio 2013-2014 (Stocker *et al.*, 2013), correspondendo a mais de três mil páginas organizadas em três grandes volumes. Algumas das principais conclusões deste último relatório do IPCC podem ser sintetizadas da seguinte forma:

i) O aquecimento do sistema climático é inequívoco e muitas das mudanças observadas desde a década de 1950 não têm precedentes no último milénio. A temperatura média da atmosfera e dos oceanos tem subido de forma significativa. O aquecimento do oceano domina o aumento da energia armazenada no sistema climático, representando mais de 90 % da energia acumulada entre 1971 e 2010.

ii) Nas últimas décadas, as vastas extensões de gelo da Gronelândia e da Antártida têm vindo a perder massa de

uma forma crescente. De igual modo, a massa total dos glaciares tem vindo a diminuir em quase em todo o mundo de forma significativa, bem como a cobertura de neve do hemisfério norte e de gelo na região Ártica. O nível do mar aumentou cerca de 19 cm entre 1901 e 2010, devido principalmente à expansão térmica das águas e ao derretimento do gelo dos glaciares e das calotes polares.

iii) A influência humana sobre o clima é inequívoca, resultando em grande medida das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) produzidas pelas atividades humanas, que incluem atividades industriais, a queima de combustíveis fósseis, o uso de fertilizantes e a desflorestação.

iv) A verificar-se a continuidade das emissões de GEE, estes causarão um aquecimento ainda mais acentuado no futuro, com efeitos de longa duração em todos os componentes do sistema climático. O aquecimento da atmosfera e dos oceanos e a elevação do nível do mar persistirão por vários séculos, tal sucedendo mesmo se a emissão de GEE cessasse de imediato, devido ao longo tempo de residência na atmosfera de alguns desses gases, aos mecanismos climáticos de realimentação (*feedback*) e às escalas temporais mais lentas com que muitos dos efeitos se produzem no sistema Terra.

2. Evolução da temperatura média

A temperatura média da superfície terrestre tem vindo a subir desde que há registos suficientemente representativos de todo o planeta (isto é, aproximadamente desde a década de 1880), sendo estes medidos por instrumentos tendencialmente bem calibrados, que integram uma rede de estações meteorológicas com características standardizadas (Stocker *et al.*, 2013). De acordo com as duas agências norte-americanas que mantêm bases de

dados climáticos separadas (NASA e NOAA), o ano de 2016 registou um novo máximo de temperatura média global, que representa uma anomalia de aproximadamente 1,3 °C acima do valor médio para a década de 1880. Na verdade, é importante salientar que, na sequência dos novos máximos alcançados em 2014 e 2015, o valor observado em 2016 corresponde ao terceiro ano consecutivo a alcançar um novo recorde para a temperatura média global da superfície.

A maior parte do aquecimento global desde 1880 ocorreu nos últimos 35 anos, sendo de realçar que 16 dos 17 anos mais quentes registrados ocorreram desde 2001. Este facto pode ser facilmente comprovado atentando nas curvas avermelhadas da Figura 1, onde se representa a evolução desde 1880 das anomalias mensais da temperatura média da superfície terrestre, obtida após subtração da correspondente média anual calculada para o período 1980-2015 (dados do Goddard Institute for Space Studies, NASA). Não só 2016 foi o ano mais quente registado, como oito dos doze meses que compõem o ano (entre janeiro a setembro), apresentam os valores mais elevados para os respetivos meses (curva superior na Figura 1). A primeira metade de 2017 (curva vermelha com círculos negros) mostra anomalias um pouco inferiores às observadas para 2016, mas semelhantes ou mesmo um pouco superiores às registadas em 2014 e 2015.

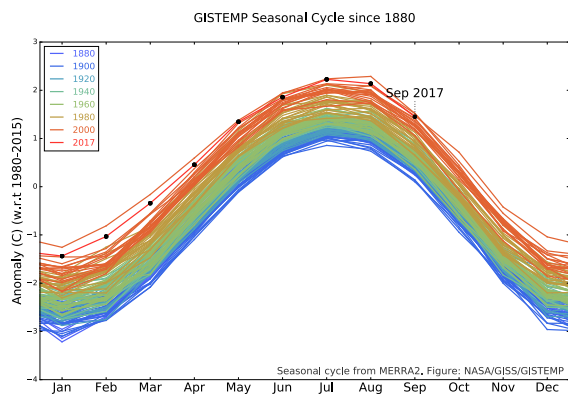


Fig. 1 - Anomalias mensais de temperatura média da superfície terrestre desde 1880, obtida após subtração da média anual calculada para o período 1980-2015. (Fonte: Goddard Institute for Space Studies, NASA). Nota: O forte ciclo sazonal com valores positivos nos meses de verão e negativos nos meses de inverno do hemisfério norte reflete o maior contributo das massas continentais no hemisfério norte, relativamente às do hemisfério sul, para a temperatura média global da superfície terrestre.

No entanto, os valores médios globais não traduzem a grande variabilidade espacial das anomalias de temperatura à escala regional, com os continentes a registarem anomalias de temperatura muito superiores aos oceanos e um aquecimento bastante mais acentuado nas latitudes mais elevadas do hemisfério norte, em particular sobre o Ártico. De facto, o Ártico é uma das zonas mais sensíveis às variações de temperatura global, acabando por funcionar como um sensor da influência humana no clima. A Figura

2 mostra a distribuição latitudinal da tendência da temperatura sazonal no hemisfério norte (em °C por década) para os diferentes níveis da atmosfera. Apesar de se verificar um aumento da temperatura à superfície em todo o hemisfério norte, as latitudes acima de 70 °N apresentam uma taxa de aquecimento muito mais acentuada durante todas as estações do ano, exceto no Verão (Cohen *et al.*, 2014). Nas regiões mais próximas do pólo norte, o aquecimento à superfície atingiu valores superiores a 1 °C por década. É também importante notar que o aumento da temperatura não se regista apenas à superfície, mas em toda a troposfera nas latitudes acima dos 70 °N. Este aquecimento acentuado nas latitudes mais elevadas é denominado habitualmente por “amplificação Ártica” e deve-se à interação entre o aumento da temperatura da atmosfera, a superfície gelada e o balanço radiativo da superfície (Screen e Simmons, 2010). Assim, temperaturas mais elevadas implicam a diminuição do gelo dos calotes polares, incluindo o gelo flutuante nos oceanos e de neve sobre os continentes. A diminuição da área gelada implica, por sua vez, uma forte diminuição do albedo, ou seja, da quantidade de radiação solar refletida pela superfície (o albedo nos oceanos pode baixar de 0,7 para menos de 0,1 em mar aberto), a que corresponde um aumento da absorção da radiação solar pelo solo e pela camada superficial dos oceanos. Este incremento na absorção pode ser bastante significativo e, naturalmente, leva a um aumento adicional da temperatura do ar junto da superfície, bem como da taxa de evaporação. Por sua vez, e na medida em que o vapor de água é um forte GEE, a maior quantidade de vapor de água que se vai concentrar na baixa atmosfera irá reforçar o aumento da temperatura. De referir, que os dois processos descritos correspondem a dois dos mais importantes mecanismos de retroação positiva, usualmente conhecidos como mecanismos de *feedback* positivo.

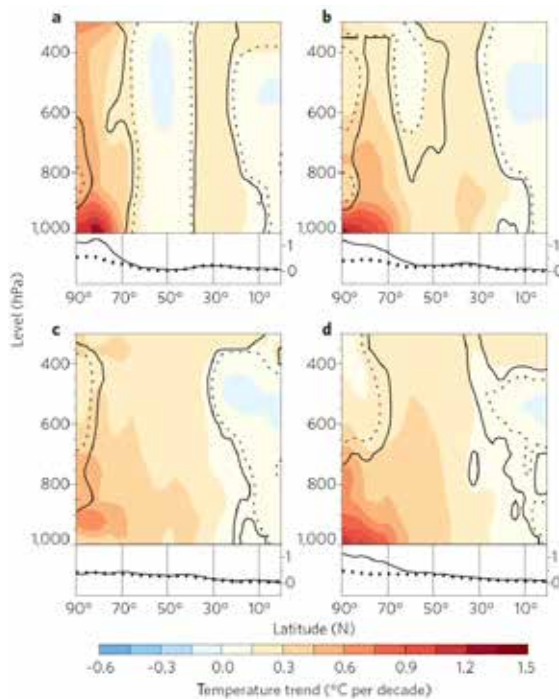


Fig. 2 - Tendência da temperatura sazonal no hemisfério norte: (a) inverno; (b) primavera; (c) verão; (d) outono observada entre março de 1979 a fevereiro de 2014. O eixo horizontal indica a distribuição em latitude e o eixo vertical indica a pressão da coluna atmosférica, que diminui com a altitude (Fonte: Cohen *et al.*, 2014).

3. Forçamento radiativo

As concentrações atmosféricas dos principais GEE têm vindo a aumentar devido a atividades humanas, destacando-se o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nítrico (N_2O). Estes gases absorvem uma fração muito significativa da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre e pelas camadas mais baixas da atmosfera, provocando um aumento do efeito de estufa natural e, portanto, causando o aquecimento adicional da atmosfera, bem como de outros componentes chave do sistema climático (oceanos, criosfera, camada superior da geosfera e mesmo da biosfera). Estas alterações ocorrem em escalas temporais diversas, sendo mais rápidas na atmosfera e camadas superficiais dos oceanos e mais longas na criosfera e camadas profundas dos oceanos.

É de salientar que, no ano de 2016, o nível de concentração de CO_2 na atmosfera se manteve pela primeira vez acima de 400 partes por milhão (ppm) durante todo o ano. Como é possível reconstruir a concentração de CO_2 atmosférico para o passado a partir da composição do ar retido nas amostras de gelo, sabemos que este valor jamais foi observado na história humana (Monnin *et al.*, 2001). Nos últimos 800 mil anos, a concentração de CO_2 só por uma vez ultrapassou o valor de 300 ppm. É agora indiscutível que a emissão antropogénica de GEE, associada à queima de combustíveis fósseis, é o principal responsável pelo aumento da temperatura média global registado desde o período pré-industrial (Cook *et al.*, 2016), o qual se encontra relacionado com a existência de um desequilíbrio do balanço radiativo do planeta (Figura 3). De facto, uma temperatura média global constante da Terra pressupõe a existência de equilíbrio energético essencialmente traduzido por um equilíbrio radiativo, isto é, a radiação solar absorvida pela Terra tem de ser compensada pela radiação infravermelha emitida.

Compreende-se, assim, que para se estudar os processos conducentes às alterações climáticas é útil recorrer ao conceito de *Forçamento Radiativo* a fim de quantificar, entre outros, o efeito do incremento das concentrações de GEE no clima (Stocker *et al.*, 2013). O forçamento radiativo corresponde à alteração no balanço energético global da Terra, associado à variação na concentração de um ou mais GEE, relativamente ao período pré-industrial e vem expresso em watts por metro quadrado. Conforme ilustrado na Figura 3, um forçamento positivo (negativo) induz aquecimento (arrefecimento). Neste sentido, é importante salientar que atualmente podemos calcular com alguma precisão o forçamento radiativo associado aos GEE de longa duração, uma vez que conhecemos as suas concentrações atmosféricas e distribuição espacial, bem como a sua interação com as radiações solar e terrestre, isto é, de curto e longo comprimento de onda, respetivamente.

As mudanças climáticas resultam da ação de vários fatores (ou mecanismos) de forçamento climático, tanto naturais como antropogénicos (Figura 3). Os mecanismos naturais incluem, para escalas temporais bem conhecidas, as

alterações nos parâmetros orbitais da Terra (excentricidade da órbita da Terra, obliquidade do eixo de rotação e precessão dos equinócios), bem como os mecanismos, menos previsíveis, da atividade solar e das grandes erupções vulcânicas (Peixoto e Oort, 1992). Já com origem na atividade humana, é de ter em conta, para além dos GEE, o forçamento provocado pelas emissões de aerossóis, das alterações nas concentrações do ozono estratosférico e troposférico, ou mesmo de alterações do albedo de superfície (refletividade) provocados por alterações do uso do solo. Em geral, as incertezas associadas ao efeito dos aerossóis são claramente superiores às observadas nos GEE, como se pode verificar pela barra de incerteza do Forçamento Radiativo de cada mecanismo (coluna da direita da Figura 3). Tendo em conta todos os mecanismos antropogénicos, observa-se que o Forçamento Radiativo de origem humana tem subido vertiginosamente nas últimas décadas (curva a vermelho), sendo atualmente superior a 2 W/m^2 .

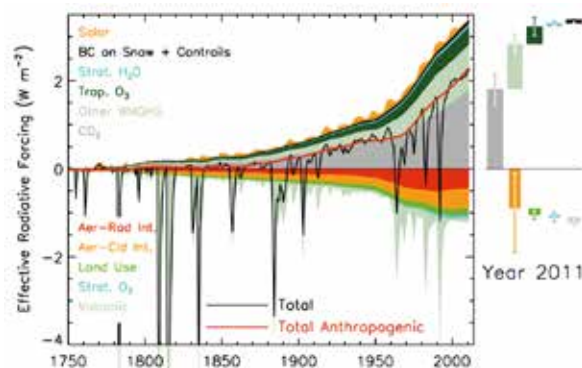


Fig. 3 – Contribuição de diversos processos naturais e antropogénicos para o forçamento radiativo do planeta; valores positivos (negativos) implicam uma maior (menor) quantidade de radiação absorvida. Fonte: IPCC (2013). O aumento de CO_2 na atmosfera (cinza) representa a maior contribuição para o aumento da quantidade de radiação absorvida, seguido pelo efeito de outros gases com efeito de estufa (verde claro, WMGHG – *well-mixed greenhouse gases*) e pelo ozono troposférico localizado na camada mais baixa da atmosfera (verde escuro). Outros processos, como o papel do vapor de água na estratosfera, a deposição de partículas na neve e variações na atividade solar apresentam uma contribuição reduzida. Por outro lado, os aerossóis (vermelho e cor de laranja) produzem um efeito negativo, dado que dispersam e (refletem) parte da radiação solar, o que é acentuado durante erupções vulcânicas (verde claro, negativo). As atividades de alteração do uso do solo, que no século XX correspondem sobretudo a desflorestação, produzem um efeito direto no balanço radiativo do planeta (verde), dado que as áreas agrícolas refletem mais radiação do que as florestas. (Fonte: Stocker *et al.*, 2013).

4. A importância dos extremos

Como referido atrás, o aquecimento global desde o período pré-industrial é de “apenas” 1°C , um valor relativamente pequeno quando comparado com as enormes flutuações de temperatura ao longo do ano e relativamente menor face à evolução da temperatura que todos experimentamos de dia para dia. No entanto, a tendência de valores médios calculados para extensas regiões e períodos longos está longe de ser um indicador completo das alterações climáticas do ponto de vista do cidadão comum, pois escamoteia uma enorme variabilidade regional

bem como o que se passa em diferentes estações do ano.

Na verdade, grande parte da população já começou a sentir alterações significativas na frequência de eventos extremos, particularmente no que se refere a extremos de temperatura, uma vez que as condições involuntariamente quentes ocorrem atualmente com maior frequência, observando-se que os eventos quentes mais extremos (ondas de calor) são ainda mais extremos do que há apenas algumas décadas atrás (Hansen e Sato, 2016). Como é que se pode então conciliar estes dois factos aparentemente contraditórios, isto é, de se ter um aumento global da temperatura média relativamente modesto ($\sim 1^\circ\text{C}$) e, ao mesmo tempo, uma frequência crescente de extremos de calor que afetam uma grande percentagem da população?

Convém lembrar que o Clima é definido como o tempo meteorológico médio, ou mais precisamente, como a descrição estatística de variáveis relevantes do estado do tempo (condições meteorológicas) para um dado período de referência (usualmente de 30 anos). As alterações do clima são, portanto, mais apropriadamente descritas pelas mudanças na distribuição de frequência de estados da atmosfera ao longo de um determinado período, tal como exemplificado na Figura 4 para os meses de inverno e verão no hemisfério norte (excluindo pontos sobre os oceanos), entre 1950 e 2015. Cada curva, com forma aproximadamente gaussiana, representa a distribuição de valores de anomalia de temperatura medidos em estações terrestres no hemisfério norte em períodos sucessivos, obtidos depois de removido o valor médio climatológico calculado para o período de referência 1951-1980. Assim, valores negativos (positivos) correspondem a anos mais frios (quentes) do que a média climatológica. Para cada valor de anomalia considerado, a

área contida entre as abcissas e a curva representa, pois, a probabilidade de se registar uma determinada anomalia de temperatura no respetivo período considerado.

Entre 1950 e 2015, as sucessivas curvas vão-se deslocando para a direita, centrando em valores sucessivamente mais elevados, o que significa que, em média, em todas as regiões continentais do hemisfério norte, tanto os invernos como os verões se têm vindo a tornar mais quentes. Para a última década, as temperaturas registadas no verão são, em média, $1,5^\circ\text{C}$ mais elevadas do que em 1951-1980; já, para o inverno, este valor é substancialmente menor, cerca de $0,77^\circ\text{C}$. Por outro lado, nos meses de verão do hemisfério norte observa-se também um maior achatamento das distribuições do que nos meses de inverno. Tem-se assim uma tendência para uma extensão das “caudas” superiores da distribuição nas décadas mais recentes, e em particular durante o verão, o que significa que eventos extremos de calor se têm tornado mais frequentes na medida em que se observa um aumento significativo da probabilidade de ocorrência de anomalias extremas de temperatura. É neste contexto que vale a pena referir aqui duas das mais intensas ondas de calor que assolaram a Europa nas últimas décadas: a onda de 2003 na Europa Ocidental e a de 2010 na Rússia (Figura 5).

No verão de 2003 registaram-se temperaturas médias mensais muito elevadas durante várias semanas, afetando toda a Europa ocidental. Esta onda de calor teve inúmeros impactos socioeconómicos, em particular perda de produção agrícola e de energias renováveis (particularmente a energia hídrica), bem como num aumento da mortalidade em toda a Europa de cerca de 40 mil pessoas (Garcia-Herrera *et al.*, 2010). Em Portugal, foram atingidos valores máximos de temperatura máxima ($47,3^\circ\text{C}$) bem como da temperatura mínima ($30,6^\circ\text{C}$), que levaram a numerosos incêndios de grandes dimensões, responsáveis pela maior área ardida desde que há registos (1980),

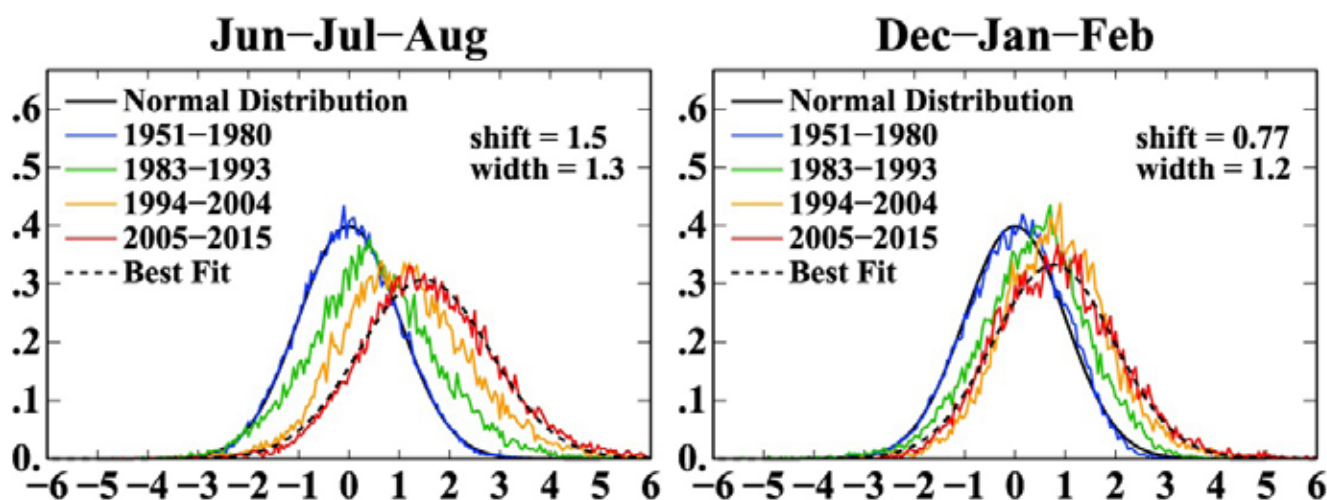


Fig. 4 – Frequência de ocorrência de anomalias de temperatura (em relação à média 1951-1980) normalizadas com o desvio padrão para o período 1951-1980 para todas as regiões continentais do hemisfério norte, no verão (esquerda) e no inverno (direita). (Figura adaptada de Hansen e Sato, 2016)

correspondente a cerca de 450 mil hectares, ou seja 5 % do território (Trigo *et al.* 2006). Estas temperaturas extremas conduziram igualmente a um excesso de mortalidade de cerca de 2000 pessoas comparativamente à média calculada com base nos anos anteriores (Trigo *et al.*, 2009). Apesar do caráter excecional (até à data) da onda de calor de 2003, poucos anos depois, no verão de 2010, registou-se uma nova onda de calor de proporções inéditas e que afetou principalmente a Europa de leste e a Rússia ocidental. Com base em dados observados e dados de *proxies* (variáveis que têm relação estatisticamente significativa com parâmetros climáticos, incluindo os anéis de árvores, amostras de gelo, grãos de pólen, etc) para toda a Europa foi possível estabelecer que estas duas ondas de calor bateram sucessivamente os recordes de temperatura de verão registada desde 1500 (Barriopedro *et al.*, 2011). Alguns dos anos caracterizados por temperaturas anómalas de verão mais elevadas foram registados na 1.ª década do século XXI (Figura 5), mas as anomalias relativas a 2003 e 2010 foram tão elevadas que se situam fora da distribuição normal obtida para os últimos 510 anos.

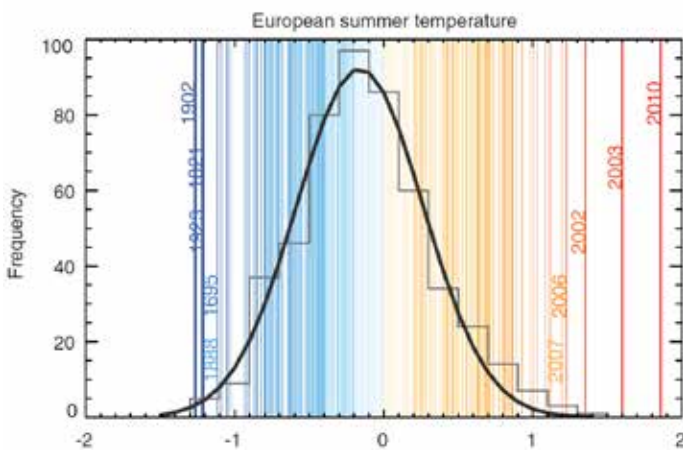


Fig. 5 – Distribuição das temperaturas médias de verão relativas ao continente Europeu ([35 °N, 70 °N], [25 °W, 40 °E]) entre 1500 e 2010. Anomalias calculadas relativamente ao período 1971-2000. Os cinco anos caracterizados pelos valores médios de verão mais quentes e mais frios estão identificados a vermelho e azul respetivamente. As colunas a cinzento representam a distribuição das temperaturas médias entre 1500 e 2010 e a curva negra um ajuste gaussiano (Figura adaptada de Barriopedro *et al.*, 2011).

5. Notas finais

Como foi exposto na secção anterior, o aquecimento global não é homogéneo sobre todo o planeta, apresentando valores mais elevados sobre terra do que sobre o mar e também mais acentuados no verão do que no inverno. Ainda mais importante do ponto de vista dos impactos na nossa sociedade, observou-se que o incremento na probabilidade de ocorrência de extremos de temperatura anormalmente elevada (e.g. >3 °C) aparenta ser muito superior no clima atual do que há apenas quatro ou cinco décadas atrás. No entanto, até há poucos anos a esmagadora maioria dos Meteo-

rologistas ou Climatologistas não se atrevera a responder de forma taxativa à questão que lhes é colocada invariavelmente por jornalistas, após um evento extremo (cheias, secas, ondas de calor, tornados, etc.): este extremo ficou a dever-se às alterações climáticas?

Recentemente tem havido uma clara evolução neste tipo de estudos, genericamente conhecidos como estudos de atribuição da contribuição antropogénica. Assim, apesar de eventos extremos como as ondas de calor na Europa de 2003 e 2010 não resultarem exclusivamente das alterações climáticas induzidas por GEE de origem antropogénica, já é possível demonstrar, com base em modelos dinâmicos e testes de significância estatística, que as alterações climáticas implicaram uma subida significativa na sua probabilidade de ocorrência (Fischer e Knutti, 2015).

Agradecimento

O autor gostaria de agradecer a contribuição da Doutora Ana Bastos para uma versão preliminar deste artigo. Agradece igualmente os comentários dos colegas Carlos da Camara e Isabel Trigo.

Referências

(por ordem alfabética)

1. Barriopedro D., E. Fisher, J. Luterbacher, R. M. Trigo, e R. Garcia-Herrera, "The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe", *Science* 322, 220-224 (2011).
2. Cohen J., J. A. Screen, J.C. Furtado, M. Barlow, D. Whittleston, D. Coumou, J. Francis, K. Dethloff, D. Entekhabi, J. Overland, e J. Jones, "Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather", *Nat. Geosci.* 7(9), 627-637 (2014).
3. Cook J., et al., "Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming", *Environmental Research Letters* 11.4, 048002 (2016).
4. Fischer E. M., e R. Knutti, "Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes", *Nature Climate Change* 5(6), 560-564 (2015).
5. García-Herrera R., J. Díaz, R. M. Trigo, J. Luterbacher, e E. Ficher, "A review of the European summer heat wave of 2003", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 40, 267-306 (2010).
6. Hansen J., e M. Sato, "Regional climate change and national responsibilities", *Environmental Research Letters* 11(3), 034009 (2016).
7. Monnin E., A. Indermühle, A. Dällenbach, J. Flückiger, B. Stauffer, T. F. Stocker, D. Raynaud, e J.-M. Barnola, "Atmospheric CO₂ concentrations over the last glacial termination", *Science* 291, 5501, 112-114 (2001).
8. NOAA Arctic Report Card 2015. Disponível em: ftp://ftp.oar.noaa.gov/arctic/documents/ArcticReportCard_full_report2015.pdf
9. Screen J. A., e I. Simmonds, "The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification", *Nature* 464, 1334-1337 (2010).
10. Somerville R., S. Hassol, "Communicating the science of climate change", *Physics Today* 64, 10, 48 (2011)
11. Stocker T. F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Yu Xia, B. Bex, e B. M. Midgley. *IPCC, 2013: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* (2013).
12. Trigo R. M., J. M. C. Pereira, M. G. Pereira, B. Mota, M. T. Calado, C. C. DaCamara, e F. E. Santo, "The exceptional fire season of summer 2003 in Portugal". *International Journal of Climatology* 26 (13), 1741-1757 (2006).
13. Trigo R. M., A. Ramos, P. Nogueira, F. D. Santos, R. Garcia-Herrera, C. Gouveia, e F. E. Santo, "The impact of the 2003 heatwave in Portugal: diagnostics and modelling of excessive mortality", *Environmental Science & Policy* 12, 844-854 (2009).



Ricardo Trigo é Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia e coordenador do grupo de Climatologia e Alterações Climáticas no Instituto Dom Luiz (IDL), ambos da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. A sua pesquisa incide na análise da variabilidade e alterações climáticas no sul da Europa, bem como na caracterização da componente meteorológica de eventos extremos climáticos como as secas, ondas de calor, inundações e incêndios florestais. Publicou mais de 180 artigos indexados (índice h=42 na WoS). Recebeu um Prémio da Royal Meteorological Society (Reino Unido) em 2008 e o Prémio UL-CGD de 2017 pela produção científica na área das Ciências da Terra.