

Índice

- artigo geral
2 **Alterações climáticas**, o ponto da situação
Ricardo Trigo
- artigo geral
8 **Processos dinâmicos** que determinam as correntes no oceano
Paulo Relvas
- artigo geral
14 **Ondas do mar** que iluminam o interior da Terra
Graça Silveira, Susana Custódio
- artigo geral
20 **Estudo Geofísico e Geológico** da Falha de Vila Franca de Xira
João Carvalho, Daniela Alves, J. Borges, Bento Caldeira, João Cabral, Ruben Dias, João Casacão, Rui J. Oliveira, Jaime Leote
- artigo geral
26 **Prospecção geofísica** pelo método da resistividade elétrica
Rogério Mota
- artigo geral
30 **Da deriva dos polos magnéticos** até alterações climáticas
Maria Rosa Duque
- artigo geral
33 **Localizar epicentros** à mesa
Luís Matias
- artigo geral
38 **Prospecção Electromagnética** em Geofísica – o método Transiente
Rui M. D. Gonçalves
- artigo geral
43 **Um campus** com energia solar
Miguel C. Brito, Marta Aido, Rodrigo A. Silva, Killian Lobato
- gazeta ao laboratório
47 **Medida horizontal** do campo magnético terrestre
Horácio Fernandes
- sala de professores
50 **As diferentes teorias de aprendizagem** e o ensino da física
Maria José B. M. de Almeida
- crónicas
55 **A Física** da Terra
Carlos Fiolhais
- vamos experimentar
56 **Um tornado** numa garrafa
Constança Providência
- livros e multimédia
58 **Livros**
- 60 **Notícias**
- notícias
63 **Olimpíadas** de Física

Imagem da capa: Imagem da Europa ocidental e Norte de África obtida do satélite Suomi NPP. Crédito: Norman Kuring, NASA GSFC, usando dados do instrumentos VIIRS a bordo do Suomi NPP.
<https://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=78314>

Publicação Trimestral Subsidiada

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

Olhem de novo para esse ponto. É aqui, é a nossa casa, somos nós. Nele, todos a quem ama, todos a quem conhece, todos sobre quem ouviu falar, cada ser humano que já existiu, viveram as suas vidas. O conjunto da nossa alegria e do nosso sofrimento, milhares de religiões, ideologias e doutrinas económicas confiantes, cada caçador e colector, cada herói e covarde, cada criador e destruidor da civilização, cada rei e camponês, cada jovem casal apaixonado, cada mãe e pai, criança cheia de esperança, inventor e explorador, cada mestre de ética, cada político corrupto, cada superestrela, cada líder supremo, cada santo e pecador na história da nossa espécie viveu ali – num grão de pó suspenso num raio de sol.

Carl Sagan (palestra na Univ. Cornell, 1994)

As palavras de Sagan sobre o nosso planeta lêem-se como poesia. A descrição acima é inspirada pela célebre fotografia *Pálido Ponto Azul*, que também daria título ao seu livro editado nesse ano. Nesta fotografia, tirada pela sonda *Voyager 1* a mais de 6 mil milhões de quilómetros de distância, a Terra surge como um humildemente minúsculo pixel azulado, quase ofuscado pela luz do Sol difractada pelos componentes ópticos da câmara. É um exemplo esmagador da nossa pequenez à escala cósmica – e sem sequer sair do Sistema Solar!

Para a capa desta edição especial da *Gazeta de Física*, optámos por uma imagem fortemente contrastante: o recorte do globo terrestre em grande plano, enfatizando os continentes, os oceanos e a atmosfera em diálogo dinâmico. A estes se somam os diversos campos que actuam sobre o nosso planeta, e deste conjunto é formada a vasta área da Física da Terra, à qual é integralmente dedicada esta edição.

É um tema particularmente relevante para o nosso presente e futuro. A evolução das alterações climáticas ao longo deste século e todos os fenómenos associados – o impacto na saúde, na biodiversidade, nas migrações e no conflito por recursos – são das maiores ameaças à qualidade e sustentabilidade da vida terrestre. Numa era em que somos constantemente inundados de “informação” inútil e efémera e que misturamos prioridades com entretenimento, é urgente reflectir sobre aquilo de que realmente se trata: é aqui, é a nossa casa, somos nós.

Esta edição não teria sido possível sem a preciosa ajuda da Divisão de Geofísica, Oceanografia e Meteorologia da SPF. Agra-

deço aos seus responsáveis pelo apoio dado desde o primeiro momento, na sugestão do tema, bem como em todo o processo editorial. Agradeço também aos autores, convidados, espontâneos e colunistas, pelo interesse demonstrado nesta edição e pela excelente qualidade dos artigos com que contribuíram.

Pessoalmente, esta edição é especial ainda por outro motivo: é a última que coordeno, enquanto director editorial. Tendo entrado no quadro de editores da revista em 2007, sinto que ao fim de 27 edições, das quais 14 como director, está na hora de dar o dever por cumprido e passar o leme a uma nova equipa, o que sucederá a partir de 2018.

Tenho muitas pessoas a quem agradecer, por todo o entusiasmo e por tudo o que aprendi com elas: desde logo a Teresa Peña, minha antecessora neste cargo e depois Presidente da SPF, e a Conceição Abreu, actual Presidente. Ao Carlos Fiolhais e à Constança Providência, pela colaboração sempre pontual. Aos inúmeros autores e colaboradores pelo seu apoio e dedicação, aos revisores pelo seu paciente e pontual trabalho, à comissão eleitoral e aos correspondentes e, naturalmente, aos leitores, a quem todo este esforço é dedicado. Não esqueço ainda os mais de 40 mil seguidores da página de *Facebook* da revista, um sucesso na divulgação da física em língua portuguesa.

No lado eficientemente discreto de quem cria a revista, tenho a agradecer aos colegas com quem trabalhei: Filipe Moura, Olivier Pellegrino e Carlos Herdeiro. Graças a eles, às suas contribuições, sugestões e revisões atentas, cada edição foi completada com uma qualidade e um rigor de que nos orgulhamos. Ao António Fidalgo e à Dossier pela paginação e preparação da revista impressa. Na SPF, a Maria José Couceiro e a Sofia Martins encarregaram-se de tanta coisa para manter toda a máquina em movimento, no mundo real e *online*, que é impossível delimitar – apenas um grande muito obrigado. Foi um prazer e um privilégio trabalhar com vocês todos. Por fim, à nova equipa editorial desejo as maiores felicidades no desenvolvimento e crescimento da revista, da SPF e da Física.

Muito obrigado!

Gonçalo Figueira

Por decisão pessoal, o autor do texto não escreve segundo o Novo Acordo Ortográfico



Ficha Técnica

Propriedade

Sociedade Portuguesa de Física
Av. da República, 45 – 3º Esq.
1050-187 Lisboa
Telefone: 217 993 665

Equipa

Gonçalo Figueira (Director Editorial)
Filipe Moura (Editor)
Olivier Pellegrino (Editor)

Secretariado

Maria José Couceiro - mjose@spf.pt

Colunistas e Colaboradores regulares

Ana Simões, Carlos Fiolhais,
Constança Providência

Colaboraram neste número

Marta Aído, Maria José Almeida, Daniela Alves, Augusto Barroso, José Borges, Miguel Brito, João Cabral, Bento Caldeira, João Carvalho, João Casacão, Susana Custódio, Rúben Dias, Maria Rosa Duque, Horácio Fernandes, Rui Gonçalves, Jaime Leote, Killian Lobato, Luís Matias, Rogério Mota, Rui J. Oliveira, Paulo Relvas, Rodrigo Silva, Graça Silveira, Ricardo Trigo.

Comissão editorial

Conceição Abreu - Presidente da SPF
Teresa Peña - Anterior director editorial
Carlos Fiolhais - Anterior director editorial
Ana Rita Figueira - Física Médica
Carlos Portela - Educação
Constança Providência e Costa - Física Nuclear
Horácio Fernandes - Física dos Plasmas
Joaquim Norberto Pires - Física Aplicada e Engª Física
João Carvalho - Física das Partículas
João Veloso - Física Atómica e Molecular
José Luís Martins - Física da Matéria Condensada
Luís Matias - Meteorologia, Geofísica e Ambiente
Manuel Marques - Óptica
Rui Agostinho - Astronomia e Astrofísica

Correspondentes

Joaquim Moreira - Delegação Norte
Rui Travasso - Delegação Centro
Pedro Abreu - Delegação Sul e Ilhas

Design / Produção Gráfica

Fid'algo - printgraphicdesign

NIPC 501094628

Registo ICS 110856

ISSN 0396-3561

Depósito Legal 51419/91

Tiragem 1.000 Ex.

Publicação

Trimestral Subsidiada
As opiniões dos autores não representam necessariamente posições da SPF.

Preço N.º Avulso €5,00 (inclui I.V.A.)

Assinatura Anual €15,00 (inclui I.V.A.)

Assinaturas Grátis aos Sócios da SPF.

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.

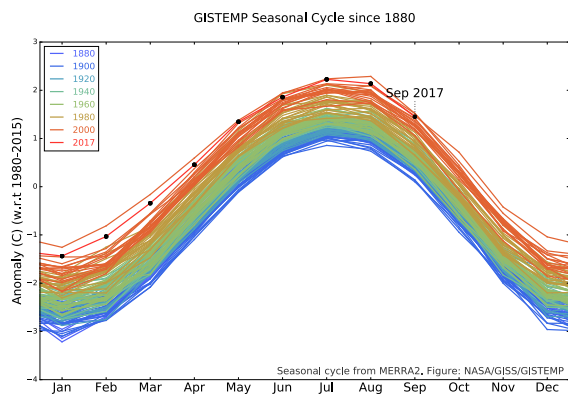


Fig. 1 - Anomalias mensais de temperatura média da superfície terrestre desde 1880, obtida após subtração da média anual calculada para o período 1980-2015. (Fonte: Goddard Institute for Space Studies, NASA). Nota: O forte ciclo sazonal com valores positivos nos meses de verão e negativos nos meses de 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.

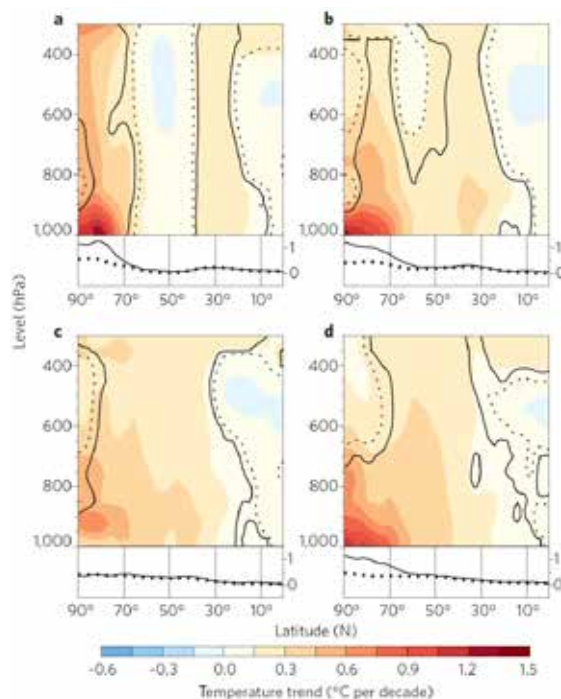


Fig. 2 - Tendência da temperatura sazonal no hemisfério norte: (a) inverno; (b) primavera; (c) verão; (d) outono observada entre março de 1979 a fevereiro de 2014. O eixo horizontal indica a distribuição em latitude e o eixo vertical indica a pressão da coluna atmosférica, que diminui com a altitude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

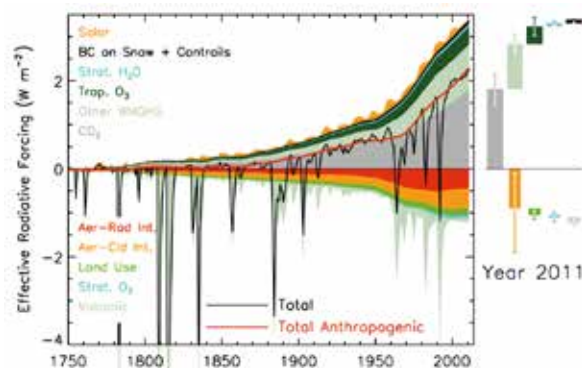


Fig. 3 – Contribuição de diversos processos naturais e antropogénicos para o forçamento radiativo do planeta; valores positivos (negativos) implicam uma maior (menor) quantidade de radiação absorvida. Fonte: IPCC (2013). O aumento de CO_2 na atmosfera (cinza) representa a maior contribuição para o aumento 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 involgarmente 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),

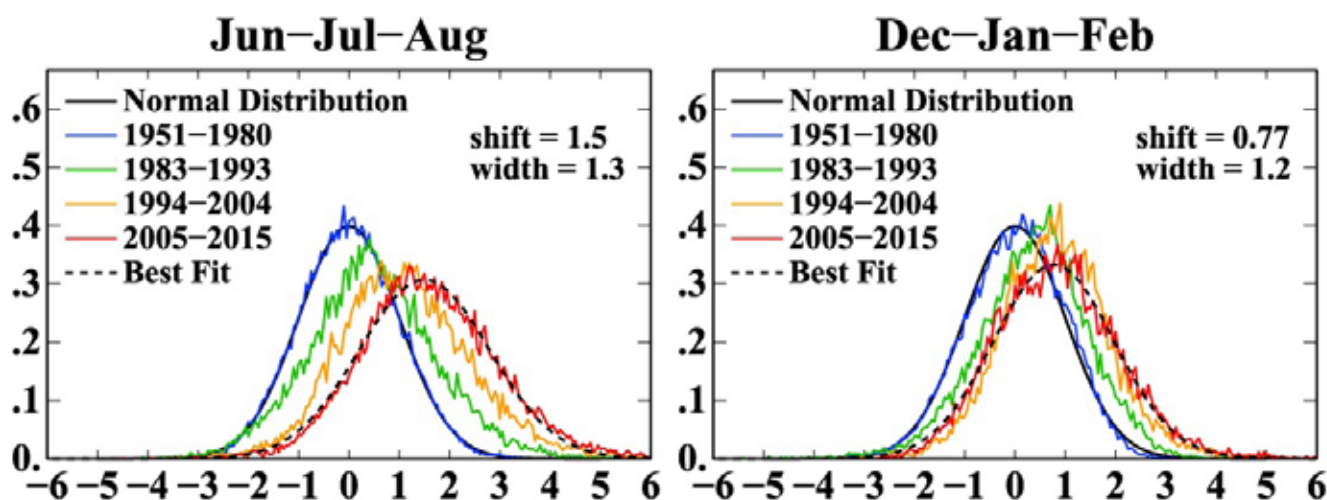


Fig. 4 – Frequência de ocorrência de anomalias de temperatura (em relação à média 1951-1980) normalizadas com o desvio padrão para o período 1951-1980 para todas as regiões continentais do hemisfério norte, no verão (esquerda) e no inverno (direita). (Figura adaptada de Hansen e Sato, 2016)