

Alterações humanas do clima

O aumento de CO_2 na atmosfera

RICARDO J. F. DE AGUIAR * e FILIPE DUARTE SANTOS

Departamento de Física da Faculdade de Ciências de Lisboa

1. Introdução

O clima constitui um dos factores determinantes das condições de vida da humanidade, da sua distribuição geográfica e da sua história. As mudanças que se registam no clima devem-se à alteração das condições existentes nas fronteiras do sistema climático (ver Fig. 1), por exemplo, modificação da reflectividade superficial do Globo, ou da intensidade da radiação solar que nos chega do espaço — e devem-se também a mudanças na estrutura ou composição da atmosfera.

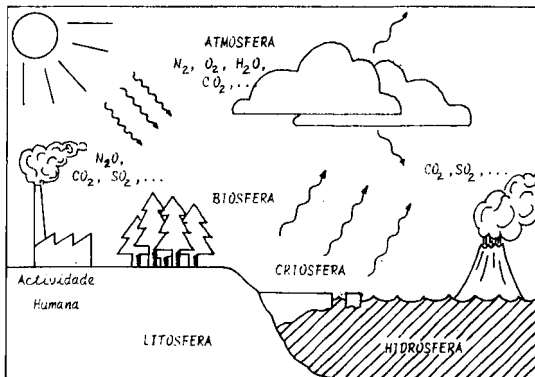


Fig. 1—Representação esquemática das componentes do sistema climático.

Embora possa passar despercebido, o facto é que a humanidade conduz actualmente uma experiência geofísica em larga escala, não controlada, ao injectar na atmosfera grandes quantidades de gases e poeiras provenientes da sua actividade industrial e agrícola. Entre estes produtos, aquele que se prevê poder vir a originar, a prazo bastante curto, os efeitos climáticos mais graves, é o dióxido de carbono [1].

Este gás faz parte da composição normal da atmosfera e, ainda que a sua concentração seja pequena — actualmente cerca de 340 ppmv (partes por milhão de volume da atmosfera) — tem um papel de primeiro plano nos processos radiativos que têm lugar na atmosfera, visto possuir fortes propriedades de absorção e emissão de radiação infravermelha.

O mecanismo pelo qual o CO_2 afecta o clima é conhecido pela expressão um pouco imprópria de *efeito de estufa*. O efeito de estufa consiste, essencialmente, no seguinte: o sistema climático está em equilíbrio energético radiativo, de tal modo que o fluxo de radiação solar (incidente) é compensado pela emissão (para o espaço exterior) de radiação infravermelha de origem terrestre. O dióxido de carbono é transparente à radiação solar mas absorvente em largas regiões do espectro infravermelho. A energia assim absorvida é reemitida, parte em direcção ao espaço exterior e parte em direcção à superfície. Uma vez que o balanço de energia da superfície do solo tem de ser mantido, isto deve traduzir-se num aumento da temperatura superficial.

2. Reservatórios e Fluxos de CO_2

A evolução dos níveis de dióxido de carbono na atmosfera só é conhecida com razoável certeza desde há 25 anos [2], quando começaram as primeiras medições pre-

* Actualmente no Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

cisas em Mauna Loa (Pacífico Norte). Pode afirmar-se a partir destes registos que o teor atmosférico do CO_2 tem vindo a aumentar com um ritmo aproximadamente exponencial desde o nível base de 292 ppmv de antes da Revolução Industrial até aos 340 ppmv actuais, isto em termos de valores médios anuais, já que se registam oscilações relacionadas com as variações sazonais da actividade foto-sintética da biosfera.

Podem obter-se indicações até épocas muito mais recuadas, através da medição de razões entre as concentrações de diversos isótopos de carbono presentes em materiais muito antigos: por exemplo em pólen pré-histórico ou em anéis de troncos de árvores milenárias.

Na figura 2 estão representadas, desde a época da Revolução Industrial, estimativas em Gt C/ano ($1 \text{ Gt C} = 10^9 \text{ Kg}$ carbono) dos fluxos anuais de carbono para a atmosfera e das contribuições parciais devidas às diferentes actividades humanas.

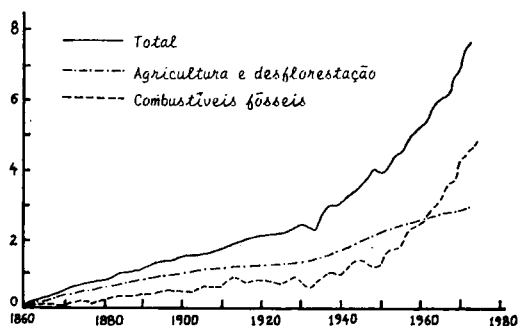


Fig. 2—Fluxo de carbono para a atmosfera, discriminando as duas componentes de origem humana.

O aumento verificado nos últimos 100 anos deve-se principalmente a três factores: em primeiro lugar, a queima de combustível de origem fóssil — carvão, petróleo, gás natural; em segundo lugar, a desflorestação, que por decaimento da matéria orgânica vegetal liberta grande parte do carbono nela armazenado; e por último as práticas agrícolas, através da redução do conteúdo em carbono dos solos.

Nem todo o carbono libertado para a atmosfera aí fica retido, sendo a quantidade que persiste cerca de 50 % do total. Este facto deve-se a que a atmosfera não é o único reservatório de carbono existente na Terra. Com efeito, existe carbono armazenado também nos sedimentos (por exemplo, entra na composição dos calcários), na biosfera (compostos orgânicos) e na hidrosfera (iões bicarbonato em solução, carbonato de cálcio nas conchas e esqueletos da fauna marinha). Entre os diversos reservatórios existem sempre fluxos de carbono. Porém, no caso dos sedimentos, o tempo médio de residência de um átomo de carbono nesse reservatório é tão elevado que numa escala de tempo de algumas centenas de anos este não nos vai interessar na compreensão dos processos que determinam a concentração atmosférica de CO_2 . Na biosfera, os principais fluxos de carbono dão-se com a atmosfera e constituem os processos opostos de foto-síntese e respiração. No caso da hidrosfera vão-nos interessar os processos relativos à dissolução do carbono atmosférico no oceano, formando iões bicarbonato, e à reconversão destes em dióxido de carbono, processos que são controlados pela pressão parcial de CO_2 na atmosfera e pela concentração de iões no oceano.

A situação pré-industrial era a de um equilíbrio dinâmico entre os diversos reservatórios, equilíbrio que tem vindo a ser perturbado pelas emissões, de origem humana, de carbono para a atmosfera.

Na predição dos níveis futuros de CO_2 na atmosfera são utilizados modelos matemáticos que descrevem o sistema que atrás analisámos; são admitidos cenários de desenvolvimento económico da humanidade que vão servir para simular a função perturbadora das emissões do CO_2 . Mesmo admitindo evoluções muito restritivas do consumo de combustíveis fósseis, por exemplo da ordem de 2,0 % ao ano — enquanto que nas últimas décadas tem sido 4,3 % ao ano — todos os modelos prevêm, pelo menos, a duplicação do teor atmosférico de CO_2 algures entre 2050 e 2150, conforme os valores iniciais pré-

industriais admitidos para os diversos reservatórios e conforme as características dos modelos e dos cenários utilizados.

3. Modelos Climáticos

Uma larga variedade de modelos matemáticos do clima foi desenvolvida para estimar as consequências do aumento do efeito de estufa causado pelas emissões de CO_2 e até de outros gases, nesse respeito menos importantes, tais como o CH_4 , CCl_4 , N_2O e os clorofluorcarbonetos.

De entre esses modelos, os mais simples são os ditos «radiativo-convectivos», que se baseiam na equação do balanço de calor do sistema climático:

$$\langle \delta Q / \delta t \rangle = S_0 (1 - \langle \alpha \rangle) / 4 - \langle E \rangle$$

onde $\delta Q / \delta t$ representa o armazenamento de calor; S_0 a constante solar, que é uma medida da intensidade da radiação solar no topo da atmosfera; α designa o albedo terrestre, que representa a razão entre o fluxo de radiação incidente no Globo e o fluxo por este reflectido; E , a emissão infravermelha terrestre; e $\langle \rangle$ representa uma média anual e sobre todo o Globo. Consideram-se pois apenas variações verticais das grandezas. O primeiro termo do lado direito é a energia absorvida pelo globo; o factor $1/4$ provém da razão entre a superfície que a Terra expõe à radiação solar, πR^2 (R é o raio médio da Terra) e a superfície total da Terra pela qual é distribuída a radiação, $4\pi R^2$.

No cálculo do albedo terrestre tomam-se em conta a nebulosidade, a transparência da atmosfera e as diferenças de reflectividade entre os diversos tipos de solos e/ou coberturas vegetais. A este respeito devemos referir que um mecanismo importante é o que toma em conta a reflectividade muito grande dos gelos, 0,60, em relação à média das regiões não geladas, 0,35. Quando a temperatura sobe há uma diminuição das extensões geladas e conseqüentemente o albedo global terrestre diminui: há mais radiação solar absorvida e portanto a

temperatura sobe ainda mais — o que por sua vez tende a reduzir ainda mais as regiões cobertas de gelos. Trata-se neste caso de um processo de retroacção positiva, mas no sistema climático existem retroacções de carácter negativo como é provavelmente o caso da nebulosidade.

No que respeita à emissão infravermelha, o vapor de água é o absorvente mais importante, logo seguido do dióxido de carbono, mas outros constituintes pouco frequentes na atmosfera têm também a sua contribuição como é o caso do N_2O , do CH_4 e dos clorofluormetanos. A concentração destes últimos tem vindo a aumentar paralelamente à do CO_2 em virtude da actividade industrial e agrícola.

Num sistema climático em equilíbrio, $\langle \delta Q / \delta t \rangle = 0$, isto é, não se verifica armazenamento de energia no interior do sistema e portanto a absorção de energia solar é equilibrada pela emissão de radiação infravermelha. Sabendo então como variam com a temperatura a emissão e absorção é possível determinar a elevação de temperatura correspondente a um certo aumento da retenção da radiação de origem terrestre, causada pelo excesso de dióxido de carbono.

Os modelos climáticos mais complexos tomam em conta não apenas o perfil vertical médio global anual mas toda a estrutura tridimensional da atmosfera, os seus movimentos, e a geografia e hidrografia da superfície da Terra. São então ditos modelos climáticos de circulação geral e em muitos aspectos são semelhantes aos usados na previsão meteorológica do tempo.

Outro tipo de modelos climáticos são os modelos paleoclimáticos. Estes modelos procuram na história do clima terrestre um período em que as temperaturas médias tenham sido superiores às actuais; o estudo das condições nessas épocas — tais como o Altitermico, 4000 a 8000 A.C. — é feito através da análise de certas fontes históricas, como depósitos de pólen no fundo de lagos, anéis de crescimento em troncos de árvores, etc.

4. Avaliação das Consequências

No estado actual de refinamento a que os modelos climáticos chegaram há concordância em que uma duplicação do teor atmosférico de CO₂ provocaria uma subida de 2 a 3 K na temperatura superficial *média*; na atmosfera o aquecimento diminui com a altitude e cerca dos 15 Km (limite da troposfera) passa a registar-se arrefecimento em relação à situação actual.

Estas alterações provocam respostas dos diversos subsistemas climáticos, respostas que produzem quase sempre efeitos sobre as condições de vida da Humanidade [3], como vamos ver de seguida.

análises do Período Altitérmico mostram que nas latitudes médias houve incremento médio na precipitação, enquanto que por outro lado os modelos de circulação geral prevêm um deslocamento para os pólos das bandas latitudinais onde em média a evaporação é maior do que a precipitação, isto é, das cinturas desérticas subtropicais. Isto seria consequência do decréscimo da diferença de temperatura entre os pólos e o equador que está na origem dos movimentos atmosféricos. Efectivamente, prevê-se que o aumento de temperatura à superfície será maior nas regiões de latitudes elevadas (de 4 K a 5 K) do que nas zonas equatoriais (cerca de 1 K) — uma distribuição geográfica pro-

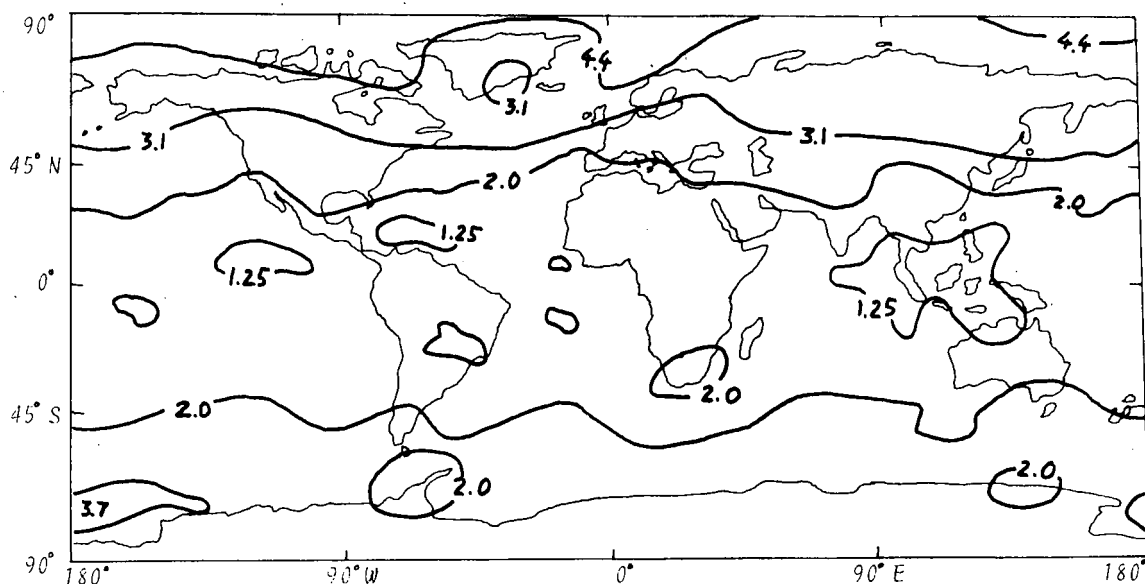


Fig. 3 — Distribuição do aumento de temperatura média anual sobre o globo, estimada para uma concentração atmosférica de CO₂ dupla da actual.

4.1. Efeitos na Atmosfera

A elevação da temperatura permite que quantidades maiores de água sejam introduzidas no ciclo hidrológico, isto é, na intensidade e localização das zonas de precipitação, evaporação e transporte de vapor de água. Relacionados com este problema existem porém resultados contraditórios. Com efeito,

vável do aquecimento superficial está representada na figura 3.

A acreditar nestes resultados, prevê-se no caso de Portugal a deslocação do anticiclone dos Açores para uma posição mais a norte, levando a condições meteorológicas de Inverno semelhantes às que actualmente se verificam no Verão, o que evidentemente arrastaria consigo condições de seca e problemas de desertificação.

4.2. Efeitos na Criosfera

A prevista elevação das temperaturas à superfície, elevação que é maior precisamente nas regiões com maior cobertura de gelos, teria três consequências principais, que vamos analisar de seguida. Para já haveria uma retracção geral dos glaciares e das regiões cobertas de gelos. Na verdade prevê-se que parte do Oceano Ártico fique livre de gelos, facilitando a navegação, outro tanto acontecendo à maior parte das massas de gelo marítimo da Antártida. Intimamente ligada a estes factos estaria uma subida do nível do mar de 2 a 10 m, provocando a inundação de grandes áreas costeiras, onde se localizam muitas das maiores concentrações populacionais.

A par destes efeitos que podemos considerar negativos, a retracção dos glaciares e em particular a diminuição das zonas onde o solo se encontra gelado em profundidade («permafrost») traria a libertação de muitos solos com possibilidades agrícolas.

4.3. Efeitos na Hidrosfera

Se bem que em certas áreas do Oceano a elevação de temperatura possa ser benéfica é quase certo que em vista da relação íntima que existe entre o regime de ventos e a circulação oceânica, alterações na circulação geral da atmosfera provocariam mudanças nas correntes oceânicas e nas áreas de afundamento de águas superficiais e de afloramento de águas profundas. Ora estas últimas são de muita importância para a indústria piscatória, visto que o ressurgimento de águas carregadas de nutrientes vindos do solo oceânico é determinante de uma intensa actividade biológica nessas áreas. Importa lembrar que este fenómeno é a razão da abundância de peixe na nossa orla costeira ocidental e não é certamente necessária mais ênfase nos problemas resultantes do desaparecimento ou enfraquecimento dessas zonas de ressurgimento.

4.4. Efeitos na Biosfera

Devido à dependência vital dos grandes eco-sistemas terrestres em relação ao clima,

aqueles vão responder às variações climáticas com mudanças na sua produtividade, posição geográfica e área que ocupam.

Existem vários modelos que se debruçam sobre aspectos particulares do comportamento da biosfera. Uma classe destes modelos é a que se dedica à previsão da produtividade dos eco-sistemas naturais em função da temperatura e precipitação médias anuais. Socorrendo-se de índices climáticos do mesmo género, outros modelos há que tentam prever a área ocupada e a distribuição no planeta. Devido à grande gama de espécies vegetais, ao seu crescimento depender dos valores extremos da temperatura e humidade e não apenas de valores médios, à imperfeição dos modelos climáticos atmosféricos que os fornecem e ainda aos diferentes tipos de solos, as indicações obtidas são ainda de carácter muito geral, não sendo dignas de confiança a nível regional [4]. Tendo em conta esta reserva, podemos no entanto indicar que estes modelos prevêem, em caso de duplicação do teor atmosférico de dióxido de carbono, uma deslocação geral para os pólos dos principais eco-sistemas: por ordem, a partir do equador, Tropicais, Subtropicais, Temperados Quentes, Temperados Frios e Boreais. A par disto, um desaparecimento quase completo das tundras, um avanço dos desertos e a substituição de muitas florestas tropicais por bosques temperados.

Os modelos mais complexos até agora construídos referem-se a culturas como o arroz, milho, trigo e outras gramíneas, entrando em conta com as características particulares destas espécies e das suas necessidades em radiação, água e temperatura através de toda a época de crescimento. Se a nível regional as conclusões são incertas, a nível global parecem bem estabelecidos os seguintes resultados: maiores dificuldades quanto ao cultivo do milho; regiões favorecidas e outras desfavorecidas quanto ao cultivo do trigo; e melhoria das condições para a produção do arroz.

Em Portugal ainda não há trabalhos detalhados sobre o assunto, mas estudos feitos para a zona da CEE apontam para uma

diminuição da produtividade agrícola que é mais notória nos países mediterrânicos. Este agravamento está intimamente relacionado com a deslocação para norte da cintura subdesértica saariana.

5. Conclusão

A detecção de um aumento da temperatura média superficial do globo, ligada ao incremento da concentração de CO₂ atmosférico, não pode ainda ser feita, pois que o *ruído de fundo* climático, isto é a variabilidade natural do clima, de ano para ano, é suficiente para obscurecer um eventual *signal* com aquela proveniência. No entanto, há uma tal concordância quanto à existência de perigos reais decorrentes do tipo de práticas em que actualmente se baseia o alto e crescente consumo energético da humanidade que os governos, alertados pela comunidade científica, começam a tomar consciência deste facto embora até ao momento não haja acções concretas a registar. A OMM (Organização Mundial de Meteorologia) passou recentemente a dedicar a estes assuntos um programa especial de investigação, pois que muito ainda há a fazer na elaboração de modelos que respondam às perguntas que qualquer analista de impacto deseja fazer: Onde vão acontecer mudanças climáticas? Com que intensidade? Quais as consequências para a biosfera, a hidrosfera e o meio ambiente em geral? Há meios de impedir ou alterar a marcha do processo? As respostas a estas perguntas influenciam, sem excepção, o futuro de todos nós...

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. J. F. AUIAR — «Alterações antropogénicas do clima», tese de Estágio Científico, Faculdade de Ciências de Lisboa, 1985.
- [2] H. I. SCHIFF — «A review of the carbon dioxide greenhouse problem» *Planetary Space Science*, n.º 29, págs. 935-950, 1981.
- [3] J. WILLIAMS (Ed.) — «CO₂, Climate & Society», IIASA Series, n.º 1, J. Wiley & Sons, 1978.
- [4] B. SANTER — «The use of general circulation models in climate impact analysis», *Climatic Change*, n.º 7, págs. 71-93, 1985.

II SEMANA DE MAGNETISMO

Com o apoio do INIC, JNICT, Secretaria de Estado do Ensino Superior e do Centro e Laboratório de Física da Universidade do Porto, realiza-se, de 6 a 10 de Outubro de 1986, um *Curso Livre sobre Magnetismo e Propriedades Magnéticas dos Materiais*. Em seminários, a cargo de físicos nacionais e estrangeiros, serão versados os temas:

- Magnetismo na Indústria Moderna;
- Paleomagnetismo;
- Processos Dinâmicos;
- Interações Competitivas.

O curso é aberto a universitários e a profissionais ligados à indústria, podendo os participantes contactar os grupos que, no Centro e Laboratório de Física do Porto, realizam trabalho de investigação em Magnetismo.

Haverá um número limitado de bolsas para participantes ligados ao ensino superior.

Os interessados poderão contactar a Comissão Organizadora (J. M. Machado da Silva, E. J. Seabra Lage, J. F. D. Montenegro), até 1 de Outubro de 1986 (telfs. 310290, 317717, 317751).

SOCIEDADE EUROPEIA DE FÍSICA

Pela primeira vez esteve em Portugal o «EPS traveling lecturer», este ano o Prof. H. Haken, Stuttgart (RFA). O Prof. Haken proferiu duas palestras em Lisboa, no Centro de Física da Matéria Condensada (Synergetics, an overview; Theory of non-equilibrium phase transitions, slaving principle and order parameters); no Porto, além da primeira daquelas palestras, apresentou o seminário «Pattern formation in systems far from thermal equilibrium».