

A FÍSICA E O AMBIENTE: UMA VISÃO ACTUAL

JOSÉ PINTO PEIXOTO

Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Neste artigo começamos por referir o papel que o determinismo laplaciano teve no desenvolvimento da Ciência e, em particular, no tratamento da problemática do ambiente. Assinalamos as duas grandes rupturas com o determinismo: a primeira, com o princípio da incerteza de Heisenberg, levou à criação da Mecânica Quântica; a segunda, com o estudo dos sistemas dinâmicos, levou à Teoria do Caos.

O Ambiente global, ou o sistema climático, é um sistema não linear em que todos os estados são transientes e de não equilíbrio; todos os seus componentes são sistemas caóticos. Em particular, a atmosfera é um sistema caótico, instável e dissipativo, em que a instabilidade se repercute na sua predictabilidade, que é limitada. Esta pode ser tratada e quantificada recorrendo à estrutura dos atractores, a partir dos expoentes de Lyapunov. Nestas condições, uma previsão correcta do sistema meteorológico não pode exceder pouco mais do que uma semana.

Os atractores do sistema dinâmico, que é a atmosfera, ficam confinados a uma região delimitada do espaço de fases. O ponto de fase permanece estatisticamente muito mais tempo sobre o atractor do que nas suas vizinhanças. Por isso, os atractores, que são de natureza fractal, podem identificar-se com as estatísticas a longo prazo da atmosfera, isto é, com o clima.

**Determinismo científico
e o Ambiente**

**Dinâmica dos Sistemas
Caóticos**

A complexidade da Atmosfera

**Limitação das simulações
matemáticas**

Instabilidade e predictabilidade

1. O Homem perante o Ambiente

Em termos dum modelo global e integrante, podemos considerar o ambiente constituído por dois grandes domínios: um referente ao sistema físico que nos rodeia — o sistema climático e outro, o sistema biológico, referente aos vários ciclos biológicos que decorrem no seio do primeiro.

Em sentido termo-hidrodinâmico ambos os sistemas são alimentados por fluxos de energia, de matéria e de informação.

Vamos, na acepção termodinâmica, tomar o ambiente natural, como o universo complementar do homem. Nesta concepção, é constituído pelos cinco subsistemas: a Litosfera, a Hidrosfera, a Atmosfera, a Criosfera e a Biosfera. Todos estes sub-sistemas são abertos para a matéria e a energia (Fig. 1).

O universo complementar é, de facto, o ambiente, isto é, o sistema climático global. Este é fechado para a massa mas aberto para a energia. Garante-se assim a existência do sistema, que sem perder massa, recebe energia, principalmente do Sol, e cede, por emissão de irradiação infravermelha, igual quantidade de energia ao espaço exterior. A energia recebida, proveniente de uma fonte a temperatura elevada, que é o Sol, é de alta qualidade, enquanto aquela que é emitida pela Terra, a uma temperatura muito mais baixa, tem uma entropia muitíssimo mais elevada.

Ao encararmos a Natureza, usamos, quase instintivamente, um mapa mental, pré-determinado, mas que está profundamente radicado na nossa cultura. Crescemos e fomos educados com a ideia de que a Ciência tinha por fim dominar a

CIÊNCIA ATRAVÉS DA EUROPA

Inscrições em Workshops para professores

Lisboa, Outubro / Novembro 1994

O Projecto «Science across Europe», desenvolvido nos últimos três anos na área de ciência-tecnologia-sociedade por uma equipa internacional de professores, tem tido uma boa aceitação. Em Portugal, existem já algumas dezenas de professores que se disponibilizaram a testar as unidades e/ou se inscreveram na rede do projecto, com um recurso no ensino ou integrado em projectos de escola. Na continuação das actividades ligadas ao projecto, a equipa de coordenação em Portugal propõe-se dinamizar dois workshops (W1 e W2) para professores.

O workshop W1 destina-se aos professores que, tendo aplicado as unidades, poderão partilhar as suas experiências na utilização do projecto.

O workshop W2 destina-se a divulgar o projecto e o modo de utilização das unidades entre professores que manifestaram interesse em conhecer o projecto e propõem inscrever as suas escolas na rede do projecto.

Os workshops, limitados a 30 participantes, realizar-se-ão na Av. da República, 37-4.º — 1000 Lisboa, nas seguintes datas:

- 18 de Outubro para o workshop W1;
- 24 de Novembro de 1993 para o workshop W2 (este decorrerá durante a Semana Europeia para a Cultura Científica). Para as inscrições e informações complementares, contactar:

Doutora MARIANA PEREIRA

Departamento de Educação FCUL,
Faculdade Ciências, Campo Grande — C1 - 3,
1700 Lisboa; Fax 01-757 36 24.

EPS - 14th General Conference on Condensed Matter Division

Madrid, March 28-31, 1994

Plenary Lectures

“Interaction of ions and electrons with bulk and surfaces”, P. Echenique (San Sebastian).

“Physics with third generation synchrotron radiation sources”, M. Altarelli (Grenoble).

“Nuclear magnetic ordering in metals”, F. Pobell (Bayreuth).

“Fullerenes”, H.W. Kroto (Sussex).

“Statistical mechanics” M.Parrinello (Ruschlikom).

“Quantum interference phenomena in superconducting mesoscopic systems”, V.V. Moshchalkov (Leuven).

Parallel Sessions

- A. Semiconductors and Insulators
- B. Surfaces and Interfaces
- C. Liquids and Statistical Mechanics
- D. Magnetism and Metals
- E. Macromolecules and Chemical Physics

Important dates:

- Dec. 1, 1993 - Deadline for reception of abstracts
Feb. 20, 1994 - Deadline for registration
- Deadline for hotel reservation

Further information:

14th General Conference of the Condensed Matter Division, GCCMD-14, Madrid 94

*Instituto de Ciencia de Materiales, Sede A,
CSIC - Serrano 144
E-28006 Madrid Spain
Tel. (34) (1) 561 88 06 (ext. 329/328)
Fax: (34) (1) 411 76 51*

Natureza. Era a ideia corrente que se estendeu pelos tempos, se acentuou com a grande revolução científica dos séculos XVII e XVIII e prosseguiu nos séculos XVIII e XIX, com a industrialização, e se tem vindo a prolongar, praticamente até aos nossos dias.

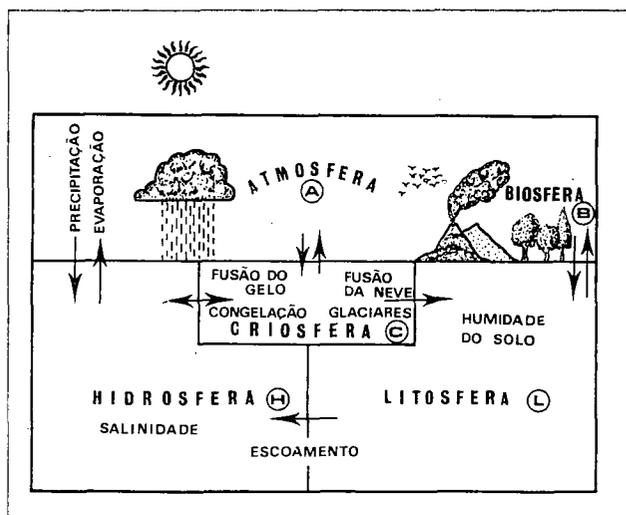


Fig. 1 — Diagrama esquemático do sistema climático.

É uma atitude característica da aproximação dualística da Ciência e da Filosofia Clássicas do Ocidente. De um lado, o homem, um ser livre e racional; do outro, uma Natureza que deve ser submetida, como se se tratasse dum autómato gigante, cujas regras de comportamento, a que chamamos «leis», a Ciência se encarregaria de descobrir e decifrar.

Esta dualidade exprime simultaneamente a imagem científica irreal do mundo e uma atitude, culturalmente viciada, *ab initio*. Era como se o ambiente tivesse sido criado, exclusivamente, para servir o homem.

A situação sobre estas duas atitudes evoluiu muito nas últimas décadas. Hoje temos uma posição de maior humildade e reconhecemos que o homem faz parte integrante do ambiente. A ciência actual já não nos induz a encarar a Natureza como um macrosistema, quase estacionário, que deva ser submetido à vontade do homem, nem como uma espécie qualquer de entidade passiva que possa e deva ser simplesmente manipulada. Começa a existir uma maior consciencialização dos perigos ecológicos e da nossa responsabilidade perante a Natureza.

À posição optimista dum progresso ilimitado e pré-determinado da Humanidade, sucedeu uma atitude de preocupação, de ansiedade e de dúvida. Constitui como que um sinal do período de transição por que a Cultura do



Licenciado em Matemática e em Geofísica pela Universidade de Lisboa, doutorado em Ciências Geofísicas, José Pinto Peixoto é autor de uma obra científica cuja extensão e qualidade impuseram o seu nome a nível internacional. Desde muito cedo (1956) tornou-se professor e cientista visitante do Departamento da Meteorologia do Massachusetts Institute of Technology (MIT), onde se desloca regularmente. O prestígio adquirido leva-lo-ia a exercer funções em outras Universidades estrangeiras e em organismos como a Organização Meteorológica Mundial (OMM).

Entre nós, como professor catedrático da Faculdade de Ciências de Lisboa, director do Instituto Geofísico da Universidade de Lisboa, presidente da SPUIAGG (Secção Portuguesa das Uniões Internacionais de Astronomia, Geodesia e Geofísica), colaborador generoso e assíduo de muitas das nossas novas Universidades, etc., a sua acção tem sido uma coerência e nível invulgares.

O mesmo se pode dizer da colaboração que deu, durante mais de um quarto de século, ao Instituto Nacional de Investigação Científica (anteriormente Instituto da Alta Cultura), bem como à Academia das Ciências de Lisboa para cuja presidência tem sido repetidamente eleito.

A sua obra científica, espalhada por prestigiadas publicações, tem abordado temas de Hidrologia, Meteorologia, Climatologia, Fundamentos da Termodinâmica, Teoria da Informação, História da Ciência, etc..

É autor de várias monografias publicadas pela OMM, UNESCO, Secretaria de Estado do Ambiente. Muito recentemente, publicou livros «Sistemas, Entropia, Coesão» (com F. Carvalho Rodrigues) e «The Physics of Climate» (com Abraham Oort).

Pinto Peixoto tem recebido numerosas distinções e provas de apreço, sendo de destacar — para além de vários prémios prestigiantes — a reunião científica internacional, organizada por ocasião dos seus 65 anos, com a presença e colaboração de eminentes cientistas. Numa revista como a *Gazeta de Física* seria imperdoável não pôr em destaque as invulgares qualidades didácticas do Prof. Pinto Peixoto. Não é qualquer Professor que consegue manter o seu auditório — alunos ou colegas — suspensos de uma exposição, e sempre com facetas inesperadas, que pode prolongar-se... Deus sabe até quando.

Tudo isto, para mais, feito por um Homem de cultura e grande generosidade.

homem está a passar. Hoje, na «aldeia global» em que vivemos, reconhecemos a fragilidade e a vulnerabilidade da nave terrestre em que somos obrigados a co-habitar. E temos que estar todos empenhados em preservar as reservas limitadas que nos são oferecidas, em solo, em água e em ar.

São um património colectivo da Humanidade, que urge proteger e respeitar para garantir a nossa sobrevivência. São muito mais do que recursos naturais que devemos gerir bem!

Uma situação que está a mudar tão rápida e profundamente tem que forçosamente gerar grandes tensões. É certo que os problemas e as tensões que surgem na interacção homem-ambiente não podem ser resolvidos, exclusivamente, pela Ciência. Mas, devemos acentuar bem, que sem o concurso da Ciência não é possível a sua solução.

Dentro desta concepção globalizante, o homem que é também um sistema termodinâmico aberto, faz parte integrante do ambiente, mas com responsabilidade de ser racional. Ganhou a consciência de que deixou de ser um mero espectador, ou um usufrutuário exclusivo dos bens que o rodeiam. Esta nova atitude gerou o conceito do *ambiente sustentável* em que a prudência na sua utilização e a preocupação com a sua preservação são hoje factores determinantes.

Por outro lado, do ponto de vista científico, com os progressos obtidos no estudo dos sistemas dinâmicos, o ambiente tem de ser encarado como um sistema dinâmico não linear, sujeito a um caos determinista, o que implica uma nova visão da atitude do homem perante o ambiente.

2. O Determinismo Científico e o Ambiente

2.1. A Génese do Determinismo Científico

A Ciência está também numa fase de transição. Simultaneamente, estamos a assistir a uma revolução tecnológica, que envolve principalmente a informação, a energia e a biologia. Os progressos, a que temos vindo a assistir e que afectam biliões de seres humanos, são o resultado da investigação científica e tecnológica desenvolvida, apenas, por um número relativamente reduzido de cientistas. Não há qualquer outro esforço colectivo, nem qualquer inovação, que tenham originado uma tal multiplicação de frutos para o bem-estar e qualidade de vida da Humanidade. Mas parece que estamos

ainda na fase inicial desta revolução científica, que já está a decorrer. Com efeito, não só se estão a alargar as fronteiras do nosso conhecimento, como também está a modificar-se o nosso modelo do saber sobre as concepções qualitativas do Mundo que nos rodeia.

A Ciência Clássica punha ênfase no *determinismo* e na *reversibilidade*; na *ordem* e na *regularidade*. O comportamento futuro dum sistema estava contido no seu presente, que, por sua vez, tinha sido determinado pelo passado. Do ponto de vista determinístico a distinção entre passado, presente e futuro era apenas uma questão de convenção.

Com o positivismo científico depressa se admitiu que as condições presentes, em conjunto com as leis que regem o comportamento de um sistema, «determinavam», completamente, as condições futuras. Esta hipótese assenta na atitude laplaciana do determinismo científico. Laplace escreveu o seu famoso tratado «*Mécanique Celeste*» nos fins do século XVIII e princípios do XIX aplicando as leis de Newton ao movimento dos corpos celestes. Como ele próprio dizia: o conhecimento das condições iniciais e a aplicação correcta das leis da Mecânica «determinam inexoravelmente» o movimento futuro dos corpos celestes, com todas as suas características, permitindo prever as suas posições, etc. Este determinismo laplaciano gerou na comunidade científica, durante todo o século XIX e o século XX, uma confiança quase ilimitada na utilização da Ciência e na sua aplicação ao estudo da Natureza!

Foi com base na «profissão de fé», que constituía o determinismo, que se começaram a investigar temas bem mais complexos (Termodinâmica, Dinâmica dos Flúidos, Mecânica Estatística, etc.). A esta atitude de confiança no determinismo científico não escaparam os meteorologistas (e outros cientistas das Ciências do Mundo Natural), que a partir do início do século XX começaram a utilizar as leis da Física, já bem estabelecidas, para a previsão do comportamento futuro da atmosfera. E, hoje, todos nós sabemos a importância que tem a previsão do tempo em todas as actividades humanas.

2.2. A ruptura com o determinismo científico

A primeira ruptura com o determinismo laplaciano deu-se por altura da década dos anos 20, já neste século, quando se começaram a compreender melhor os fenómenos à escala subatómica. Reconheceu-se que tinha que haver uma nova Mecânica para estudar o mundo sub-atómico, já que a Mecânica de Newton se revelou

incapaz e não correspondia às necessidades postas pela fenomenologia que se ia descobrindo, à escala atômica. Surgiu, assim, a «Mecânica Quântica», que postula uma dada «incerteza observacional» a que «não se pode escapar nem por princípio, nem na prática» (Princípio da Incerteza de Heisenberg).

Teve de se aceitar que os acontecimentos individuais, à escala atômica, vêm afectados duma dada incerteza, que só pode ser reduzida (mas nunca evitada, em termos absolutos) quando se consideram os valores médios estatísticos de um grande número de tais acontecimentos, que é precisamente o que se passa no mundo sub-atômico.

Como era de esperar, com a ruptura do primado do determinismo laplaciano houve um certo desconforto entre os cientistas, que se tinham habituado a ver neste princípio um «*non plus ultra*», a fronteira que separava a Ciência moderna, «livre e arejada», da Ciência primitiva, «casuísta e imbuída de superstições e de caprichos». O paradigma desta atitude foi personalizado por Einstein que até ao fim da vida resistiu à ideia duma base puramente probabilística da Física, porque «Deus não pode jogar aos dados».

Para avaliar até que ponto tem sido difícil modificar a nossa atitude, na adesão ao determinismo de Laplace, vamos recorrer ao testemunho de Max Planck. Planck, apesar de ser um dos criadores da Mecânica Quântica, em que um dos pilares é a teoria das probabilidades, era um determinista convicto. O Princípio da Causalidade, com todas as implicações que tem para o determinismo científico, era para ele a lei suprema da Natureza. O carácter estatístico da Mecânica Quântica devia atribuir-se, segundo Planck, à nossa interacção com a Natureza, que, se fosse deixada a si mesma, seria estritamente determinista.

Apesar desta revolução do pensamento da Ciência à escala atômica, continuava a aceitar-se que o comportamento do mundo macroscópico era diferente e que se podia e devia continuar a submeter-se ao determinismo laplaciano! Era uma nova manifestação do dualismo na atitude do homem, que lhe trazia um certo conforto e tranquilidade do ponto de vista intelectual.

No fim deste século estamos a transpor um dos grandes paradigmas que assentava na busca do *simples*, do *regular* e do *periódico*. Por toda a parte descobrimos, hoje, o *complexo*, a *multiplicidade*, a *diversidade*, a *desordem* e a *temporalidade*. É uma atitude geral em todos os domínios da investigação, mas que é particularmente evidente nas Ciências da Atmosfera, com todas as implicações que tem para o estudo do ambiente e

na mudança das nossas concepções sobre o Universo como um todo, como nos é dado pela Cosmologia Moderna.

A Astronomia Clássica, preocupava-se, fundamentalmente, com a regularidade dos movimentos periódicos e com a ordem que se manifestava no comportamento dos sistemas planetários, ou na estrutura das galáxias.

Mas quais são as origens, ou as razões desta reformulação da nossa atitude perante a fenomenologia do real? Supomos que um elemento importante foi a descoberta de que a irreversibilidade pode constituir uma fonte de ordem. Afinal, sabe-se agora que são possíveis as reconstituições de estruturas ordenadas e coerentes longe do equilíbrio (células de convecção de Bénard, etc.). Tudo se passa como se a irreversibilidade reconstituisse a ordem e reagrupasse, longe do equilíbrio, a informação que andava dispersa e quase perdida.

Outra razão determinante, é a melhor compreensão que temos agora dos sistemas dinâmicos não lineares, especialmente aqueles que estão sujeitos a condições instáveis de não equilíbrio.

O interesse por estes sistemas que são, afinal, a imagem matemática do mundo natural, aumentou de forma considerável na última década e o seu estudo tem levado a um crescimento quase explosivo do nosso conhecimento e do nosso saber.

A não linearidade e a instabilidade implicam uma grande sensibilidade para as condições iniciais, o que leva a uma perda de predictabilidade, ou mesmo à sua ausência total, o que é contrário às concepções do determinismo laplaciano. Foi a segunda ruptura com o determinismo clássico.

Reconhecemos hoje que a abordagem clássica, cuja ênfase incide sobre a *estabilidade*, a *regularidade*, a *permanência*, a *predictabilidade*, ignora aspectos essenciais dos sistemas naturais que são, em geral, instáveis e altamente não lineares. Os sistemas dinâmicos não lineares apresentam, fora do equilíbrio, uma variedade de comportamentos dinâmicos intrínsecos, muito complexos, tais como:

a) A possibilidade da coexistência de vários regimes simultaneamente estáveis, para certos valores dos parâmetros constitutivos que caracterizam o sistema;

b) A emergência de uma dinâmica caótica, em que um sistema de equações de evolução, determinístico, dá origem a um conjunto de soluções, aparentemente

erráticas e desordenadas, semelhantes, aos que seriam produzidos por processos estocásticos aleatórios.

De facto, não há a garantia de que o clima constitua um sistema *ergódico, transitivo*. Parece que se comporta como um sistema *quase transitivo*, com saltos relativamente rápidos, à escala do tempo geológico, que poderiam explicar a existência de grandes alternâncias do clima e alterações do Ambiente.

3. A Dinâmica dos Sistemas Caóticos

Definimos sistema caótico como aquele em que pequenas variações do estado, por vezes não detectáveis, podem produzir grandes variações em estados futuros.

O termo caótico classifica uma classe de movimentos de sistemas físicos deterministas, em que a evolução no decurso do tempo é sensível às condições iniciais. O caos tem uma estrutura subjacente que implica um certo ordenamento que não é, muitas vezes, visível no *espaço físico* e que se deve procurar no *espaço de fases*.

As variáveis dependentes, que representam as grandezas que definem o estado do sistema, ou os coeficientes de modelos espectrais (a única variável independente é o tempo) são tratadas como se fossem coordenadas num espaço cartesiano multidimensional, tais como os espaços de Gibbs e de Carathéodory da Termodinâmica, que constitui o *espaço de fase desejado*. O estado de um sistema num dado instante passa a ser representado por um ponto nesse espaço. À medida que o estado do sistema evolui no decurso do tempo, os pontos figurativos dos sucessivos estados descrevem no espaço de fases uma *trajectória*, ou uma *órbita*. Uma solução periódica é representada por uma órbita fechada, sem pontos múltiplos; uma solução estacionária reduz-se a um ponto fixo. Duas órbitas distintas nunca se podem intersectar, ainda que se possam aproximar, uma da outra, assintoticamente, visto que, por definição, um sistema não pode estar simultaneamente em dois estados diferentes; mas no decurso do tempo o sistema pode passar por estados quase idênticos, ou infinitamente próximos de estados anteriores.

Os sistemas físicos reais, com medidas finitas, isto é, com grandezas extensivas invariantes, ou limitadas, assumem uma importância especial na dinâmica dos sistemas não lineares dissipativos. O forçamento e a dissipação combinam-se para restringir todas as trajectórias a uma região confinada do espaço de fases e uma vez que a órbita penetra nesta região do espaço de fases correspondente à condição de invariância de uma

das suas propriedades, passa a permanecer nela indefinidamente. Para estes sistemas dinâmicos dissipativos pode definir-se um subconjunto do *espaço de fases* que se designa por *atractor* e que constitui o envolvente limite para que tendem, assintoticamente, as trajectórias acessíveis aos vários estados do sistema, quando as variações transientes desaparecem. Tudo se passa como se as trajectórias referentes a vários estados convergissem para esse conjunto atractor.

O *espaço físico* em que ocorre a circulação é substituído por um *espaço físico* abstracto, substituindo o comportamento da circulação física original pelas «trajectórias no espaço de fases». As propriedades da circulação real passam a ser estudadas através das propriedades topológicas das configurações no espaço físico, originando o que se pode chamar uma *dinâmica topológica* da circulação geral.

A principal causa da origem da complexidade é o fenómeno da *bifurcação*, que surge quando um regime repetitivo deixa de ser estável, podendo dar origem a um regime diferente do sistema, do ponto de vista qualitativo, ou topológico. Por exemplo, um estado de equilíbrio pode dar origem a dois estados de equilíbrio.

Em teoria dos sistemas dinâmicos estes regimes são representados por «objectos geométricos» designados, como dissemos, por atractores, imersos num espaço enquadrado pelas variáveis que participam na dinâmica do sistema, que é o espaço físico.

O atractor que descreve um regime repetitivo estacionário (localmente independente do tempo) reduz-se a um ponto, se for um estado de equilíbrio; se o regime for periódico, reduz-se a uma curva fechada sem pontos singulares. Os movimentos nestes atractores são previsíveis, no sentido em que pequenos erros na definição de um ponto (estado) do atractor se mantêm constantes ou decrescem com o tempo. Pelo contrário, o atractor dum regime caótico contém trajectórias aperiódicas que mostram uma grande sensibilidade para as condições iniciais; pequenas perturbações nos dados iniciais crescem, em média, exponencialmente, originando movimentos caóticos e imprevisíveis. Os sistemas caóticos, portanto, não têm predictabilidade. Apresentam uma *geometria fractal*, isto é, o atractor constitui uma entidade geométrica, difícil de visualizar na geometria euclidiana, com a mesma forma em todas as escalas (auto-semelhança) cuja dimensão (à Hausdorff) é um número fraccionário e não inteiro. É por isso que o seu atractor, sendo um *fractal*, se designa por atractor estranho (Fig. 2).

Este atrator não é constituído por um simples ponto, nem por uma curva, nem por uma variedade de ordem superior. É constituído por uma infinidade complexa de variedades. De facto, uma recta intersecta o atrator estranho numa infinidade não numerável de pontos, separados por subconjuntos contínuos, que constituem, afinal, um conjunto de Cantor.

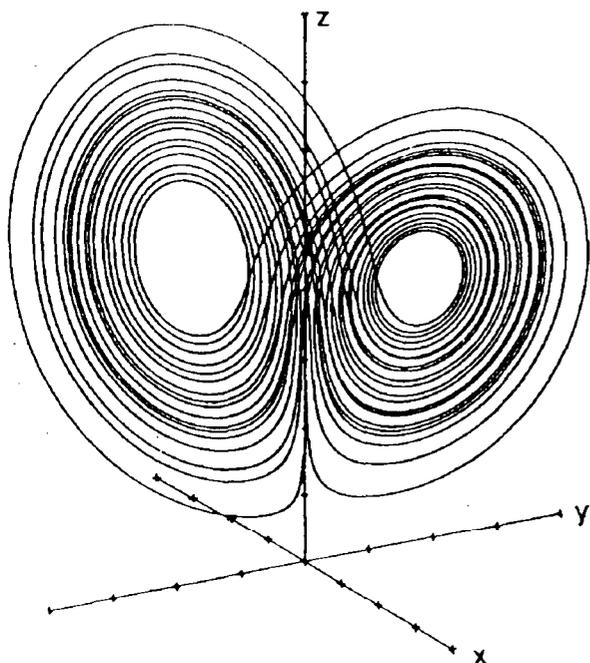


Fig. 2 — Atrator estranho (borboleta de Lorenz). Repetições com saltos inesperados: a curva representando uma sequência de estados do modelo de convecção enrola-se sobre si mesma ao longo de um eixo horizontal mas as «espessuras» vão variando progressivamente até que muda para a direcção oposta.

O conceito de predictabilidade é muito mais amplo e abrangente do que o conceito usual de previsão. A predictabilidade é a capacidade potencial, não só de avaliar a evolução cronológica do sistema, mas também a capacidade de prever regimes de comportamento, a sua variabilidade e a transição entre os diversos regimes.

A sensibilidade às condições iniciais pode ser quantificada em termos dos expoentes de Lyapunov. Estes medem a taxa da divergência, exponencial com o tempo, dos estados de dois sistemas, inicialmente vizinhos. Os expoentes de Lyapunov permitem quantificar as propriedades médias da estabilidade de um atrator. Um expoente de Lyapunov positivo indica um movimento instável de um sistema dinâmico, com trajectórias limitadas. Um sistema caótico tem, pelo menos, um expoente de Lyapunov positivo (1).

O aumento da incerteza no decurso do tempo de um sistema caótico pode interpretar-se em termos de perda de informação acerca das condições iniciais. Trata-se afinal de um aumento da entropia e que reflecte a taxa a que pontos inicialmente vizinhos no espaço de fases se dispersam no decurso do tempo. Esta taxa pode exprimir-se em bits por segundo. Como é evidente, a entropia (topológica) está relacionada com os expoentes de Lyapunov.

Apesar de uma semelhança aparente e superficial, *caos* não é *acaso*. O caos é o comportamento aparentemente desordenado e turbulento dum sistema determinístico. Há, portanto, uma certa ordem no caos.

Outra propriedade dos sistemas caóticos é a de que os seus estados nunca se repetem de forma exacta, ainda que, em muitos casos, se possam comportar duma forma quase cíclica. De facto, se os estados se repetissem exactamente, não seriam caóticos, visto que a natureza «determinística» das leis naturais asseguraria um comportamento único, bem definido, do sistema, numa perpetuação do ciclo, enquanto o sistema não fosse perturbado do exterior.

A possibilidade de um comportamento caótico de sistemas dinâmicos é conhecida desde Poincaré (1891), quando estudou o problema dos três corpos da Mecânica Celeste. No entanto só foi, de facto, reconhecido e identificado em 1961-1963 pelo Prof. Edward Lorenz (M.I.T.), ao tentar resolver, por simulação matemática,

(1) Se, num determinado instante, considerarmos uma hipersfera de raio infinitesimal $\varepsilon(0)$, centrada num ponto do atrator, esta transforma-se num elipsóide, devido à não uniformidade do «movimento» das trajectórias no espaço de fases, cujos eixos principais são num instante posterior t , $\varepsilon_i(t)$. Os expoentes de Lyapunov definem-se a partir da expressão:

$$\gamma_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log_2 \left(\frac{\varepsilon_i(t)}{\varepsilon(0)} \right)$$

com $i = 1, 2, \dots, N$. Os expoentes positivos de Lyapunov medem a divergência exponencial média de trajectórias, que eram inicialmente muito próximas. Logo, os expoentes positivos permitem quantificar o grau de sensibilidade, da dependência das condições iniciais. Os expoentes na equação anterior vêm expressos em bits de informação por unidade de tempo. Se L representar a soma dos expoentes positivos, o tempo de duplicação dos erros é L^{-1} . Se as condições iniciais forem determinadas com rigor de l bits, então ao fim do tempo l/L a incerteza inicial ter-se-á estendido a todo o atrator. É com base no crescimento dos erros que os l permitem quantificar a predição.

um problema relacionado com a previsão numérica do tempo e depois com a convecção.

4. A Complexidade e a irregularidade da atmosfera

4.1. Caracterização da atmosfera

A atmosfera, que é o subsistema central do sistema climático, constitui um sistema extremamente complexo. Do ponto de vista termo-hidrodinâmico é um sistema heterogêneo, multicomponente e politérmico; é um sistema aberto, não isolado em que todos os estados são transientes. A atmosfera é um sistema sempre em movimento, com circulações numa vastíssima gama de escalas espaço-temporais em regime forçado pelos efeitos térmicos e mecânicos, num globo animado de movimento de rotação. Além disso, ao considerar a atmosfera como um subsistema do sistema climático global, não se podem ignorar as interações entre a atmosfera e os outros subsistemas complementares, designadamente, com a litosfera, os oceanos e a criosfera. Estas interações traduzem-se pelos fluxos de massa, de energia e de quantidade de movimento através da interface, nos dois sentidos. São interações não lineares que afectam o comportamento próprio de cada um deles, originam numerosos efeitos de retroacção que, por sua vez, se manifestam em escalas espaço-temporais muito variadas.

Devido à incidência desigual da radiação solar, entre as regiões tropicais e as regiões polares do globo, gera-se um aquecimento diferencial com um forte gradiente meridional da temperatura.

Estas diferenças de temperatura conduzem a desigualdades de densidade e de pressão, que vão originar a circulação da atmosfera (ventos). O aparecimento dos ventos confirma o Princípio de LeChatelier-Bräun, pois são gerados exactamente pelas diferenças de temperatura, que eles depois tendem a opor-se e a reduzir, ao transportarem entalpia e energia latente das regiões mais aquecidas para as regiões mais frias (Fig. 3).

A atmosfera é um sistema irregular e dissipativo. A dissipação resulta dos mecanismos de interacção não lineares, internos e externos, estes devidos às condições fronteiras, já de si variáveis no tempo. Os mecanismos de interacção não lineares, permitem a transferência de energia entre a grande diversidade de escalas espaço-temporais, que ocorrem no interior da atmosfera, devido à sua instabilidade intrínseca. Essa transferência dá-se em regime de cascata descendente, à Kolmogoroff. A não linearidade e a acção dos agentes forçadores externos,

não permitem formular previsões, para além de um horizonte temporal limitado, condicionando a predictabilidade da atmosfera. É evidente que a atmosfera apresenta em alguns aspectos um comportamento quase periódico em que os estados futuros são previsíveis. É o caso das variações diurnas e sazonais forçadas por factores cósmicos externos (alternância dos dias e das noites e a sequência das estações do ano). No entanto, não são estes os casos que têm interesse na previsão do tempo, mas sim os que resultam da irregularidade e da diversidade da fenomenologia da atmosfera. Sem esta irregularidade e diversidade não faria sentido a previsão do tempo.

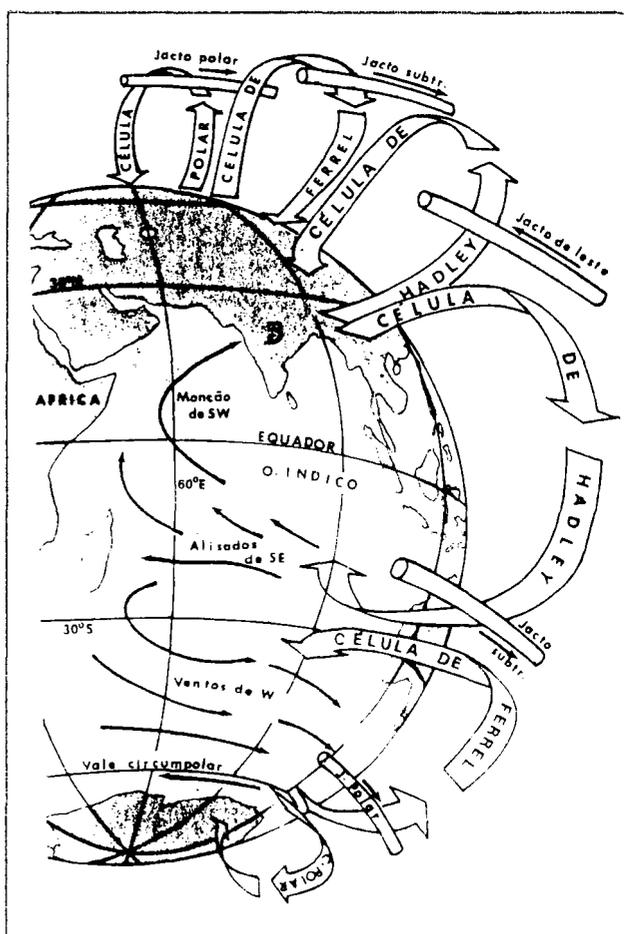


Fig. 3 — Descrição esquemática da circulação geral da atmosfera.

Vejamos agora que a atmosfera não é um sistema canónico e que todos os estados são transientes. Dos vários sistemas de circulação que ocorrem na atmosfera uns são estáveis (convergentes), enquanto outros são instáveis (divergentes). Diz-se que um sistema é estável se, quando for ligeiramente perturbado, converge para

uma sucessão de estados que poderiam ter ocorrido na ausência da perturbação. Um sistema diz-se instável quando o estado a seguir a uma pequena perturbação diverge dos estados futuros que poderiam ter ocorrido senão se verificasse a perturbação.

Se tomarmos como referência o estado de equilíbrio, diríamos que um sistema é estável, ou instável, quando perturbado tende a regressar, ou a afastar-se, respectivamente do estado de equilíbrio.

Estes conceitos são extremamente importantes na análise da predictabilidade, que para sistemas estáveis pode ser ilimitada, enquanto para sistemas instáveis é muito limitada.

A atmosfera é um sistema instável no sentido de que dois estados, que num dado instante inicial diferem muito pouco entre si, evoluem no decurso do tempo para estados progressivamente mais afastados (Fig. 4). É portanto, um sistema que tem uma grande sensibilidade para as condições iniciais, um dos requisitos para que a atmosfera tenha um comportamento *caótico* (isto é, irregular, desordenado e turbulento). A diversidade, a irregularidade e a variabilidade do comportamento da atmosfera são propriedades inerentes ao *caos*, que predomina na atmosfera, e são determinantes para a unidade do seu comportamento.

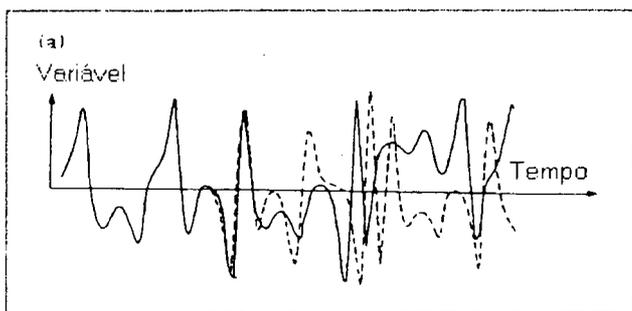


Fig. 4 — Duas saídas do mesmo modelo com condições iniciais muitíssimo próximas. A partir de dois terços do eixo dos tempos a semelhança entre as variáveis previstas (ordenadas) desaparece virtualmente.

4.2. Simulação matemática da atmosfera: limitações

Aceita-se que a estrutura que se observa na atmosfera e o seu comportamento são bem representadas pelas Leis da Física e da Química e que não há razões para se pôr em dúvida a validade das leis fundamentais da Física, estabelecidas no decorrer dos três últimos séculos. De facto, muitas das leis que se aplicam ao estudo da atmosfera, designadamente as leis da estática e da

dinâmica dos fluidos, as leis da conservação da massa e da energia e as leis da radiação, são leis bem conhecidas e que já deram as suas provas. No entanto, mesmo quando se considera um fenómeno simples da atmosfera, o seu estudo requer a aplicação simultânea de várias leis. Acontece, porém, que muitas vezes se dá a circunstância feliz de haver uma, ou apenas um número reduzido, que têm um papel determinante no estudo de um certo fenómeno.

Em geral, os sistemas dinâmicos são descritos em termos de conceitos geométricos, e o estado de um sistema, como a atmosfera, pode ser definido por um número limitado de grandezas (variância do sistema) que podem ser funções do tempo. As variações destas grandezas satisfazem, como no caso da atmosfera, a um número equivalente de equações.

É importante referir que o progresso no estudo da atmosfera assenta na combinação das observações com a teoria.

A modelação matemática conduz a resultados independentes das observações, mas que têm de ser validados e baseados no método observacional.

É também importante referir que os modelos, ainda que assentem nas equações da dinâmica, por serem modelos, diferem nas hipóteses formuladas, nas simplificações introduzidas, nas parametrizações que se utilizam, na natureza das condições fronteira, etc. Mas, todas estas hipóteses de trabalho e simplificações resultam do conhecimento que se tem do sistema físico que é a atmosfera e este é obtido por via experimental, observacional. Encarada desta forma, a simulação matemática é um exercício numérico gigantesco, que usa a Matemática para descrever, incompletamente, o que já se conhece, e a Análise Numérica para iterar o que «se põe» e «o que se vai obtendo», que «se volta a pôr», etc.

As variações atmosféricas são especificadas apenas nos nós de um *discretum* conceptual, ou ajustam-se a desenvolvimentos em série de Fourier (ou de outras quaisquer funções ortogonais), que têm de ser, inevitavelmente, truncadas. Estas formas de representação dos campos das grandezas meteorológicas, tanto num caso como no outro, não permitem representar a estrutura mais fina dos campos, filtrando, assim, a fenomenologia de menor escala.

A resolução do *discretum* que cobre a atmosfera é da ordem dos 100 km na horizontal e de 1 a 2 Km. na vertical. A esta resolução, usada em modelos operacionais da previsão do tempo, correspondem milhões e milhões de números. Os modelos

correspondentes, que usam desenvolvimentos de Fourier, ou outro sistema adequado de funções ortogonais, ao longo de paralelos na horizontal, estendem esse desenvolvimento até um número muito considerável de componentes (o ECMWF usa um modelo T-213).

Ambos os tipos de especificação seriam inconcebíveis e, até mesmo, proibitivos para o tratamento da atmosfera em estudos do clima. Daí a necessidade de utilizar modelos reduzidos, ditos de *ordem mais baixa*, em que o número de equações pode descer para menos de dez, ou em que se conservem apenas um número reduzido de componentes espectrais.

Até há poucos anos acreditava-se que a previsão do tempo se devia vir a aperfeiçoar à medida que os meios computacionais, a qualidade e a quantidade das observações melhorassem e aumentassem e os modelos matemáticos se aproximassem do modelo perfeito.

A simulação matemática parecia duplicar os aspectos essenciais do comportamento físico da atmosfera. Esperava-se que com os sucessivos aperfeiçoamentos viria a ser possível obter um modelo (quase) perfeito que incluísse toda a fenomenologia característica do comportamento do sistema físico real que é a atmosfera, permitindo, portanto, uma predictabilidade quase ilimitada.

Esta era a posição dos meteorologistas na década de 70, até aos trabalhos de Lorenz que mostravam a limitação da predictabilidade intrínseca da atmosfera. Um modelo perfeito duplicaria, portanto, a falta de predictabilidade da atmosfera (Fig. 5).

Além do conceito intrínseco de predictabilidade, inerente ao sistema físico real, anteriormente definido, é necessário definir a predictabilidade do modelo matemático que simula o comportamento da atmosfera. Assim, define-se capacidade predictiva do modelo como um limite teórico assintótico da possibilidade das previsões do mesmo.

5. A instabilidade e a predictabilidade da atmosfera

Os atratores do sistema dinâmico, que é a atmosfera, estão confinados ao interior de uma região limitada. O ponto de fase permanece estatisticamente muito mais tempo sobre o atrator do que nas regiões vizinhas. *Os atratores podem identificar-se com as estatísticas a longo prazo, isto é, com o clima.*

Analisemos algumas consequências e implicações da teoria dos sistemas dinâmicos não lineares, quando aplicada aos problemas do tempo e do clima, ou, mais especificamente, aos problemas da atmosfera. Esta

PREDICTIVE SKILL IN NUMERICAL WEATHER PREDICTION

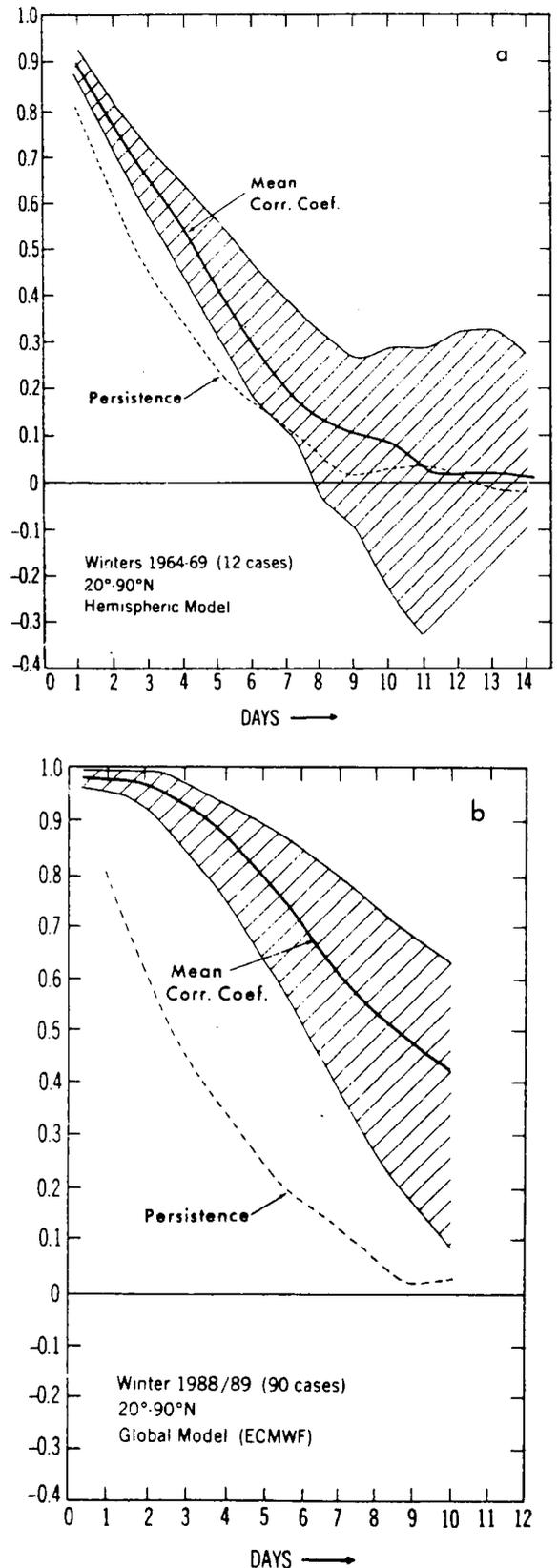


Fig. 5 — Melhoria na previsão numérica do tempo e o seu progresso desde o início dos anos 60 até ao final dos anos 80.

(Segundo Peixoto e Dort, 1992)

constitui um sistema dissipativo e possui mecanismos de interação não lineares entre várias escalas do movimento e está sujeita a efeitos forçadores externos.

A instabilidade parece ser a propriedade mais fundamental dos sistemas dinâmicos não lineares e pode, como dissemos, ser considerada a causa da irregularidade.

As soluções são instáveis, relativamente a pequenas perturbações. A aperiodicidade implica instabilidade, que por sua vez vai originar irregularidade e, portanto, falta de predictabilidade.

Devemos acentuar que algumas das flutuações que se observam na atmosfera são de natureza intrínseca e não resultam de irregularidades ou de variabilidade forçadoras externas.

Mas, a maior influência da irregularidade da atmosfera é a que se repercute na sua predictabilidade, isto é, na limitação que impõe à capacidade de prever o tempo, para períodos alongados. *A predictabilidade é o limite teórico para que tendem assintoticamente as possibilidades de prever o comportamento futuro de um sistema.* Um sistema, mesmo determinista, terá uma predictabilidade limitada, ou ilimitada, conforme seja instável ou estável.

A predictabilidade da atmosfera envolve aspectos muito mais vastos e profundos do que o de simplesmente prever o estado do tempo num certo e determinado instante. Pode englobar a previsão das condições médias da atmosfera num dado intervalo de tempo, numa dada região, a previsão do comportamento dinâmico de várias escalas espaciais, da duração e persistência de vários regimes de circulação da atmosfera, ou da transição de um regime para outro, etc.

Essa predictabilidade pode ser tratada e quantificada do ponto de vista da dinâmica dos sistemas caóticos, recorrendo em especial à estrutura dos atratores, a partir dos expoentes de Lyapunov.

Lorenz mostrou que no caso dos sistemas meteorológicos, o inverso dos expoentes de Lyapunov é da ordem de 2,5 dias. Logo a quantidade de informação requerida para elaborar uma previsão aumenta exponencialmente com o tempo com um factor de 2,5 dias. Nestas circunstâncias uma previsão perfeita (correcta, precisa) do estado do tempo nunca poderá ir além dum certo limite. Verifica-se assim que a predictabilidade do sistema meteorológico é limitada, talvez até pouco mais que uma semana.

Pode agora pôr-se a questão de saber se a qualidade da previsão a 24 horas pode ser melhorada a ponto de ser

quase infalível. Parece altamente improvável que mesmo um modelo perfeito possa produzir uma previsão aproximadamente exacta. De facto, o tempo de dobragem de 2,5 dias, obtido por Lorenz, aplica-se a escalas de centenas de quilómetros na horizontal. Ora para fenómenos de menor escala, como trovoadas, os erros dobram em algumas horas, ou em minutos, em vez de dias.

Portanto, mesmo na hipótese, pouco realista, de se observarem com suficiente rigor escalas destas dimensões numa base global, como as escalas estão dinamicamente ligadas entre si, os erros nas escalas inferiores, uma vez estabelecidos, vão introduzir erros nas escalas mais elevadas que, por sua vez, passam a aumentar, como se estivessem presentes nas condições iniciais à escala sinóptica.

Comparemos estes resultados com os da Mecânica Celeste em que é possível prever a posição dos planetas com períodos de milhões de anos.

É evidente que esta enorme diferença de predictabilidade, num e noutro caso, não é devido à falta de talento dos meteorologistas, quando comparados com os astrónomos. É, apenas, o resultado da diferença entre as naturezas dos dois sistemas dinâmicos correspondentes. De facto, nós sabemos que o sistema meteorológico constitui um sistema dinâmico instável, aperiódico, incompatível com os paradigmas de investigação deterministas, baseados na Física Clássica. É esta instabilidade que gera a falta de predictabilidade intrínseca, que não se pode atribuir ao carácter quase aleatório do tempo, nem às complicações provenientes da presença de uma grande variedade de factores, de difícil controlo, como durante tantos anos fomos levados, apressadamente, a concluir.

A falta de predictabilidade continuaria a verificar-se, mesmo que fosse possível conhecer exactamente a acção de factores não controláveis. Resulta da complexidade inerente à dinâmica intrínseca dos sistemas caóticos, como é a atmosfera.

Há mais de duas décadas que os cientistas da atmosfera têm vindo a investigar as causas e as consequências do que a experiência e a evidência revelavam sobre as limitações no horizonte temporal das previsões determinísticas do estado da atmosfera.

A expectativa clássica de que as soluções, com condições iniciais semelhantes, seriam também semelhantes, foi-se esbatendo e tornou-se, mesmo,

insustentável. Verificou-se, ainda, que, para além de um certo período de tempo, as previsões obtidas pelas sucessivas iterações não tinham contrapartida com a realidade. É o que se tem vindo a verificar com as previsões a 30 dias, por exemplo.

Os trabalhos de Lorenz vieram demonstrar que, afinal se verificava uma situação completamente diferente; as soluções tornam-se rapidamente independentes das condições iniciais, mas situam-se, no entanto, dentro de um domínio estatístico confinado. À medida que o movimento se vai desenvolvendo, as imagens dum conjunto de pontos inicialmente vizinhos num espaço multidimensional de fase, vão seguir trajectórias diferentes, divergindo em várias direcções, dobrando-se, por vezes, algumas sobre si mesmas. Ao fim de algum tempo as imagens dos pontos que eram inicialmente vizinhos, afastam-se e a bola inicial que continha os pontos imagens, deforma-se, ampliando-se numas direcções e comprimindo-se noutras.

Temos que reconhecer que os sistemas caóticos constituem a generalidade e não a excepção dos sistemas naturais. Foram os computadores, com a grande capacidade de cálculo, de simulação e de representação gráfica, que permitiram lançar luz e até visualizar o comportamento destes sistemas dinâmicos não lineares e ajudaram a compreender as características, aparentemente estranhas e confusas, das configurações e a perceber a estrutura do movimento caótico.

O comportamento caótico está associado à não linearidade e à perda de estabilidade das soluções estacionárias e periódicas. Assim, o comportamento caótico da atmosfera provém, exactamente, dos mesmos mecanismos de instabilidade que os meteorologistas sabem que vão determinar e manter o aparecimento de depressões, de ciclones, de sistemas convectivos e da turbulência.

Tem-se apenas um conhecimento impreciso do estado actual da atmosfera, visto que as observações não são rigorosas. O conhecimento é ainda incompleto, porque a informação só é fornecida em pontos isolados do *discretum* da rede e a atmosfera é um *continuum*.

A limitação da informação sobre o estado inicial da atmosfera permitiria definir uma distribuição de estados possíveis, compatíveis com a informação do sistema, constituindo uma colectividade estatística. O sistema passaria a ser descrito por uma evolução de probabilidade, uma posição semelhante à da Mecânica Estatística. Mas neste caso, não é a natureza estocástica que limita a predictabilidade da atmosfera, mas sim a instabilidade do sistema.

Ora, dentro destes limites existem realmente numerosíssimos estados diferentes da atmosfera e não é possível identificar, com exactidão, qual é o «verdadeiro» que se observa. Há uma incerteza que não é possível dirimir, em tudo análoga ao que se passa na Mecânica Estatística, quando se quer identificar o microestado instantâneo que realiza o macroestado observado. Como a atmosfera é muito sensível às condições iniciais, isto é, estados muito próximos (dentro do limite do erro das observações) podem, eventualmente, produzir soluções muito afastadas e como não podemos assegurar, da multiplicidade dos estados aproximadamente iguais, qual é o verdadeiro estado da atmosfera, falta-nos o fundamento para dizer qual de entre os vários estados futuros possíveis, tão largamente diferentes, é o que ocorre num determinado instante futuro, suficientemente afastado. Por outras palavras, a previsão correcta a longo prazo das condições meteorológicas torna-se impossível.

O conhecimento inevitavelmente incompleto, que temos das condições iniciais da atmosfera, não nos permite formular previsões, fora dum horizonte temporal limitado, condicionado pela sua instabilidade, que é o factor essencial que determina a predictabilidade.

Os limites da predictabilidade de vários fenómenos atmosféricos têm, como se calcula, uma grande importância para a previsão do tempo. Verificou-se muitas vezes que duas previsões numéricas, usando o mesmo modelo, mas com condições iniciais ligeiramente diferentes, começavam a divergir, e ao fim de algum tempo ficavam sem qualquer correlação. À medida que o intervalo de previsão aumenta, as diferenças entre as soluções são ampliadas pelos mecanismos da instabilidade.

Os limites da predictabilidade e a sua melhor especificação passaram a ser um dos grandes desafios que se têm posto nos últimos tempos aos meteorologistas, assim como o de saber se se pode determinar a predictabilidade inerente a um caso específico. Ora, em princípio, tal é possível, porque as condições iniciais podem ser perturbadas e as várias simulações matemáticas revelarão a taxa de divergência das soluções.

Poderiam aplicar-se técnicas relativamente sofisticadas no espaço de fases dos modelos espectrais para determinar essas taxas de divergência (expoentes de Lyapunov), mas seriam ainda impraticáveis por causa da dimensão do espaço de fases de qualquer modelo útil na prática. A predictabilidade começa a ser encarada como mais uma grandeza dinâmica a prever, em vez de ser tratada como uma grandeza que se deve calcular,

estatisticamente *a posteriori*. A dimensão do espaço de fases é dada pelo número de graus de liberdade do sistema. Estamos assim a colocar-nos agora a um nível diferente, que é o de prever a própria predictabilidade de um sistema, o que, na verdade, constitui um desafio insólito e inesperado.

A situação é, no entanto, provavelmente mais simples do que se supunha inicialmente. É que, independentemente das condições iniciais, as trajectórias no espaço de fases de um sistema caótico dissipativo, são atraídas e eventualmente confinadas a conjuntos finitos, por vezes bem delimitados, que são os atractores do sistema. No caso da atmosfera os pontos do atrator representam os estados que são compatíveis com o clima. Assim, as características estatísticas globais duma solução podem ser previstas qualitativamente, ainda que não se possa especificar o estado do sistema num certo e dado instante.

O reconhecimento de que a atmosfera constitui um sistema caótico, vem abrir novas perspectivas para as Ciências da Atmosfera. Em primeiro lugar, temos de encontrar directamente formas de descobrir, a partir das equações que regem a fenomenologia, sem ter de proceder a simulações se o sistema é caótico. Depois, temos de encontrar a estrutura matemática do atrator para o sistema caótico e as implicações estatísticas, que tem para os movimentos físicos reais, por via analítica. Por fim, devemos procurar escrever e calcular as trajectórias em coordenadas intrínsecas dentro dos atractores. Como se vê, do ponto de vista matemático, estamos a passar de um problema específico para um problema mais geral. O mesmo se passa na dinâmica dos fluidos não lineares: em vez de calcular apenas uma solução, ou realizar uma previsão, pretendemos determinar as propriedades duma família de soluções e avaliar as variações das características da família em resposta às variações das condições exteriores.

Se juntarmos a estes progressos as potencialidades e as capacidades da detecção remota a partir do espaço e da terra, as possibilidades dos computadores nos cálculos, na simulação e na visualização, e o melhor tratamento de dados poder-se-á vir a produzir uma verdadeira revolução nas Ciências da Atmosfera no século XXI.

O desenvolvimento de novos métodos matemáticos, para compreender melhor o comportamento dos sistemas caóticos constitui, de facto, um grande avanço conceptual para o melhor conhecimento da evolução dos sistemas não lineares e, em particular, da atmosfera.

6. Epílogo

Temos vindo a observar a atmosfera através duma «janela finita», relativamente estreita, que foi «aberta» pela Física Clássica. Agora, alargamos o horizonte e tanto as concepções determinísticas de Laplace, como as do Deus de Einstein que se «recusa a jogar aos dados o futuro do homem», passam a pertencer ao do passado.

Mas sejamos prudentes e justos. Não vamos julgar que a atitude determinista resultou de um vício de raciocínio, ou, de um defeito de pensamento humano. Enquadrava-se, de facto, numa perspectiva universal do diálogo do homem com a Natureza. Só que este diálogo não pode assentar em conceitos *a priori*, em que a razão do homem dita as regras que gostaríamos de impor à Natureza. Tem que se basear em construções teóricas e em respostas experimentais dadas pela Natureza. E é aqui que os ensinamentos da Meteorologia e da Climatologia se têm revelado cruciais para a compreensão da problemática do ambiente.

Sabemos que tanto o clima como o ambiente, sofreram grandes modificações em épocas geológicas passadas, quer numa escala espacial local, quer numa escala global. E nada nos leva a concluir que esta evolução não continue a verificar-se, ou que vá terminar. A compreensão, nem sempre fácil, dos mecanismos de base envolvidos nestas transformações e a dificuldade em prever e avaliar a tendência futura, tem constituído uma das grandes preocupações de várias gerações de cientistas em todos os domínios das Ciências Naturais, tomadas em sentido lato.

Em síntese, o ambiente global é, de facto, um sistema não linear, em que todos os estados são transientes e de não equilíbrio. Os seus componentes são sistemas caóticos. Somos assim levados a esperar que os resultados do estudo dos sistemas dinâmicos, designadamente os conceitos de bifurcação, de atractores estranhos, de expoentes de Lyapunov, etc., possam vir a ter aplicação no estudo do clima e nas suas relações com a qualidade futura do ambiente.

Parece que estamos a entrar numa nova era. É uma situação semelhante à que se passou durante o desenvolvimento da Mecânica Quântica. Começou por haver uma certa fermentação intelectual, até que a nova mecânica, depois de atingir a maturidade, se consolidou. Começaram depois a aparecer as aplicações.

Até agora a maior parte da investigação do caos tem sido descritiva. Um dos problemas fundamentais é o de distinguir o caos determinístico, do comportamento completamente aleatório e turbulento. O caos apresenta

uma certa ordem, com configurações, que não sendo periódicas, também não são completamente aleatórias: têm sempre um *atractor fractal*, por isso, estranho.

Levou mais de quinze anos antes que este tipo de configuração fenomenológica — os fractais — merecessem a atenção da comunidade científica e fossem reconhecidos como nova entidade geométrica. E levou ainda mais tempo para que a investigação sobre o caos ganhasse respeitabilidade científica. Na verdade, foi a consideração do comportamento caótico de alguns sistemas, que levou à revolução, a que hoje se assiste na ciência da dinâmica dos sistemas não lineares, e em especial das Ciências da Atmosfera.

Tudo indica que as observações e os modelos do clima parecem mostrar que os aspectos essenciais do comportamento do ambiente só se podem compreender em termos da nova linguagem qualitativa dos sistemas dinâmicos. Não serão de excluir as possibilidades da existência de estados estacionários múltiplos, quer, por exemplo, na química da estratosfera, quer no regime das circulações planetárias o que levaria à alternância de regimes climáticos, glaciários e interglaciários.

A concepção clássica da Ciência era muito atraente, porque parecia prometer um poder absoluto e, ao mesmo tempo, um isolamento ideal do homem perante a Natureza.

Ora este distanciamento tem vindo a estreitar-se, porque nos tempos mais recentes, admitimos que temos que nos inserir na Natureza e que o tempo irreversível não nos opõe ao ambiente, antes nos integra nele. A uma visão determinística do mundo objectivo, que privilegiava as leis simétricas no tempo, está a contrapor-se uma experiência subjectiva, baseada nas dinâmicas dos sistemas, que tem de aceitar a irreversibilidade do tempo e enfrentar, com decisão, a mensagem de solidariedade e de reciprocidade entre o Homem e a Natureza.

E, com encantamento, continuemos a escutar S. Francisco de Assis na sua concepção maravilhosa do ambiente, tão bem expressa no «Cântico do Sol».

«Louvado sejas, meu Senhor, pelo nosso irmão vento e pelo ar e pelas nuvens e pelo céu sereno que nos dá toda a espécie de tempo ...».

«Louvado sejas, meu Senhor, pela nossa irmã água, que é tão útil, tão preciosa e casta».

«Louvado sejas, meu Senhor, pela nossa irmã e Mãe Terra, que dá frutos variados, ervas e flores cloridas ... com os quais às tuas criaturas dás sustento».

Agradecimentos

Queremos agradecer aos Sr. Dr. Mário de Almeida (INMG) e ao Sr. Dr. António Tomé (UBI) a colaboração prestiosa que nos deram para a preparação desta lição.

BIBLIOGRAFIA

- ABARBANEL, H. R., BROWN and BRYANT, P. — Computing Lyapunov Spectrum of a dynamical system from observed time series, *Phys. Rev.*, A 43(6) 2287-2300. (1990)
- DUTTON, J. A. — *The Ceaseless Wind*, Dover 617 pp. (1986)
- ECKMANN, J. P., KAMPHORST, S., CILIBERTO, S. e RUELLE, D. — Lyapunov exponents from time series, *Phys. Rev.*, A, 34, 4971-4979. (1986)
- GHIL, M. — Dynamics, Statistics and Predictability of Planetary Flow Regimes: *In Irreversible Phenomena and Dynamical System Analyses in Geosciences*, editado por Nicolis e Nicolas D. Reidel Publishing Company. (1987)
- GRASSBERGER, P. — Do Climatic Attractors exist. *Nature*, 223, 609-612. (1986)
- LORENZ, E. N. — Deterministic non-periodic flow, *Jour. Atmos. Sci.*, 20, 130-141. (1963)
- LORENZ, E. N. — The Predictability of a Flow which possesses many scales of motion, *Tellus*, 21, 289-307. (1969)
- LORENZ, E. N. — Atmospheric Predictability Experiments with a large numerical model, *Tellus*, 34, 305-313. (1982)
- LORENZ, E. N. — Irregularity: a fundamental property of the atmosphere, *Tellus*, 36A, 98-110. (1984)
- LORENZ, E. N. — Can Chaos and intransitivity lead to interannual variability? *Tell*, 42A, 372-389. (1990)
- NICOLIS, C. e NICOLIS, G. — Is there a climatic attractor?, *Nature*, 311, 529-532. (1984)
- PEIXOTO, J. P. e OORT, A. — *Physics of Climate*, *Ame. Inst. of Phys.*, AIP, N.York. (1992)
- PRIGOGINE, I. e STENGERS, I. — *Order out of Chaos*, Bantam, N. York. (1983)
- SALTZMAN, B. — Climate System Analysis, *Adv. in Geophys.*, 25, 183-304. (1983)
- WOLF, A., SWIFT, B., SWINNEY e VASTANO, A. — Determining Lyapunov Exponents from a time Series, *Physica*, 16D, 285-317. (1985)