



■ CIÊNCIA

FÍSICA

O caos *amigável*

Comportamentos aparentemente desorganizados podem beneficiar seres vivos e reações químicas

FRANCISCO BICUDO

A camada mais superficial dos oceanos abriga uma elevada variedade de organismos microscópicos, continuamente transportados pelas correntes marítimas. Em seu caminho pelos mares, essa rica mistura que compõe o plâncton – algas, bactérias, protozoários, crustáceos e moluscos – depara com obstáculos como ilhas, montanhas submersas ou mesmo barcos. Homogêneas a olho nu, essas extensas manchas de plâncton obrigatoriamente se dividem e contornam a barreira em um abraço envolvente, reencontrando-se em seguida. Mas, superado o obstáculo, a mancha antes compacta sofre distorções e se transforma em uma complexa rede de



Engenho e arte: formas sinuosas resultam de rigor matemático e solucionam antigos desafios da biologia

filamentos muito delgados. É que próximo a essas barreiras existem turbilhões na água que forçam esses organismos a percorrer trajetórias complicadas e aparentemente irregulares, num movimento classificado pelos físicos como caótico, repetido a cada novo obstáculo.

Uma equipe de físicos da Universidade de São Paulo (USP) estudou em detalhe a estrutura dos filamentos que se formam após o obstáculo e constatou que suas formas aparentemente irregulares podem ser descritas com precisão por fórmulas matemáticas da Teoria de Sistemas Dinâmicos – mais conhecida como Teoria do Caos, já aplicada no estudo de fenômenos tão distintos quanto o sobe-e-desce do mercado financeiro, as incertezas da meteorologia e até mesmo o ritmo dos batimentos cardíacos. Ao empregar a Teoria do Caos para prever a dispersão das espécies de plâncton, os físicos da USP encontraram uma possível solução para um dilema que inquieta os biólogos há quase meio século, o chamado Paradoxo de Hutchinson: por que o plâncton é formado por cerca de 8 mil espécies de organismos? Segundo teorias clássicas da biologia, esse número não deveria superar uma dezena por causa da competição por recursos naturais como oxigênio, luz e nutrientes.

Casos como esse mostram que nem sempre o caos é sinônimo de confusão e desordem, portanto, indesejável. “Em situações como a da mancha de plâncton se dispersando no mar”, explica o físico Celso Grebogi, “o caos aparece como algo benéfico, favorecendo a sobrevivência de um número maior

de espécies”. Pesquisador do Instituto de Física da USP, Grebogi é o principal autor de uma teoria que ajuda a entender – e prever – não só a proliferação de espécies de plâncton. Fundamentado na Teoria do Caos, esse modelo pode auxiliar também na explicação de outros fenômenos biológicos e químicos, como a formação do buraco na camada de ozônio que envolve a Terra.

Grebogi e sua equipe na USP desenvolveram essa nova teoria, chamada de Caos Ativo, em parceria com especialistas da Universidade de Eötvös, na Hungria. Nela, os pesquisadores lançaram uma idéia inovadora: em situações específicas o caos pode representar mais que um conjunto de expressões matemáticas capaz de descrever o comportamento de um sistema que se modifica com o tempo – por exemplo, o gotejamento de uma torneira que se fecha aos poucos. No caso de partículas sólidas diluídas em um fluido, sejam plânctons no oceano, sejam moléculas de poluentes no ar, o caos pode desempenhar um papel ativo e funcionar como catalisador, acelerando reações químicas ou interações biológicas, revelaram os pesquisadores no primeiro artigo sobre o assunto, publicado em 1998 na *Physical Review Letters*. O caos atuaria assim de modo análogo às enzimas produzidas pelo estômago ou pelo intestino, que aumentam a velocidade das reações que quebram os alimentos em partículas menores.

Aqui novamente o exemplo dos plânctons, responsáveis pela produção de cerca de metade do oxigênio do planeta, ajuda a compreender essa atividade catalisadora do caos. Há organização por trás dos filamentos sinuosos, formados por esses organismos marinhos após superar o obstáculo. A estrutura



Ao sabor das correntes marinhas: microorganismos do plâncton (*linha preta*) encontram um obstáculo (*em vermelho*), se dispersam em movimentos turbulentos e se reorganizam em filamentos que permitem a coexistência de milhares de espécies

desses filamentos é regida por leis matemáticas muito precisas: cada um deles apresenta uma forma complexa que se repete em escalas menores. Ampliados, esses filamentos se revelam formados por outros mais finos, que, por sua vez, são compostos por outros ainda mais finos – a mesma organização que se observa na pena de uma ave. É o que os físicos chamam de estrutura fractal. Nesse como em outros casos essa estrutura fractal surge em consequência do afastamento rápido e intenso de partículas antes muito próximas, provocado pelo movimento caótico do fluido que as arrasta.

Extinção amenizada - Em sua sala no Instituto de Física, Grebogi ilustra sua teoria com uma seqüência de imagens de computador e explica como tantas espécies distintas de plâncton conseguem conviver, em vez de as mais aptas levarem as outras à extinção. Ao se formarem, os filamentos segregam as diferentes espécies. Naturalmente, espaços vazios – sem plâncton – surgem entre esses filamentos e tornam a competição entre as espécies menos direta: as regiões sem plâncton funcionam como uma área de escape para as espécies menos adaptadas. “Essa forma de organização permite a todas as espécies conseguirem alimento, luz e oxigênio, ainda que algumas predominem sobre outras”, diz Grebogi.

Quando a população de um determinado tipo de plâncton torna-se muito reduzida, a área de escape torna-se

proporcionalmente maior e essa espécie ganha mais espaço para se expandir, explica o físico, neto de poloneses nascido há 57 anos em Curitiba, Paraná. “Assim ela consegue se reproduzir e voltar aos níveis normais”, afirma. “Ao acelerar a reprodução dessas espécies, o caos evita a extinção das menos eficientes e a conservação da diversidade”, diz o físico Alessandro Moura, do Instituto de Física da USP e integrante da equipe de Grebogi nesse projeto.

Os artigos mais recentes do grupo sobre o caos ativo foram publicados em 2004, na edição de março da revista *Chaos* e na de abril da *Physical Review Letters*. Mas a idéia de relacionar plâncton e Teoria do Caos havia surgido muito antes, cerca de dez anos atrás, quando Grebogi e seus colaboradores, conversando com amigos biólogos, descobriram que havia mais dúvidas do que explicações a respeito da existência das cerca de 8 mil espécies de animais e plantas do plâncton, com ciclos de vida que variam de dois minu-

tos a dois dias. Na década de 1960, o inglês George Evelyn Hutchinson tentou compreender o paradoxo que depois receberia seu nome. Especialista em ecossistemas aquáticos, ele pensou, evidentemente, como biólogo, destacando as variações anuais de temperatura e o ciclo verão-inverno como argumentos para justificar a sobrevivência de tantas espécies. Embora válidos, esses argumentos parecem ser insuficientes.

Grebogi começou então a considerar a ação do caos como uma possibilidade de explicação, com base em alguns indícios. O oceano, afinal, é um fluido repleto de partículas carregadas por correntes marítimas, com muitos obstáculos – em vez disso, as teorias biológicas supunham que o plâncton se distribuisse de modo homogêneo pela superfície dos mares, o que não ocorre de fato. O primeiro artigo com os fundamentos dinâmicos que levariam a uma solução para o Paradoxo de Hutchinson saiu em janeiro de 1998 na *Physical Review Letters*, assinado por Grebogi e seus colaboradores. O físico paranaense trabalhava então na Universidade de Maryland, nos Estados Unidos, e já era reconhecido como uma autoridade internacional nessa área. Foi também em 1998 que ele se tornou diretor científico externo vitalício do Instituto Max Planck para a Física de Sistemas Complexos em Dresden, Alemanha, onde passa dois meses por ano. Só três anos depois, em 2001, é que o físico elegante e de hábitos refinados, apaixonado por óperas – Mozart

O PROJETO

Dinâmica caótica

MODALIDADE

Projeto Temático

COORDENADOR

CELSO GREBOGI – IF/USP

INVESTIMENTO

R\$ 682.179,67



CELSO GREBOGI/USP



Curvas da fertilidade: após vencerem a barreira, microorganismos de espécies distintas (vermelho e verde) se misturam em filamentos (detalhe ampliado ao lado). Os espaços livres favorecem a reprodução das espécies menos abundantes



CELSO GREBOGI/USP

ou Verdi para se distrair, Wagner ou Strauss quando deseja algo estimulante –, foi contratado pela USP. Este ano, de acordo com a Academia Brasileira de Ciências, ele se tornou o primeiro brasileiro cujos artigos científicos receberam mais de 10 mil citações, acompanhadas pelo Science Citation Index.

CFC e ozônio - Grebogi separa de uma pasta-arquivo outra figura – uma imagem de satélite –, com a qual demonstra que seu modelo pode também ajudar a compreender o processo de destruição

da camada de ozônio na alta atmosfera terrestre, a cerca de 20 quilômetros da superfície. Gás composto de moléculas formadas pela união de três átomos de oxigênio, o ozônio funciona como um escudo que impede a passagem dos raios ultravioleta do Sol, apontados como um dos principais responsáveis por queimaduras e pelo câncer de pele. Em 1985, pesquisadores da British Antarctic Survey constataram pela primeira vez uma redução de 30% na camada de ozônio sobre a Antártida. Em agosto de 2003, o buraco se esten-

dia por 17,4 milhões de quilômetros quadrados – mais de duas vezes a área ocupada pelo Brasil.

As moléculas de ozônio se desfazem em contato com o cloro de gases conhecidos como clorofluorcarbonetos (CFC), os mesmos usados em alguns refrigeradores para esfriar o ar. Na alta atmosfera, sob a ação dos raios ultravioleta, o CFC se quebra e os átomos de cloro se soltam: cada cloro pode desfazer mais de 100 mil moléculas de ozônio. É nesse momento que a Teoria do Caos surge como aliada para explicar a