



Coordenação de Armindo Rodrigues

## Teoria Ergódica, Caos e a aplicação no estudo dos líquenes da espécie *Cladonia*

Autor:  
João Cabral

A natureza é tendencialmente caótica. Esta é uma frase que certamente desperta logo ódios e paixões aos olhos de quem a lê, pela sua força e abrangência. Para comprovar ou refutar a sua veracidade podemos usar a Matemática. Esta ciência possui ferramentas de análise conhecidas como modelos matemáticos. Os modelos são usados principalmente porque o ser humano tem a percepção de que, seja qual for a razão da existência de toda esta obra, que conhecemos como Natureza, esta deve ter um propósito, logo a sua construção deve assentar em padrões, que embora possam ser, na sua maioria, desconhecidos à intelectualidade humana, eles devem estar presentes.

Na construção de um modelo diferenciaram-se ao longo do tempo vários processos de construção, distinguindo-se no geral os processos que defendem um uso mais próximo da matemática pura e aqueles que permitem a articulação de vários saberes organizados, sob os auspícios do método científico. Assim, consoante o grau de complexidade do pedaço da Natureza a modelar, os modelos matemáticos variam de simples equações, a outras cujo tratamento matemático requer avançados conhecimentos na sua manipulação.

Um dos riscos da modelação é a perda de certas qualida-

des que acontecem no fenómeno a modelar, devido à simplificação dos processos, desviando-se da sua forma original e beleza real. Para contrariar este efeito, a modelação matemática, nos tempos modernos, aproxima-se de estruturas tendencialmente caóticas, que são, de certa forma, próximas do comportamento natural dos eventos, mas assentes em regras que são construídas depois de estudar os padrões existentes. Tradicionalmente, o reconhecimento de um fenómeno caótico natural é feito através da leitura das suas características, tendo estas que ser semelhantes à definição matemática do caos. Na matemática, uma estrutura caótica é aquela que apresenta três condições elementares: Sensibilidade, Transitividade e Densidade. Um sistema sensível, para a Matemática, é quando uma pequena alteração nas condições iniciais, quando este começa a ocorrer, por mais insignificante que seja, provoca uma grande alteração na evolução do mesmo. A transitividade garante a perpetuidade dos eventos, mas cujos efeitos futuros herdaram características que já ocorreram, numa espécie de corrente. A densidade mostra que o evento é indecomponível em partes distintas, sendo visto como um todo quando estes ocorrem em simultâneo. Desta forma, estudar um sistema caótico converte-se numa tarefa hercúlea, sendo impossível distinguir, devido à sua sensibilidade, as suas componentes para que se consiga construir padrões. Para combater esta dificuldade nasceu a Teoria Ergódica, que é uma teoria matemática que estuda o comportamento a longo prazo de um sistema, analisando o comportamento resultante das iterações entre as várias componentes que formam um sistema natural. Uma das formas de compreender os efeitos desta teoria é imaginando um rio, que flui numa determinada direção e cujo estudo do mesmo é efetuado através da análise do desgaste que este provoca nas suas margens, na força do seu caudal, na quantidade de materiais que este transporta ou tem de contornar, etc. O termo “Ergódico” deriva das palavras gregas “ergon” (trabalho) e “odos” (caminho). A Teoria Ergódica estuda as propriedades, de forma probabilística, das relações entre as várias componentes de um sistema, construindo o que se designa na Matemática de Espaço de Eventos para que seja possível identificar componentes que se

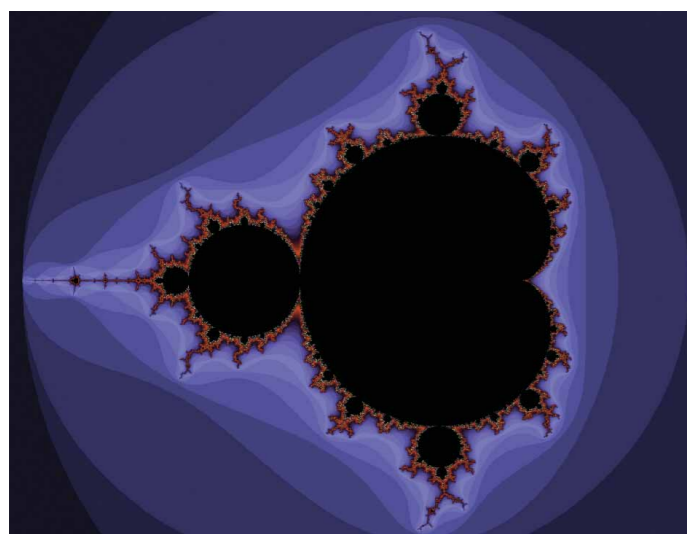


Figura 1: Conjunto de Mandelbrot. Um fractal cuja propriedade de autossimilaridade é facilmente reconhecível.

Coordenação de Armindo Rodrigues

mantêm invariantes ao longo da ocorrência do fenómeno. Esta invariância assume o papel da padronização de eventos que não são caóticos, tornando-se possível a criação de regras que permitem estudar, de uma forma organizada, o caos.

A Teoria Ergódica tem aplicações em vários ramos da ciência, variando desde o entendimento do comportamento de figuras matemáticas complexas, como os fractais, representado na figura 1, para puro divertimento humano, até à aplicação prática do entendimento de como uma espécie se desenvolve num determinado habitat. Enquanto num fractal os invariantes provocam o efeito óbvio, a nível visual, de autossimilaridade, em que cada uma das pequenas partes que constituem o todo são semelhantes ao todo em si, nas estruturas naturais este efeito não é assim tão óbvio quando ocorre. Por exemplo, podemos observar na imagem 2, que mostra o desenvolvimento de um líquen da espécie *Cladonia Browne*, proliferações verticiladas que se formam a partir do centro, do “scyphus”, dando origem a outras camadas de proliferações centrais, provocando o efeito de autossimilaridade, como de um fractal se tratasse. Na prática, para um Biólogo será importante reconhecer este crescimento como sendo “o natural” desta espécie. Este forma um padrão que será visto como referência em futuros estudos desta espécie, mesmo que este crescimento seja controlado por processos que, no seu todo, tendem para o caos, existindo uma entropia natural que a natureza disfarça de uma forma tão elegante, de modo que para os cientistas que estudam o sistema existe um equilíbrio dinâmico de iterações, governado por um conjunto de regras que a ciência designa por homeostasia.

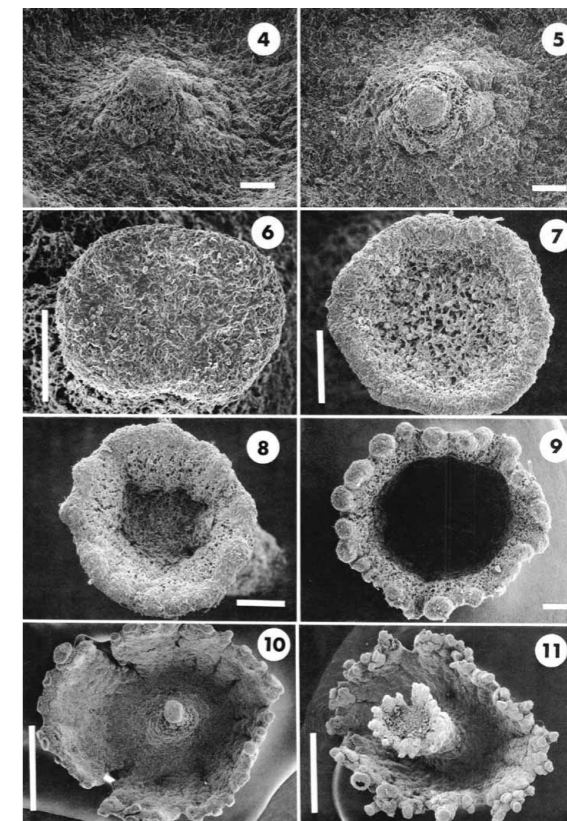


Figura 2: Crescimento modular do líquen da espécie *Cladonia Browne*. Imagem reproduzida com autorização do autor, que pode ser vista em Samuel Hammer (1996) Modular growth in verticillate podetia of *Cladonia*, *Mycologia*, 88:4, 533-538, DOI: 10.1080/00275514.1996.12026683.



## Investigação científica sobre fenómenos de simetria

João Cabral é membro do “Reviewer Board” do jornal internacional *Symmetry* (ISSN 2073-8994; CODEN: SYMMAM), de acesso aberto, revista por pares, que cobre pesquisas sobre

fenómenos de simetria onde quer que ocorram, seja em estudos matemáticos ou noutras áreas da ciência. <https://www.mdpi.com/journal/symmetry>.