

**D**ando seqüência à série de divulgação científica do CBPF sobre temas atuais de pesquisa, apresentamos agora os sistemas complexos, área interdisciplinar que ganha cada vez mais importância na busca incessante da ciência para estender os limites de nosso conhecimento e das leis que regem os fenômenos da natureza.

No CBPF, o estudo de sistemas complexos é uma das áreas de pesquisa mais importantes, tendo vários grupos de excelência dedicados ao assunto. Foi em nossa instituição que nasceu uma generalização da mecânica estatística que hoje é estudada em dezenas de países e aplicada com sucesso a sistemas complexos nos quais a tradicional estatística de Boltzmann-Gibbs perde sua aplicabilidade natural – como é o caso de sistemas em que há o fenômeno da turbulência.

Esta série destina-se ao público não especializado, que aqui encontrará uma iniciação e uma descrição das principais características dos sistemas complexos e também referências para leituras mais aprofundadas sobre essa fascinante área.

*João dos Anjos*

COORDENADOR DO PROJETO DESAFIOS DA FÍSICA

**REFERÊNCIAS:** [1] C. TSALLIS. Possible Generalization of Boltzmann-Gibbs Statistics. *J. Stat. Phys.*, 52, 479 (1998); [2] E. M. F. CURADO e C. TSALLIS. Generalized statistical mechanics: connections with thermodynamics. *J. Phys. A*, 24, L69 (1991) - corrigenda: 24, 3187 (1991) e 25, 1019 (1992); [3] C. TSALLIS. Nonextensive statistical mechanics: construction and physical interpretation. In: *Nonextensive Entropy – Interdisciplinary Applications* M. GELL-MANN e C. TSALLIS (eds.) (Oxford University Press, Oxford, 2003); [4] H. P. OLIVEIRA, I. DAMIÃO SOARES e E. V. TONINI. Universality in the chaotic dynamics associated with saddle-center critical points. *Physica A*, 295, 348-358 (2001); [5] M. S. REIS, V.S. AMARAL, J. P. ARAÚJO e I. S. OLIVEIRA. Magnetic phase diagram for a nonextensive system: Experimental connection with manganites. *Phys. Rev. B*, 68 (1) 014404 (2003); [6] I. BEDIAGA, E. M. F. CURADO e J. M. de MIRANDA. A nonextensive thermodynamical equilibrium approach in  $e^-e^+ \rightarrow hadrons$ . *Physica A*, 286, 156-163 (2000); [7] M. P. ALBUQUERQUE, M. P. ALBUQUERQUE, e I. A. ESQUEF. Nonextensive image thresholding. In: *XV Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing*, 2002, Proceedings of SIBGRAP 2002. IEEE Computer Society Press, 2002; [8] M. P. ALBUQUERQUE, A. R. GESAUDI, M. P. ALBUQUERQUE, B. B. LEITE e I. A. ESQUEF. Localization of Brazilian vehicle plates in images using statistical analysis In: *XVI Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing*, 2003, IEEE Computer Society Press, 2003; [9] A. A. G. GOMES e M. C. VARRIALE. Modelagem de Ecossistemas: uma introdução (ABC-Editora da UFSM, Rio de Janeiro-Santa Maria, 2001); [10] C. ANTENEODO, R. N. P. MAIA e R. O. VALLEJOS. Lyapunov exponent of many-particles systems: testing the stochastic approach. *Phys. Rev. E*, 68, 036120 (2003).

PRESIDENTE DA REPÚBLICA  
Luiz Inácio Lula da Silva

MINISTRO DE ESTADO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
Sergio Machado Rezende

SUBSECRETÁRIO DE COORDENAÇÃO DE UNIDADES DE PESQUISA  
Avílio Antônio Franco

DIRETOR DO CBPF  
Ricardo Magnus Osório Galvão

CONSULTOR CIENTÍFICO  
Constantino Tsallis

REDAÇÃO E EDIÇÃO  
Cássio Leite Vieira

PROJETO GRÁFICO  
Ampersand Comunicação Gráfica  
(www.amperdesign.com.br)

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS  
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150  
22290-180 – Rio de Janeiro – RJ  
Tel: (0xx21) 2141-7100  
Fax: (0xx21) 2141-7400  
Internet: <http://www.cbpf.br>

\* Para receber gratuitamente pelo correio um exemplar deste folder, envie pedido com seu nome e endereço para [iva@cbpf.br](mailto:iva@cbpf.br). Este e outros folders, bem como a revista *CBPF – Na Vanguarda da Pesquisa*, estão disponíveis para download (em formato .PDF) em <http://www.cbpf.br/Publicacoes/>

Agradecimentos aos seguintes entrevistados (em ordem alfabética): Afonso Augusto Guidão Gomes (CBPF), Alfredo Ozorio de Almeida (CBPF), Andrés Papa (IRD), Antonio Augusto Passos Videira (UERJ), Caio Lewenkopf (UERJ), Constantino Tsallis (CBPF), Evaldo Mendonça Fleury Curado (CBPF), Ignácio Alfonso de Bediaga e Hickman (CBPF), Ildeu de Castro Moreira (UFRJ), Ivan dos Santos Oliveira Jr. (CBPF), Ivano Damiano Soares (CBPF), Marcelo Portes de Albuquerque (CBPF), Márcio Portes de Albuquerque (CBPF), Mário Reis (CBPF), Nilton Alves Jr. (CBPF), Raúl Oscar Vallejos (CBPF).

Vitae não compartilha necessariamente dos conceitos e opiniões expressos neste trabalho, que são da exclusiva responsabilidade dos autores.



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



# Sistemas Complexos

A fronteira entre a  
ordem e o caos



Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

2005

## Fontes

A. CHO. 'A fresh take on disorder, or disorderly science?'. In: *Science* (New Focus, 23 Aug. 02, p. 1268). Ver também: S. ABE e A. K. RAJAGOPAL; A. PLASTINO; V. LATORA, A. RAPISARDA e A. ROBLEDO. 'Revisiting Disorder and Tsallis Statistics'. In: *Science* (Letters, 11 Apr. 03, pp. 249-251)  
R. GRAHAM. 'Constatino Tsallis – Describing a New Entropy'. In: Santa Fe Institute Bulletin, vol. 15, n. 2 (2002)  
H. M. NUSSENZEIG (org.). *Complexidade & Caos* (Editora UFRJ/Copea, Rio de Janeiro, 1999)  
I. de C. MOREIRA. 'Primórdios do Caos Determinístico'. In: *Ciência Hoje* (especial Caos), vol. 14, n. 80, pp. 11-16 (1992)  
I. PRIGOGINE. *El Nacimiento del Tiempo* (Tusquets Editores, Barcelona, 1993)

J. A. M. PESSANHA. 'Perpetuamente rebelde'. In: *Ciência Hoje* (especial Caos), vol. 14, n. 80, pp. 58-60 (1992)  
M. BARANGER. 'Chaos, Complexity, and Entropy – A physics talk for non-physicists' (disponível em PDF em [www.necsi.org](http://www.necsi.org))  
M. GELL-MANN. *The Quark and the Jaguar* (W. H. Freeman, Nova York, 1994)  
Y. BAR-YAM. *Dynamics of Complex Systems*. (New England Complex Systems Institute) (disponível em PDF em [www.necsi.org](http://www.necsi.org))  
M. GELL-MANN e C. TSALLIS (eds.). *Nonextensive Entropy – Interdisciplinary Applications* (Oxford University Press, Oxford, 2003)

## Sumário

### UMA FRONTEIRA SUTIL

Entre a ordem e o caos

### NO PRINCÍPIO... A ORDEM

De pedras a cometas

### E FEZ-SE... O CAOS

Três corpos

O que é caos?

### E O MUNDO FICOU... COMPLEXO

O que é complexidade?

Complicado é complexo?

Selvagem e civilizado

### DO SABER INCOMPLETO

Das partes ao todo

Relação com os vizinhos

Não extensivos

Nova mecânica estatística

O grau de organização

### NO CBPF

Cavalos cegos e aeroportos

Estrela prisioneira

Manganitas

Altas energias

Mamografias e placas

Modelando o complexo

Sistemas Complexos  
A fronteira entre a ordem e o caos

## UMA FRONTEIRA SUTIL

Da Antiguidade até o final do século 19, o homem enxergou uma natureza regulada pela ordem, da Terra à esfera celeste. Há cerca de 100 anos, porém, espantou-se com a imprevisibilidade dos fenômenos caóticos. Supôs serem exceções num universo quase perfeito. Enganou-se. Eram a regra. E, aos poucos, a imagem de um universo exclusivamente determinístico se desvaneceu.

**ENTRE A ORDEM E O CAOS.** Da persistente monotonia da órbita de um planeta à pura erraticidade de bilhões e bilhões de partículas enfurecidas de um gás, praticamente todos os sistemas – caóticos ou não – aparentavam estar essencialmente sob controle – o homem aprendeu até a domar estruturas caóticas, utilizando vestígios de ordem que sobrevivem dentro delas. E, então, se apontou para uma fronteira sutil, até então uma penumbra entre a ordem e o caos. Lá estavam – posando como um novo desafio – os sistemas complexos. Para entendê-los – ainda que minimamente –, é preciso visitar os dois extremos dessa fronteira: a ordem e o caos.

## NO PRINCÍPIO... A ORDEM

Depois de vencer criaturas gigantes, Zeus – o deus supremo do Olimpo – instaurou seu reinado de ordem.

E, assim, se fez um cosmo subjugado por leis, belo e harmônico, regular e racional. No mundo dos homens – que atende por realidade –, acreditava-se que a natureza não era diferente: ela foi lida, ao longo dos 20 séculos da Era Cristã, como um livro escrito por Deus. E, portanto, obra perfeita.

**DE PEDRAS A COMETAS.** A crença no determinismo era representada pelas idéias do físico inglês Isaac Newton (1642-1727). Sua mecânica explicava da trajetória de uma pedra atirada para cima ao movimento de planetas e cometas. Pêndulos, cronômetros, máquinas a vapor: o homem reproduzia em suas criações o determinismo estrito. Para o matemático e astrônomo francês Simon de Laplace (1749-1827), o universo de hoje era o efeito daquele de ontem e a causa do que virá.

## E FEZ-SE... O CAOS

Por quase três séculos, a hegemonia da mecânica newtoniana manteve-se suprema, inabalável. Não havia problemas sem solução, apenas aqueles que ainda não haviam sido resolvidos. Porém, o final do século 19 traria surpresas.

**TRÊS CORPOS.** Para comemorar os 60 anos do rei Oscar II (1829-1907), da Suécia e Dinamarca, foi oferecido um prêmio cujo tema era a estabilidade do sistema solar. O matemático francês Henri Poincaré (1854-1912) encarou o desafio. Porém, ao perceber a dificuldade do problema, reduziu-o a apenas três corpos interagindo pela gravidade. Com esse trabalho, Poincaré não só ganhou o prêmio, em 1889, mas descobriu o caos. E este, arrastando consigo a imprevisibilidade, maculou uma natureza até então ‘bem-comportada’.

**O QUE É CAOS?** Para um sistema ter comportamento imprevisível – ou caótico –, ele deve obedecer a pelo menos três regras: a) ser dinâmico, ou seja, se alterar à medida que o tempo passa – um carro se movendo numa estrada; b) ser não linear, isto é, sua resposta não é proporcional à perturbação – uma simples declaração pode causar uma revolução de estado; c) ser muito sensível a perturbações mínimas de seu estado, ou seja, uma alteração desprezível no presente pode causar, no longo prazo, uma mudança imprevisível – uma leve variação na trajetória de uma sonda espacial pode levá-la para longe de seu destino.

## E O MUNDO FICOU... COMPLEXO

Até duas décadas atrás, cada campo do conhecimento, isoladamente, dava um tratamento específico a seus sistemas complexos. Isso valia da física à antropologia, da economia à biologia. Mas, de lá para cá, percebeu-se que todos os sistemas complexos tinham propriedades universais. Nasceu, assim, uma nova disciplina científica e, talvez, a mais interdisciplinar delas: os sistemas complexos, teoria que usa conceitos de áreas tão diversas quanto caos, termodinâmica (estudo do calor), autômatos celulares (estudo da vida artificial) e redes neurais (estudo das ligações entre as células nervosas cerebrais). Sua principal ferramenta será o computador.

**O QUE É COMPLEXIDADE?** Ainda não há resposta definitiva para essa pergunta. Pode-se dizer que um sistema é tão mais complexo quanto maior for a quantidade de informação necessária para descrevê-lo. Porém, essa é uma entre muitas definições. No entanto, sabe-se que a complexidade só emerge em sistemas com muitos constituintes. Por exemplo, no cérebro humano, com 100 bilhões de células nervosas. Porém, um gás, com bilhões de constituintes, é um sistema simples. Por quê? Basta estudar uma pequena parte dele para entender o todo, o que é impossível em sistemas complexos. **COMPLICADO É COMPLEXO?** Não. Uma máquina sofisticada, com grande número de partes, é complicada, mas não complexa, pois terá comporta-

mentos previsíveis. De um avião, por exemplo, não vai emergir – ironicamente – nada semelhante ao sofisticado movimento que faz uma ave alçar vôo. Importante: a reunião de elementos complexos pode gerar um comportamento simples e previsível. Por exemplo, a Terra girando em torno do Sol.

**SELVAGEM E CIVILIZADO.** Sistemas caóticos e complexos têm um aspecto em comum: são não lineares. Mas, no caótico, a imprevisibilidade é ‘selvagem’; no complexo, ‘civilizada’. Além disso, as propriedades abaixo podem estar presentes em sistemas complexos tão diversos quanto um ser vivo, um ecossistema ou a economia de um país: partes que se relacionam entre si; interação com o meio; adaptação ao meio; tratamento da informação em vários níveis; ordem emergente (criação espontânea de ordem a partir de estados desordenados); propriedades coletivas emergentes (no-

vos comportamentos causados pela interação entre as partes); • criticidade auto-organizada (estado crítico, na fronteira entre a ordem e o caos, em que a mais leve perturbação pode causar uma reação em cadeia; por exemplo, um simples floco de neve desencadeando uma avalanche) • estrutura fractal (formatos que não se tornam mais simples quando observados em escalas cada vez menores).



## NO CBPF

Em 1991, outro trabalho [2] ampliou as idéias da ME não extensiva e se tornou o artigo da física brasileira mais citado mundialmente na década de 1990. Hoje, são cerca de 700 pesquisadores, em 45 países, trabalhando com a ME não extensiva. Mais de mil artigos já foram publicados, e ocorreram vários encontros sobre o tema no Brasil e exterior. A seguir, são relatados trabalhos feitos no CBPF que empregaram a estatística de Tsallis [3 a 8] ou usaram modelos teóricos para estudar o comportamento de sistemas complexos [9 e 10].

**CAVALOS CEGOS E AEROPORTOS.** A ME não extensiva carrega em seu bojo o fator ‘q’ (índice de não extensividade), que guarda muito da essência dessa nova estatística. Mas o que ele significa? É a isso que seu criador se dedica no momento [3]. E ele já tem uma idéia, que pode ser retratada em analogias. Imagine uma criança que foi fadada a um destino cruel: passar a vida montada em um cavalo cego a vagar pelo Brasil. Depois de décadas e décadas nessa árdua empreitada, ela, já adulta, terá praticamente passado o mesmo número de vezes por cada cidade do território brasileiro – sistemas com esse comportamento, gases, por exemplo, são ditos altamente caóticos. Agora, outro cenário: essa criança vai viajar o resto da vida por uma grande companhia aérea. É muito provável que ela passe muitas vezes pelo aeroporto de São Paulo e poucas pelo de Rio Branco, no Acre – um sistema fracamente caótico. Guardadas as limitações dessas analogias, suspeita-se que o índice de não extensividade (q) tenha a ver com um comportamento semelhante de sistemas complexos que preferem certos estados a outros.

**ESTRELA PRISIONEIRA.** Em cosmologia e gravitação, a ME não extensiva já se mostrou uma ferramenta útil para entender comportamentos de corpos celestes e do próprio universo. Um exemplo: imagine uma estrela ‘aprisionada’ numa galáxia. Em meio a outros bilhões de estrelas, ela se desloca ao sabor apenas da atração gravitacional – no caso, uma interação de longo alcance –, sendo ora atraída por uma companheira, ora atraída por outra... E, assim, a estrela prisioneira começa sua longa e caótica jornada, passando por vários locais da galáxia. Essa estrela – como qualquer outra que passar nas proximidades de uma certa região de instabilidade desse sistema – tem sua órbita associada a uma distribuição de energia, ou seja, nas vizinhanças dessa região, são possíveis diversos valores de energia para a estrela. E quanto maior for a energia associada à sua órbita, maior será sua probabilidade de vencer a atração gravitacional exercida por suas companheiras e escapar da galáxia. Agora, o fato inusitado: estudo [4] mostrou que a distribuição da energia nas proximidades dessa região de instabilidade obedece a uma estatística semelhante à de Tsallis.

**MANGANITAS.** Os primeiros modelos para entender as propriedades magnéticas das manganitas (material formado por átomos de oxigênio, manganês e terras raras) datam ainda da década de 1950. No entanto, eles se caracterizam por serem muito complicados. Entende-se, pois as manganitas têm as características de um sistema complexo. Só para citar duas delas: a) muitos elementos constituintes e b) interação de longo alcance entre eles. Agora, trabalho [5] mostrou que a ME não extensiva pode levar a um modelo simples e que explica com fidelidade comportamentos das manganitas quando amostras dessa substância, inicialmente a baixíssimas temperaturas, são submetidas a campos magnéticos externos até atingirem a temperatura ambiente. Empregando a ME não extensiva como modelo teórico, foi possível descrever como a magnetização da amostra – ou seja, com que grau ela se magnetiza – varia com a temperatura. Algumas manganitas apresentam um dos fenômenos mais curiosos da natureza: a magnetorresistência colossal, na qual a resistência elétrica aumenta imensamente quando a amostra está na presença de um campo magnético. Isso faz delas excelentes candidatas a sensores.

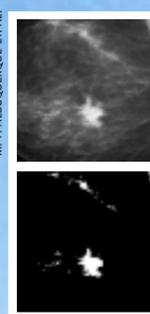
**ALTAS ENERGIAS.** Através do choque de partículas, o homem descobriu centenas de constituintes da matéria. Entender essas colisões, portanto, representa compreender um aspecto crucial do universo e sua origem. Um dos processos mais intrigantes ocorre entre o elétron e sua antimatéria, o pósitron. Quando esse par se choça – a velocidades próximas à da luz (300 mil km por segundo) –, a totalidade da energia de ambos se transforma em partículas de luz. E estas, por sua vez, podem gerar dezenas de estilhaços de matéria e antimatéria – mais especificamente, quarks e antiquarks. No estudo dessas colisões, uma propriedade que se esperava era a temperatura final ser a mesma independentemente da energia inicial do sistema elétron-pósitron. Para choques muito energéticos, sabe-se que a ME de Boltzmann-Gibbs falha na descrição dos dados experimentais, tanto em relação à esperada constância da temperatura quanto na própria disposição dos dados. A aplicação da ME não extensiva a esse sistema [6] – que é complexo por natureza – apresentou boa concordância com os dados experimentais. Mais importante: a estatística de Tsallis reafirmou que a temperatura associada às colisões deve ser independente da energia nelas envolvida, o que está em perfeito acordo com a teoria.

**MAMOGRAFIAS E PLACAS.** Um campo inusitado em que a ME não extensiva tem apresentado bons resultados é o de processamento de imagens. O ponto de partida para essa aplicação é o fato de os elementos constituintes de uma imagem, os pixels – do inglês, *picture elements* –, estarem correlacionados uns aos outros – afinal, retirar pixels de uma imagem pode comprometer o entendimento do todo. Muitas vezes, porém, o importante é ficar com a informação útil de uma imagem e desprezar a parte que não interessa. Esse conceito aplicado a chapas de mamografia [7] (um tipo de radiografia das mamas) mostrou que, com a aplicação da ME não extensiva, foi possível extrair dessas imagens a informação relevante para a análise médica – no caso, as áreas que representam os tumores. Outra aplicação da estatística de Tsallis levou à implantação de um protótipo para o reconhecimento au-

tômico de imagens de placas de veículos, sendo os caracteres localizados e classificados por meio de técnicas de processamento digital de imagens e redes neurais artificiais [8]. Os resultados mostram uma eficiência da ordem de 85% no reconhecimento de todos os caracteres e podem ter aplicações na área de segurança.

**MODELANDO O COMPLEXO.** Modelar sistemas complexos não é tarefa das mais fáceis. E o grau de complexidade se eleva bastante quando se trata da modelagem de ecossistemas – como mostra um livro pioneiro nessa área [9] –, pois é preciso considerar interações entre seres vivos (animais, plantas, microrganismos etc.) e meio ambiente (chuvas, solos, nutrientes etc.). Nos sistemas complexos, muitos comportamentos são manifestações globais e não podem ser estudados ou entendidos através do reducionismo. Assim, é preciso olhar para os constituintes no contexto do todo. Um modelo teórico para isso é o chamado hamiltoniano de campo médio (HCM), que permite estudar sistemas cujas partes interagem globalmente. No CBPF, o HCM tem sido aplicado para entender o comportamento temporal de sistemas complexos com muitos constituintes [10]. Um sistema que pode ser entendido, de modo simplificado, através do HCM é a evolução de uma galáxia ou o comportamento de um plasma, um tipo de quarto estado da matéria, semelhante a um gás de partículas carregadas eletricamente.

M. P. ABRIGUERE ET. AL.



## DO SABER INCOMPLETO

Na segunda metade do século 19, o físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) e o austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) juntaram a mecânica newtoniana à estatística para estudar gases. Pouco depois, o norte-americano Josiah Willard Gibbs (1839-1903) deu a essas idéias formulação mais abrangente. Nascia, assim, a mecânica estatística (ME).

**DAS PARTES AO TODO.** A ME de Boltzmann-Gibbs – como ficou conhecida – aplica-se a sistemas nos quais é impossível saber com precisão como cada um dos constituintes vai se comportar – nos gases, os átomos; no cérebro, os neurônios; nas galáxias, as estrelas etc. Por esse predicado, tornou-se uma ferramenta adequada ao estudo dos sistemas complexos.

**RELAÇÃO COM OS VIZINHOS.** No entanto, a ME de Boltzmann-Gibbs tem suas limitações. É basicamente aplicada a sistemas que não trocam mais calor com o meio – estão, portanto, em equilíbrio térmico – e cujos constituintes se relacionam apenas com seus vizinhos (interação de curto alcance). São os sistemas extensivos.

**NÃO EXTENSIVOS.** Mas há vários sistemas com correlação de longo alcance (espacial ou temporal). Nesses, o comportamento de uma parte depende de outra distante no espaço e no tempo. Exemplo: um ciclone, no qual volumes de ar, mesmo distantes, precisam estar correlacionados – caso contrário, não atingiriam o grau de organização suficiente para gerar aquele cone de ar que rodopia no espaço. Esses são sistemas não extensivos.

**NOVA MECÂNICA ESTATÍSTICA.** Em 1988, uma nova ME foi idealizada pelo físico Constantino Tsallis, do CBPF [1]. Ela vem sendo usada com sucesso para explicar o comportamento de sistemas complexos não extensivos, como materiais magnéticos e vítreos, galáxias, choque de partículas, processamento de imagens, grandes moléculas como o DNA, bolsa de valores e até aspectos da lingüística. Denominada mecânica estatística não extensiva – ou, por vezes, estatística de Tsallis –, ela generaliza a ME de Boltzmann-Gibbs, abrangendo assim fenômenos não extensivos e fora do equilíbrio.

**O GRAU DE ORGANIZAÇÃO.** Na ME, um conceito fundamental é o de entropia, comumente designado pela letra S. A partir dele, é possível caracterizar o nível de organização de um sistema e, com isso, deduzir propriedades importantes como pressão, volume e temperatura em um gás, ou analisar a frequência de disparo de impulsos elétricos entre as células nervosas do cérebro de um mamífero. No entanto, a entropia utilizada na ME de Boltzmann-Gibbs ( $S_{BG} = k \ln W$ , onde k é uma constante e W o número de microestados do sistema) se aplica basicamente a sistemas em equilíbrio térmico. Já a chamada entropia de Tsallis ( $S_q = k W^{1-q} - 1/1 - q$ , onde q é o índice de não extensividade) vale para situações de metaequilíbrio. Ou seja, nas quais os sistemas estão rumando ao equilíbrio, tal como um ser vivo envelhecendo, sendo a morte a situação de equilíbrio com o meio.

