

# Uma abordagem **termo**

*O processo evolutivo caracteriza-se pelo surgimento de organismos cada vez mais complexos, devido ao aumento constante da variedade de estruturas e reações químicas necessárias para que se mantenham vivos. Isso requer um aumento do nível interno de organização (ou simplesmente ordem), o que supostamente violaria o segundo princípio da termodinâmica, segundo o qual em qualquer sistema a desordem tende a aumentar com o tempo. Mas essa aparente contradição pode ser solucionada.*

**Mario da Silva Garrote Filho**

*Departamento de Genética e Bioquímica, Universidade Federal de Uberlândia*

**Nilson Penha-Silva**

*Instituto de Genética e Bioquímica, Universidade Federal de Uberlândia (MG)*

**O estudo da vida será mais completo** se integrarmos física e biologia.

Um notório esforço de reunir essas duas áreas do conhecimento foi realizado pelo físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961), com a publicação do livro *O que é vida?*, em 1944. Ali, Schrödinger analisa os processos biológicos do ponto de vista físico. Para ele, os seres vivos (entendidos como estruturas organizadas) são formados e mantidos através da incorporação de elementos distribuídos de modo desorganizado no ambiente. Portanto, a vida é um processo em que há ordem a partir da desordem.

Entretanto, isso parece contrariar o segundo princípio da termodinâmica, ciência que estuda as relações entre energia, calor e trabalho. Tal princípio diz que a entropia (a medida do grau de desordem de um sistema) aumenta com o decorrer do tempo. Isso significa que vivemos em um mundo dominado pela desordem. Sendo assim, como é que os seres vivos podem existir?

Essa suposta contradição decorre do fato de que a entropia é definida para sistemas em equilíbrio (como

a passagem de moléculas de água da fase líquida para a de vapor, e vice-versa, em um recipiente fechado). Acontece que os seres vivos são sistemas que se encontram 'afastados do equilíbrio' devido ao 'gradiente' energético imposto pelo Sol. Um gradiente envolve uma escala de valores que varia entre dois extremos: um exemplo é o gradiente térmico produzido por uma fonte de calor, como uma fogueira: quando nos aproximamos dela percebemos uma elevação gradual da temperatura no espaço ao seu redor.

Para solucionar a aparente incompatibilidade entre o segundo princípio da termodinâmica e a existência dos seres vivos foi preciso estender esse princípio para que pudesse ser aplicado ao estudo desses seres e de outros sistemas afastados do equilíbrio. Antes de aprofundar a questão, é importante explicar alguns conceitos básicos da termodinâmica, como os de seta do tempo, estabilidade, equilíbrio e outros.

# Termodinâmica da vida

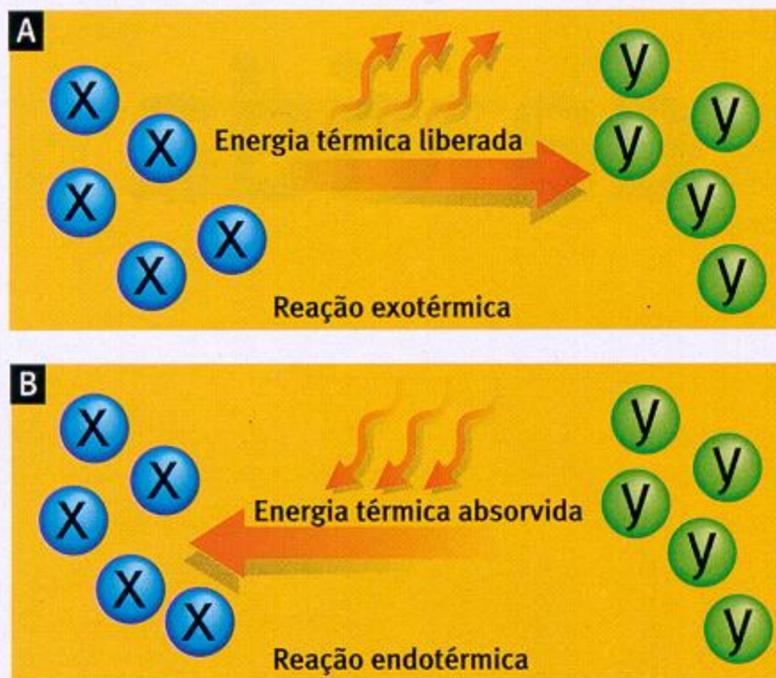
## Desordem e seta do tempo

O gradativo aumento da desordem determina o sentido da chamada 'seta do tempo', que aponta sempre do passado em direção ao futuro. Para entender esse conceito, imaginemos a queda de uma xícara de porcelana contendo café. Não nos surpreenderíamos ao assistir a um filme em que a xícara cai de uma mesa e se quebra quando atinge o chão, derramando seu conteúdo. Mas nos espantariamos se a tela mostrasse o café derramado e os cacos se juntando para reconstituir a xícara e, em seguida, esta saltando do chão para a mesa. Essa cena nos pareceria bastante estranha, e saberíamos que a gravação estava sendo mostrada de trás para frente, ou seja, estava ocorrendo em sentido contrário ao da seta do tempo.

Suponhamos, porém, que uma pessoa de posse dessa xícara decida despejar o café nela contido em um copo com leite, ambos à mesma temperatura. Sabemos que, com o decorrer do tempo, o café irá se misturar com o leite até se espalhar de modo praticamente uniforme por todo o volume do copo. No entanto, embora seja bastante incomum, as moléculas do café poderiam se reagrupar em uma determinada região do copo, mesmo após terem se dispersado pelo leite. Se isso acontecesse, veríamos o leite dividindo espaço com uma porção separada de café.

Essa separação aumentaria a organização do copo, mas ela não ocorre espontaneamente porque é estatisticamente pouco provável. Para entendermos isso, consideremos que o evento descrito tenha dois estados: em um, o café está misturado no leite, enquanto no outro eles estão estranhamente separados. Cada um desses estados abrange microestados, que variam de acordo com as posições que poderiam ser ocupadas pelas moléculas do café. Quando há mistura, as moléculas do

Figura 1. Em uma reação exotérmica (A), ocorre perda de energia na transformação do composto X no composto Y, enquanto na reação reversa (Y→X), endotérmica (B), há absorção de energia



café podem se distribuir pelo leite de inúmeras maneiras, e cada uma corresponde a um microestado. Como ocorre uma enorme quantidade de microestados (ou seja, mais desordem), esse estado é praticamente inevitável. No outro caso, as moléculas do café, agrupadas, passam a ocupar um volume menor, o que reduz drasticamente a quantidade de possíveis modos de se distribuírem no leite. Isso significa a ocorrência de poucos microestados (mais ordem), o que é altamente improvável.

Esse é um dos exemplos de que as configurações organizadas, ou seja, que têm menor número de possíveis estados, tendem a ceder lugar para aquelas mais desorganizadas, que apresentam maior número de possíveis estados. Isso explica o sentido da seta do tempo.

Além disso, o aumento da desordem (entropia) implica perda de informação. Isso pode ser visualizado imaginando-se um quebra-cabeça já mon-

tado dentro de uma caixa. Se balançarmos intensamente essa caixa, as peças desse quebra-cabeça se separarão e a imagem que elas formavam se desfaz. Antes, quando as peças estavam devidamente encaixadas, o quebra-cabeça exibia uma figura reconhecível – portanto, continha informação. Essa informação é perdida, quando o ato de sacudir a caixa faz com que as peças se distribuam de modo aleatório.

## Energia e estabilidade

A capacidade da energia para realizar trabalho é denominada exergia. Essa capacidade diminui à medida que a energia é usada na execução de um determinado processo. Isso significa que a energia foi degradada. Portanto, é a exergia que permite a um sistema realizar os processos necessários para que continue organizado. Além disso, quanto maior o conteúdo de exergia de um sistema, maior a possibilidade de que esse sistema sofra uma transformação e, portanto, menor a sua estabilidade. Isso porque estabilidade é a tendência de permanecer, ao longo do tempo, em um determinado estado.

Vimos que um sistema, espontaneamente, por uma questão de probabilidade, faz a transição de uma configuração mais organizada para outra, menos organizada. Como a forma organizada possui mais exergia que a desorganizada, nesse processo ocorre uma redução da exergia e, em consequência, um aumento da estabilidade. Portanto, para se tornar mais estável, um sistema tende a alcançar uma configuração de menor exergia.

## Equilíbrio e processos reversíveis

Muitos sistemas estão em equilíbrio e tendem a permanecer nesse estado. Tais sistemas, porém, podem ser afastados do equilíbrio se sofrerem uma perturbação. No entanto, esses sistemas têm mecanismos que se opõem aos efeitos provocados pela



Figura 2. Um sistema formado por uma reação reversível, inicialmente em equilíbrio (A), mostra velocidades iguais de formação de X e Y (equilíbrio dinâmico), mas seu aquecimento perturba esse estado, favorecendo (B) a formação de X a partir de Y em uma tentativa do sistema de dissipar a energia térmica excedente e retornar ao equilíbrio

perturbação, em uma tentativa de permanecer em um estado de equilíbrio, ainda que esse novo equilíbrio seja geralmente diferente daquele em que o sistema estava antes do início da perturbação.

As reações químicas reversíveis são bons exemplos de sistemas em equilíbrio, porque são bastante estudadas no ensino médio. Imaginemos uma reação desse tipo tendo, em suas duas 'pontas', os compostos X e Y. Esse sistema pode ser perturbado pela alteração da temperatura a que está submetido. Para entender isso, suponhamos que a transformação de X em Y seja um processo em que ocorre liberação de energia, na forma de calor, do sistema para o ambiente (processo exotérmico). Devido a essa liberação de energia, o conteúdo energético de Y será inferior ao de X. Por isso, a reação inversa, ou seja, de formação de X a partir de Y, requer a absorção de energia térmica (processo endotérmico) (figura 1).

Vamos admitir que esse sistema reversível esteja inicialmente em equilíbrio (com igual velocidade de formação de ambos os compostos) a uma determinada temperatura. Se o sistema for aquecido, sofrerá uma perturbação, devido a esse maior influxo de energia térmica. Para poder permanecer no estado de equilíbrio, o sistema terá de se livrar desse excesso de energia. Isso é conseguido pelo favorecimento da reação de conversão de Y em X, que absorverá o excedente de energia térmica (figura 2). Caso ocorresse o contrário, ou seja, se o sistema fosse resfriado, a reação favorecida seria a de formação de Y a partir de X, em uma tentativa do sistema de restabelecer a temperatura inicial e assim retornar ao estado de equilíbrio (figura 3).

Os sistemas afastados do equilíbrio também têm mecanismos próprios que lhes permitem permanecer nessa situação. Esses sistemas podem se afastar ainda mais do equilíbrio quando submetidos a um gradiente aplicado externamente, como um influxo de energia. Esse gradiente poderia ser uma diferença de temperatura.

Suponhamos que um sistema afastado do equilíbrio e estável à temperatura de 25°C seja colocado em contato com um corpo a 50°C. Há, nesse caso, um gradiente de temperatura que irá determinar a transferência de energia térmica do corpo para o sistema, pois o calor flui de um corpo mais quente para outro mais frio. Seria de se esperar que fosse alcançado o equilíbrio térmico, mas o sistema insiste em continuar a 25°C. Isso requer que a energia térmica que entra no sistema seja de novo lançada para fora (dissipada, em termos técnicos). Por isso, tais sistemas são chamados de dissipativos. Como a temperatura do corpo cai à medida que fornece energia térmica para o sistema, quando aquele chegar a 25°C o gradiente de

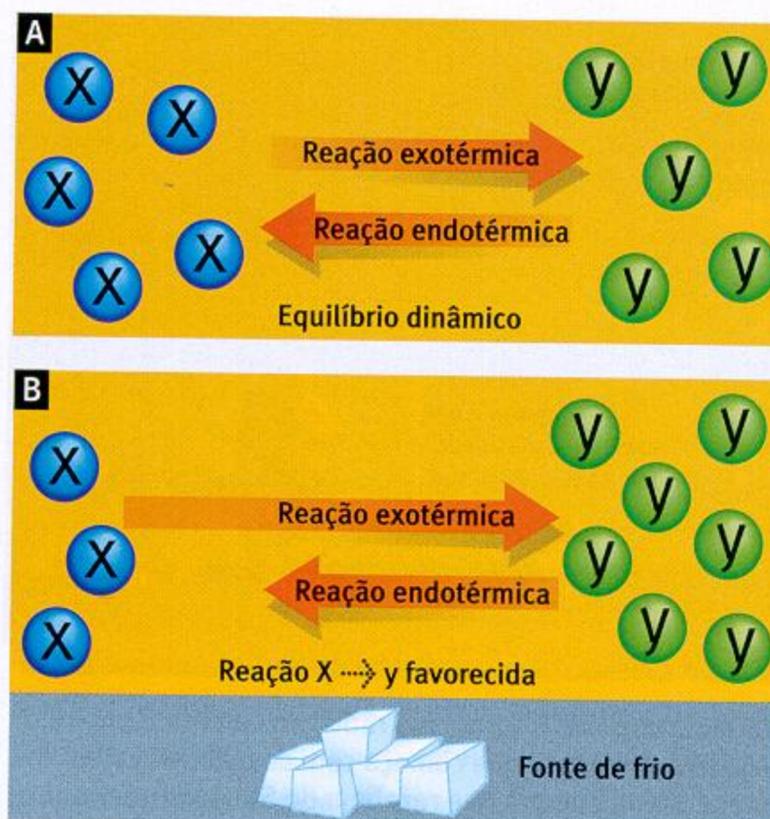


Figura 3. Quando o sistema formado por uma reação reversível, em equilíbrio (A), é resfriado, a formação de Y a partir de X é favorecida (B), pois o sistema precisa restabelecer a energia inicial para voltar ao estado de equilíbrio

energia desaparecerá, pois ambos (corpo e sistema) terão a mesma temperatura.

Foi constatado que, quanto maior o gradiente imposto sobre um sistema dissipativo, mais sofisticados são os mecanismos que esse sistema desenvolve para dissipá-lo. Isso se aplica aos seres vivos, que são sistemas dissipativos submetidos ao grande gradiente de temperatura provocado, na Terra, pelo contínuo fluxo de energia vindo do Sol.

## Seres vivos, dissipação e evolução

Os seres vivos são estruturas altamente organizadas. Além disso, no decorrer da evolução surgiram espécies cada vez mais complexas e, portanto, com maior grau de organização. Entretanto, isso vai contra o sentido apontado pela seta do tempo. Essa dissonância é solucionada pela reformulação do segundo princípio da termodinâmica, que torna possível o estudo de sistemas afastados do equilíbrio, como é o caso dos seres vivos.

De acordo com essa reformulação, proposta pelo biólogo norte-americano Eric D. Schneider e pelo engenheiro de sistemas canadense James J. Kay (1954-2004), os sistemas afastados do equilíbrio recorrerão a todos os meios disponíveis para resistir à aplicação externa de gradientes energéticos.

Eles argumentam que a luta pela vida consiste no esforço dos seres vivos para dissipar o gradiente de temperatura induzido na Terra pela radiação. A energia proveniente do Sol, em decorrência do seu conteúdo de exergia, tende a afastar os siste-

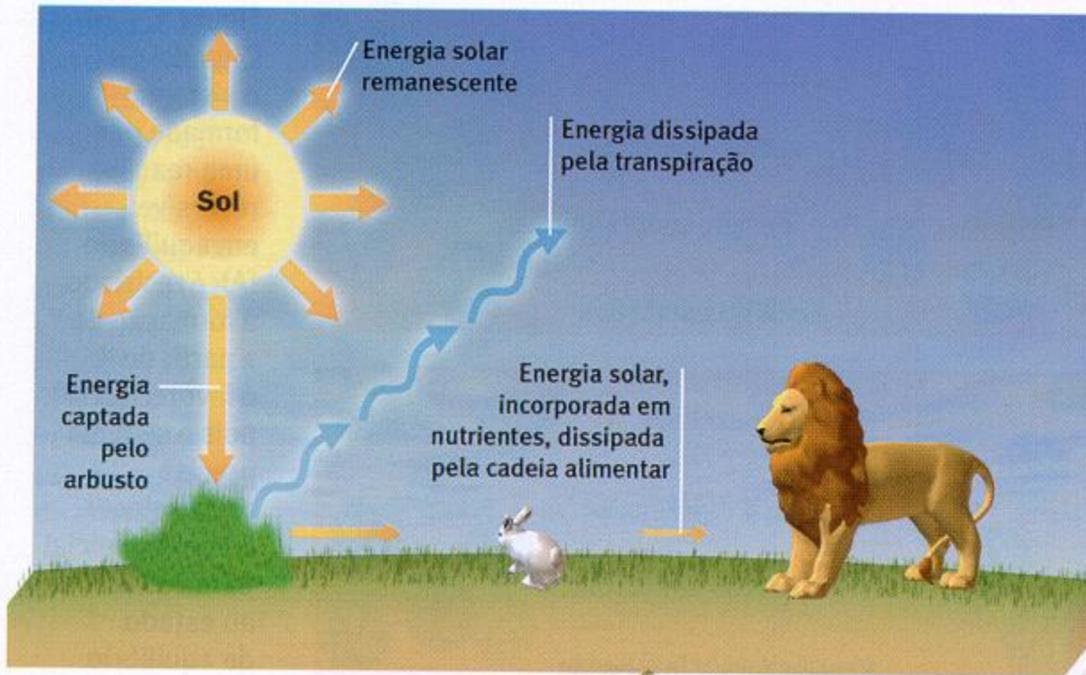
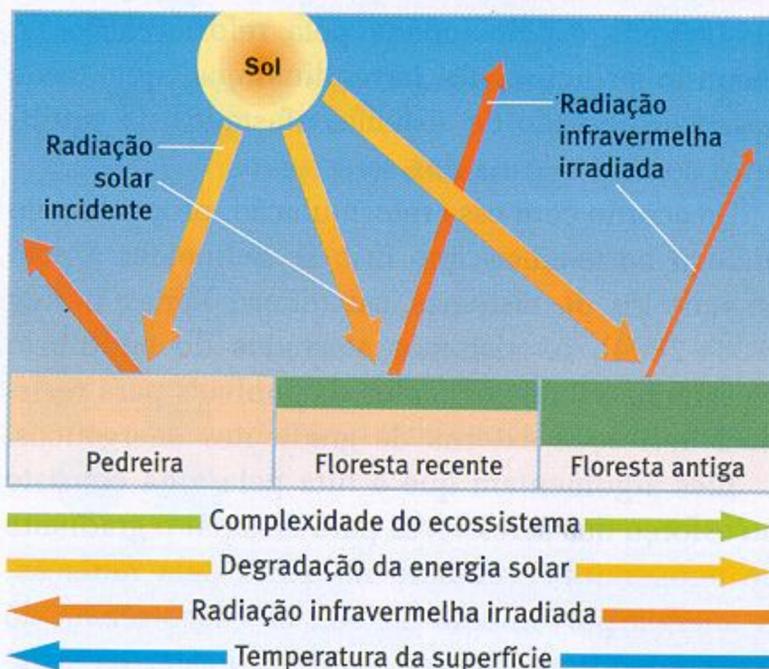


Figura 4. O gradiente térmico imposto à Terra pela radiação solar (em amarelo) é dissipado através da cadeia alimentar, que começa com as plantas. Estas aproveitam na fotossíntese 1% da energia que recebem do Sol e utilizam o resto principalmente na transpiração (em azul). A energia incorporada pelas plantas é gradualmente degradada na cadeia alimentar (em laranja)

mas vivos ainda mais do equilíbrio. Em resposta, esses sistemas desenvolveram mecanismos que lhes permitem promover maior degradação da energia, para reduzir seu conteúdo de exergia, em uma tentativa de dissipar o gradiente de temperatura imposto pelo Sol. Ao desenvolver esses mecanismos, o sistema torna-se mais complexo, o que envolve um maior nível de organização. Assim, a necessidade de dissipar energia induz a formação de estruturas ordenadas.

O processo de dissipação de gradientes de energia foi o motor da evolução, pois favoreceu o surgimento de organismos vivos cada vez mais complexos. Uma forte evidência disso é que, em geral, os organismos vivos surgidos mais recentemente na escala evolutiva são os que dissipam mais energia.



Podemos constatar isso através da comparação da taxa metabólica de animais homeotérmicos e pecilotérmicos. Os primeiros são os animais capazes de regular sua temperatura corporal, mantendo-a praticamente constante (aves e mamíferos), e os outros são aqueles cuja temperatura corporal varia de acordo com as condições do ambiente (invertebrados, peixes, anfíbios e répteis). A regulação da temperatura interna, nos homeotérmicos, é obtida pela produção de energia térmica, quando necessário, mas isso exige um metabolismo mais intenso e maior demanda de energia. Portanto, eles degradam mais energia que os pecilotérmicos. Como seria de se esperar, esses últimos surgiram, durante o processo evolutivo, antes dos homeotérmicos.

Assim, o objetivo da vida seria a produção de estruturas dissipativas, as quais foram muito estudadas pelo químico russo (naturalizado belga) Ilya Prigogine (1917-2003), premiado em 1977 com o Nobel de Química por seus trabalhos sobre essa questão. As primeiras estruturas dissipativas teriam surgido por eventos aleatórios e se mantiveram pela transmissão da informação genética. A partir de então, a seleção natural encarregou-se de manter estruturas que dissipavam energia de modo cada vez mais eficiente, gerando um aumento da complexidade.

## Energia e biodiversidade

A dissipação do gradiente térmico a que a Terra é submetida ocorre de modo integrado, através da cadeia alimentar, que começa com as plantas. De toda a energia que as plantas absorvem do Sol, apenas cerca de 1% é utilizada nas reações de fotossíntese para a produção de matéria orgânica. O restante é degradado (dissipado) por meio da transpiração (liberação de vapor). Também a matéria orgânica gerada pelas plantas, ao entrar na cadeia alimentar, terá a sua energia degradada quando consumida pelos demais seres vivos (figura 4).

Figura 5. Se uma pedreira, uma floresta recente e uma floresta antiga recebem a mesma quantidade de energia solar por unidade de tempo (em amarelo), a pedreira irradiará mais radiação infravermelha (em vermelho) que a floresta recente, que por sua vez irradiará mais que uma floresta antiga. Isso acontece porque, à medida que aumenta a complexidade de um ecossistema, maior é sua eficiência em degradar a energia solar e, por isso, menor a liberação de radiação infravermelha, resultando em menor temperatura de superfície

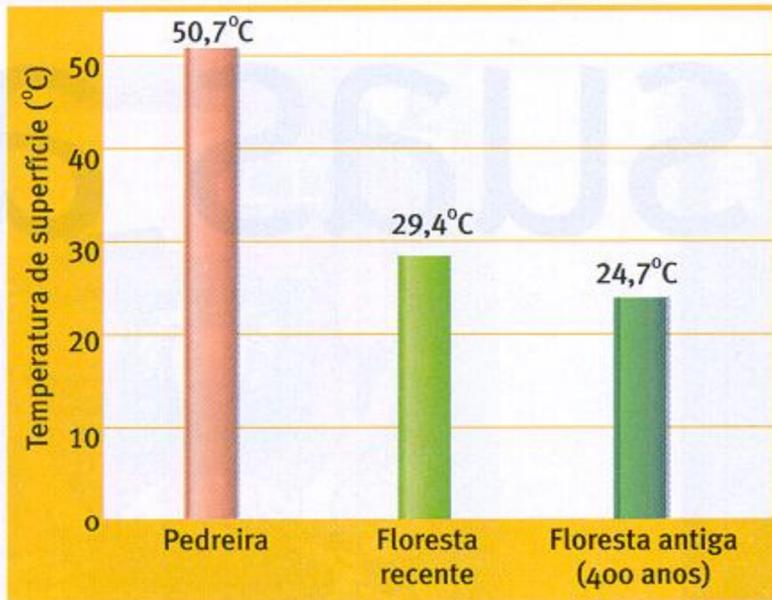


Figura 6. Quanto mais desenvolvido um ecossistema, menor sua temperatura de superfície. Isso acontece porque o aumento da complexidade do ecossistema traz maior capacidade de degradar o influxo de energia solar, restando menos energia para ser irradiada na forma de radiação infravermelha

Quanto maior a quantidade de espécies, mais numerosos são os caminhos pelos quais a energia pode ser degradada. É por essa razão que a biodiversidade é maior no Equador: esta é a região da Terra que recebe o maior influxo de energia, devido ao ângulo (praticamente perpendicular) de incidência da radiação vinda do Sol.

Outra evidência que confirma o segundo princípio da termodinâmica reformulado é a sucessão ecológica. Esse processo é o da ocupação de uma área inabitada ou devastada por seres vivos sucessivamente mais complexos, até que seja atingido o equilíbrio, chamado de clímax. Para entender esse processo, podemos imaginar uma pedreira abandonada: ela é inicialmente ocupada por líquens,

que modificarão o ambiente, propiciando o surgimento de gramíneas e, em seguida, de arbustos, depois de árvores e assim por diante. O ecossistema que se desenvolve na antiga pedreira torna-se, com o decorrer do tempo, gradativamente mais complexo e, portanto, sua capacidade de degradar a energia solar aumenta. Assim, uma floresta de formação recente degrada menos energia que uma floresta antiga. E uma pedreira em uso degrada menos energia ainda (figura 5).

Por degradar mais energia solar, através da evapotranspiração (a transpiração das plantas somada à evaporação do solo e dos cursos d'água), uma floresta irradia menos energia, na forma de radiação infravermelha, do que uma pedreira (figura 6).

Medições relacionadas com a radiação infravermelha irradiada mostram que a temperatura de superfície de uma pedreira é maior que a de uma floresta. Essas medições também permitem constatar que a temperatura de superfície de uma floresta diminui à medida que esta alcança estágios sucessionais mais avançados. Isso indica que, quanto maior o amadurecimento de um ecossistema, maior

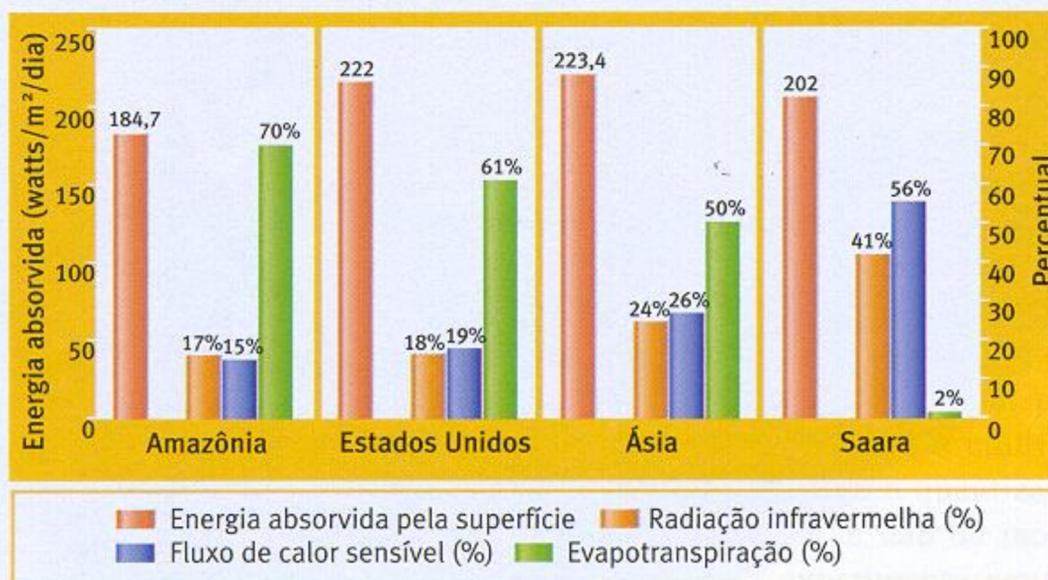


Figura 7. Comparação entre energia absorvida pela superfície, radiação infravermelha irradiada, fluxo de calor sensível e evapotranspiração de quatro ambientes, apresentados na ordem – do mais desenvolvido (floresta amazônica) para o menos desenvolvido (deserto do Saara). Percebe-se que, quando menos desenvolvido é o ecossistema, maior é o percentual de radiação infravermelha irradiada. O calor sensível é outra forma de energia que não pode ser degradada pelo ambiente e causa desequilíbrio. Já a evapotranspiração permite ao ecossistema degradar o influxo de energia solar. Percebe-se que, quanto mais desenvolvido um ecossistema, maior a sua taxa de evapotranspiração

sua capacidade de degradar energia. Essa degradação ocorre principalmente pela evapotranspiração (figura 7). Além disso, quando um ecossistema é perturbado, sua capacidade de degradar energia é comprometida, e isso prejudica seu desenvolvimento.

A Terra, como um todo, pode ser considerada um imenso sistema dissipativo. Os fenômenos climáticos – tornados, correntes marinhas, furacões, nuvens e outros – são estruturas coerentes que se formam em uma tentativa do planeta de dissipar o gradiente térmico entre a superfície e a atmosfera, decorrente do influxo de energia vindo do Sol. Os seres vivos e os ecossistemas, como vimos, têm essa mesma função. Isso favorece a chamada hipótese Gaia, segundo a qual o planeta Terra se comporta como um organismo vivo.

SUGESTÕES PARA LEITURA

HAWKING, S. 'A seta do tempo', in *Uma breve história do tempo*. Rio de Janeiro, Rocco, 1989.  
 SCHNEIDER, E.D. & KAY, J.J. 'Life as a manifestation of second law of thermodynamics', in *Mathematical Computer Modeling*, v. 19; p. 25, 1994 (também disponível em [www.jameskay.ca](http://www.jameskay.ca)).  
 SCHNEIDER, E.D. & KAY, J.J. 'Ordem a partir da desordem: a termodinâmica da complexidade biológica', in Murphy, M.P. & O'Neill, L., *O que é vida? 50 anos depois*. São Paulo, Editora Unesp, 1997.  
 SCHRÖDINGER, E. *O que é vida?* São Paulo, Editora Unesp, 1997.