

# A evolução da composição da atmosfera terrestre e das formas de vida que habitam a Terra

**Eduardo Galembeck e Caetano Costa**

A composição da atmosfera terrestre, assim como a vida, evoluíram de forma paralela nestes últimos 3,5 bilhões de anos de história do nosso planeta. A composição química da Terra primitiva foi fundamental para o surgimento da vida. Organismos rudimentares, unicelulares, foram capazes de alterar o ambiente, transformando substâncias abundantes em outras, aproveitadas por novas formas vivas. Tais modificações permitiram que a seleção natural operasse e contribuísse para a diversificação da vida. Assim, de forma sucessiva, diversos microrganismos evoluíram e alteraram a composição da atmosfera terrestre. Este texto tem como objetivo fornecer a professores de química e de biologia subsídios para um diálogo entre estas disciplinas que transite pela história do planeta Terra permeando temas como a química pré-biótica, as fontes de energia para a atividade biológica, reações de oxidação e redução, organização e metabolismo celular, diversidade e evolução dos seres vivos.

► atmosfera primitiva; diversidade metabólica; evolução ◀

Recebido em 09/06/2015, aceito em 22/11/2015

318

## Vida à vista

A idade do planeta Terra é estimada em cerca de 4,5 bilhões de anos. A presença de vida só se viabilizou com o aparecimento de água no estado líquido, o que ocorreu com a formação dos oceanos há cerca de 3,8 bilhões de anos. De acordo com os registros fósseis, as primeiras evidências de vida microbiana datam de 3,5 bilhões de anos (Martin e Russell, 2003). Nessa época, a atmosfera da Terra primitiva apresentava características físico-químicas marcantes (Jardim, 2001): ausência do gás oxigênio; predomínio de gases como metano, gás carbônico, nitrogênio e amônia, além de quantidades significativas de sulfetos e cianetos. Por seu caráter eminentemente redutor, era formada por substâncias reduzidas. As temperaturas eram bem mais altas que as atuais, e o sol (radiação ultravioleta) consistia na principal fonte de energia. Nessas condições, foi possível a síntese pré-biótica (Murta e Lopes, 2005), pela

qual se formaram moléculas orgânicas fundamentais para o surgimento da vida.

## A vida primitiva

Os primeiros organismos vivos eram bactérias primitivas, que apresentavam características celulares simples, tais como

**Os primeiros organismos vivos eram bactérias primitivas, que apresentavam características celulares simples, tais como uma parede celular rudimentar, poucas enzimas e ausência de citocromos (Barbosa e Torres, 2005). Tais seres apresentavam um metabolismo exclusivamente anaeróbico, utilizando muito provavelmente compostos inorgânicos (como derivados de ferro e enxofre, abundantes à época) para satisfazer suas necessidades metabólicas.**

uma parede celular rudimentar, poucas enzimas e ausência de citocromos (Barbosa e Torres, 2005). Tais seres apresentavam um metabolismo exclusivamente anaeróbico, utilizando muito provavelmente compostos inorgânicos (como derivados de ferro e enxofre, abundantes à época) para satisfazer suas necessidades metabólicas. Tais necessidades primordiais envolviam a síntese de uma fonte de energia química (ATP) e a capacidade de fixar o nitrogênio

atmosférico (para a síntese de proteínas e nucleotídeos).

Os processos de obtenção de energia por micro-organismos podem ser classificados com base em três critérios

(Barbosa e Torres, 2005): fonte de carbono, fonte de energia e substrato oxidável. No caso do primeiro critério, podem utilizar apenas CO<sub>2</sub> como fonte de carbono (autotróficos; grego *trophé* = nutrição) ou outras fontes orgânicas de carbono – uma ou mais (heterotróficos). No segundo caso, podem utilizar energia luminosa (fototróficos) ou contida em compostos químicos (quimiotróficos). Quanto ao terceiro critério, podem oxidar substâncias inorgânicas (litotróficos) ou orgânicas (organotróficas). Dadas as condições descritas da Terra primitiva, acredita-se que um dos seres primordiais tenha sido um micro-organismo anaeróbico termofílico quimiolitoautotrófico (Fuchs, 2011).

### A seleção natural atua como guia para a diversidade das estratégias metabólicas e das espécies

Os eventos evolutivos apresentados por este artigo devem ser compreendidos e discutidos à luz da *seleção natural*. Conceitualmente, a seleção natural consiste em um “mecanismo proposto por Darwin e Wallace para explicar o processo de mudança evolutiva” (Meyer e El-Hani, 2005, p. 128). É um mecanismo cujo ponto de partida é a *produção de variação* (Mayr, 2005), causada por rearranjos gênicos, mutações ou pressões ambientais. Os diferentes fenótipos assim produzidos são selecionados a cada geração por meio da eliminação dos indivíduos menos adaptados e da manutenção dos indivíduos que melhor se adaptaram, os quais possuem maior chance de sobreviver e de se reproduzir. Assim, por meio desse processo de *reprodução diferencial*, aumenta a frequência de transmissão à sua prole daquela variação genética que o tornou bem sucedido (Meyer e El-Hani, 2005).

É importante levar em conta a influência do ambiente nesse processo, particularmente sua característica de instabilidade. Em outras palavras, “características adaptativas são aquelas que se tornaram frequentes na população porque favoreceram a sobrevivência e/ou reprodução de seus portadores na circunstância ambiental em que evoluíram” (Meyer e El-Hani, 2005, p. 64). Esses autores concluem (p. 69): “a evolução por seleção natural é um processo que persegue, por assim dizer, um “alvo móvel”: as condições ambientais que estabelecem os desafios aos quais os organismos responderão estão continuamente mudando, em parte por causa das atividades dos próprios organismos”. E em parte, como os próprios autores apontam, devido a processos independentes dos seres vivos, como, por exemplo, alterações de origem geológica.

Ao longo do tempo, durante sucessivas gerações, a seleção natural tem o potencial de produzir novas estruturas, novos órgãos, vias metabólicas diferentes das existentes, e até

Desde o surgimento da vida, os seres vivos modificaram constantemente a superfície e a atmosfera terrestres: consumiam certos compostos e produziam outros, competiam por substratos, proliferavam e ocupavam novos nichos, enquanto outras pereciam. Sobreviver era um desafio constante, superado pelos indivíduos capazes de aproveitar os recursos disponíveis em dado local e momento. Nesse processo dinâmico, guiadas pela seleção natural, diversificavam-se as espécies microbianas e os tipos de metabolismo.

mesmo novas espécies. Contudo, é necessário atentar para o fato de que cada novidade não se origina a partir do zero; pelo contrário, as novas mudanças ou adaptações são construídas a partir de estruturas ou sistemas *já existentes*, fazendo-os assumir novas funções ou combinando-os de forma a originar um componente ou sistema *aperfeiçoado* (Jacob, 1977).

### O metabolismo primordial

Desde o surgimento da vida, os seres vivos modificaram constantemente a superfície e a atmosfera terrestres: consumiam certos compostos e produziam outros, competiam por substratos, proliferavam e ocupavam novos nichos, enquanto outras pereciam. Sobreviver era um desafio constante, superado pelos indivíduos capazes de aproveitar os recursos disponíveis em dado local e momento. Nesse processo dinâmico, guiadas pela seleção natural, diversificavam-se as espécies microbianas e os tipos de metabolismo. Como se pode observar na Figura 1, com o passar do tempo, as vias aeróbias passaram a predominar sobre as anaeróbias, conforme a disponibilidade de substratos e de oxigênio. Assim, as mudanças ambientais exerceram forte pressão seletiva, contribuindo para o surgimento de novas adaptações que conferiram a seus portadores maior capacidade de sobrevivência, resultando na evolução do metabolismo bacteriano.

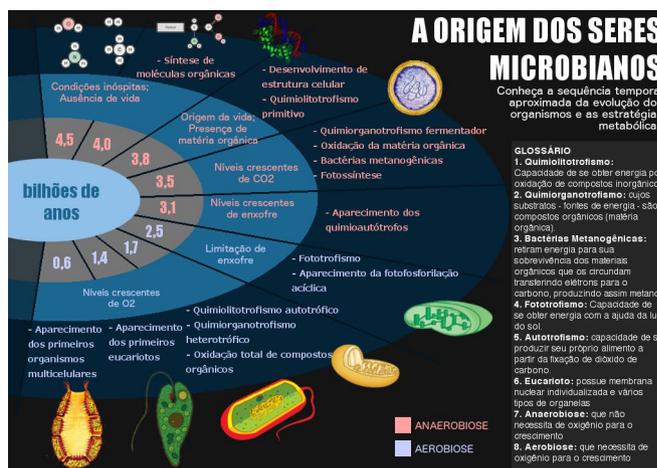


Figura 1: Sequência temporal aproximada da evolução dos organismos e da atmosfera terrestre.

É muito provável que as primeiras vias metabólicas tenham sido a fermentação a partir de compostos orgânicos (produzidos pela luz solar ultravioleta), e a respiração anaeróbica<sup>1</sup> usando o CO<sub>2</sub> atmosférico. Com o aumento do consumo, esses substratos começaram a escassear, criando uma oportunidade para mudanças genéticas que permitiram o surgimento de uma nova via metabólica, a respiração de

sulfatos, com liberação de gases de enxofre ( $H_2S$ ). Ao longo do tempo, essas bactérias respiradoras de sulfato dominaram o novo ambiente e foram pioneiras na síntese do anel porfirínico. Este composto, a porfina, participa de processos que envolvem transferência de elétrons, constituindo a base estrutural para moléculas como as clorofilas e os citocromos. Assim, há milhões de anos, as porfirinas e seus derivados têm papel fundamental na síntese de ATP em plantas e animais, além de contribuir para o transporte de  $O_2$  em vertebrados (como parte integrante da hemoglobina).

Nesse contexto metabólico primordial, estabeleceram-se as condições para o aparecimento da fotossíntese bacteriana (Margulis e Sagan, 2011). No início, as bactérias utilizavam  $H_2$  ou  $H_2S$ , sem jamais produzir  $O_2$  – trata-se da fotossíntese anoxigênica. No decorrer do tempo, o  $H_2$  atmosférico foi rareando – por ser muito leve, grandes quantidades simplesmente escapavam da atmosfera e perdiam-se no espaço. Por outro lado, ainda havia  $H_2S$  no ar, liberado por vulcões. Dessa forma, cada vez mais o  $H_2S$  era utilizado como substrato pelas bactérias fermentadoras, as quais liberavam enxofre como subproduto (Raven et al., 2011).

Uma vez que a vida no planeta é baseada em carbono e hidrogênio, sempre houve uma demanda incessante por esses elementos. Com a multiplicação dos procariontes por grande parte do planeta, houve um aumento exponencial da comunidade bacteriana. Assim, o alto consumo praticamente esgotou o  $CO_2$  atmosférico, e mesmo o  $H_2S$  expelido pelos vulcões já não era suficiente. O problema foi solucionado pelas ancestrais das modernas cianobactérias, seres que utilizavam  $H_2S$  e que já faziam fotossíntese, ou seja, já possuíam transportadores de elétrons organizados em cadeia e realizavam a fotofosforilação cíclica<sup>2</sup>. Tal mudança ambiental propiciou o aparecimento de mutações que permitiram àquelas cianobactérias primitivas aproveitar a estrutura já existente e funcional (cadeias transportadoras de elétrons e um fotossistema) e desenvolver *um segundo fotossistema*, aprimorando a captação da energia solar e aumentando a produção líquida de ATP (Margulis e Sagan, 2011). Dessa forma, passaram a extrair elétrons de uma fonte de hidrogênio abundante e disponível, a água, e assim começaram a liberar oxigênio gasoso, originando a fotossíntese oxigênica. Com essa admirável adaptação ao meio, as cianobactérias aumentaram sua taxa de sobrevivência e de reprodução, mantendo-se em ambientes aquáticos até os dias atuais.

### O grande evento oxidativo

O primeiro grande passo para o aumento dos níveis atmosféricos de oxigênio foi dado pelas cianobactérias, quando passaram a extrair elétrons da água ao invés de  $H_2S$ .

Dessa maneira, propiciaram a liberação de oxigênio gasoso, aumentando gradativamente sua concentração na atmosfera, caracterizando o fenômeno por vezes denominado de “Grande Evento Oxidativo” (Lyons et al., 2014), há cerca de dois bilhões de anos. Mais 1,5 bilhão de anos foram necessários para que a concentração de oxigênio atingisse níveis próximos dos atuais, o que deve ter ocorrido por volta de 600 milhões de anos atrás. Assim, até que a taxa desse gás se estabilizasse, os únicos organismos capazes de se desenvolver foram bactérias (anaeróbias facultativas ou microaerófilas), uma vez que os organismos aeróbios multicelulares só sobrevivem no nível atual de oxigênio atmosférico (cerca de 21%). Tal demora no acúmulo e a consequente estabilização dos níveis de oxigênio ocorreu porque primeiro era necessário

consumir (oxidar) as enormes quantidades de  $Fe^{2+}$  no planeta (Audesirk et al., 2011; Madigan et al., 2009). Aos poucos, a atmosfera foi mudando sua condição, de redutora para oxidativa.

Ao longo daquele enorme intervalo de tempo, os organismos aeróbios obtiveram grande vantagem em usar o oxigênio, aumentando sua complexidade e sua produção líquida de ATP. Graças a essas imensas vantagens

adaptativas, multiplicaram suas chances de sobrevivência e aumentaram sua reprodução diferencial, ocupando a maioria dos nichos ambientais da Terra (Audesirk et al., 2011). Por outro lado, em virtude do potencial oxidativo do meio e da capacidade do oxigênio em gerar radicais livres, os seres aeróbios tiveram que desenvolver mecanismos antioxidantes. O aumento na concentração atmosférica de oxigênio também trouxe duas outras consequências: i) a seleção natural levou à eliminação de várias espécies que não se adaptaram à toxicidade do gás; ii) formou-se a camada de ozônio, um escudo protetor contra os raios ultravioleta do sol. A explosão populacional das cianobactérias consolidou um novo tipo de metabolismo, a respiração aeróbia, criando condições para um novo estágio evolutivo: a célula nucleada, característica dos seres eucariontes, por volta de 1,4 bilhão de anos atrás.

### O ciclo de Krebs

Uma das primeiras vias metabólicas bem sucedidas (até hoje conservada em praticamente todos os seres vivos) é a via glicolítica. Nos primórdios da vida, funcionava somente em anaerobiose, produzindo piruvato e ATP. O piruvato é um composto central no metabolismo em vários reinos, das bactérias aos animais. Pode ser originado a partir de certos aminoácidos, de glicerol e de carboidratos, principalmente monossacarídeos.

Com a presença do oxigênio, um dos produtos da via glicolítica (piruvato) pôde ser redirecionado para uma nova via, desta vez cíclica, por meio da conversão a acetil-CoA. Esta

Uma vez que a vida no planeta é baseada em carbono e hidrogênio, sempre houve uma demanda incessante por esses elementos. Com a multiplicação dos procariontes por grande parte do planeta, houve um aumento exponencial da comunidade bacteriana. Assim, o alto consumo praticamente esgotou o  $CO_2$  atmosférico, e mesmo o  $H_2S$  expelido pelos vulcões já não era suficiente.

nova via, o ciclo de Krebs, mostrou-se altamente eficiente em aumentar a produção de ATP, ao permitir a oxidação completa do substrato. Do ponto de vista evolutivo, o aparecimento e manutenção de uma via cíclica foi vantajoso para os organismos, ao permitir um melhor aproveitamento do acetato do que por meio de uma via linear (direta), como as que usam glicolato, formaldeído ou formiato (Baldwin e Krebs, 1981). Assim, em uma atmosfera com níveis significativos de oxigênio, os organismos multicelulares aeróbios foram favorecidos por essa característica, aumentando suas chances de sobrevivência e de transmitir essa capacidade aeróbia a sua descendência. Frente a essa nova condição ambiental, os seres anaeróbios se encontravam em desvantagem, pois, como visto, o oxigênio, um poderoso oxidante, é letal para esses organismos. Por outro lado, isso não significou a eliminação completa desses seres – novas mudanças genéticas permitiram que muitos deles se adaptassem à vida aeróbia sob diferentes graus de tolerância ao oxigênio; aqueles estritamente anaeróbios colonizaram locais nos quais o oxigênio não tem acesso, como áreas subterrâneas ou mesmo regiões do nosso corpo, nos tratos respiratório e intestinal.

Conforme discutido, as alterações evolutivas são graduais e operam com o objetivo de chegar a uma estrutura o mais adequada possível para certa condição ambiental; assim, o ciclo não surgiu em sua forma final com início na condensação de acetil-CoA e oxaloacetato e regeneração deste ao final. Bactérias como a *E. coli*, organismo anaeróbio facultativo, são capazes de realizar o ciclo de Krebs quando há oferta de oxigênio. Porém, em anaerobiose, ocorre uma mudança marcante em seu metabolismo: os complexos das desidrogenases (piruvato desidrogenase e alfa-cetoglutarato desidrogenase) têm sua síntese suprimida (Barbosa; Torres, 2005). Nessas condições, o ciclo não se completa, e apenas algumas reações se processam; na verdade, ocorrem duas vias lineares: um ramo oxidativo e um ramo redutor (Figura 2). O primeiro ramo é similar às primeiras reações do ciclo completo, e o segundo comporta reações que ocorrem em sentido inverso ao usual.

Tais ramos podem ser considerados como precursores do ciclo de Krebs, pois podem ter operado nas condições atmosféricas da terra primitiva (anóxia) (Weitzman, 1985). O ramo redutor pode, a partir de succinato, produzir succinil-CoA, composto precursor de porfirinas e vários aminoácidos. No ramo oxidativo, a função central é produzir coenzimas reduzidas para a síntese de carboidratos, além de precursores de aminoácidos (alfa-cetoglutarato). Ainda hoje, muitas espécies de bactérias apresentam um ciclo de Krebs incompleto, com reações que objetivam a síntese de compostos fundamentais e evitam o acúmulo de equivalentes redutores (por não possuírem uma cadeia organizada que os possa reoxidar). Algumas bactérias realizam o ciclo de Krebs completo, mas no sentido redutor,

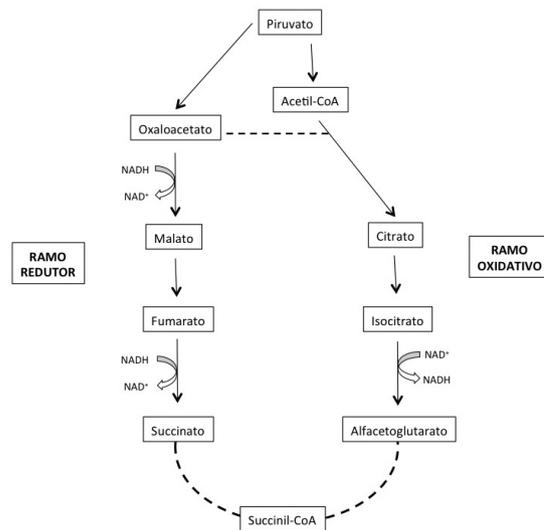


Figura 2: Esquema das possíveis reações que originaram o ciclo de Krebs.

com o objetivo de fixar o CO<sub>2</sub> para a síntese de moléculas mais complexas (Fuchs, 2011).

O passo evolutivo que permitiu fechar o ciclo (ou seja, unir o produto final do ramo redutor com o do ramo oxidativo) foi o aparecimento do complexo enzimático da alfa-cetoglutarato desidrogenase (Weitzman, 1985). Assim, o autor sugere que a mudança evolutiva no ramo redutor para uma sequência oxidativa relacionou-se diretamente com o aumento do oxigênio atmosférico. Portanto, embora o ciclo não utilize diretamente o oxigênio molecular, ele depende deste para a reoxidação das coenzimas, realizada por um sistema de transporte de elétrons associado à membrana.

### Aplicações no ensino e impacto na aprendizagem

O presente texto busca entrelaçar uma série temporal de ideias que envolvem conceitos fundamentais tanto para a química como para a biologia, à luz da seleção natural. Destaca, por exemplo, as diferentes fontes de energia para a atividade biológica, os processos de oxidação e redução, a evolução dos seres vivos em meio à diversidade de condições ambientais.

A figura 1 destaca os principais desafios ambientais que permitiram a organização e o desenvolvimento do metabolismo celular, desde os seres procariontes até os organismos mais complexos. Essa figura pode ser explorada pelo menos de duas formas: i) propor aos estudantes que a converta em uma tabela com três colunas – tempo (em bilhões de anos), condições ambientais e estratégias metabólicas (associadas aos tipos de microrganismos); ii) cada linha traz uma oportunidade para ilustrar o mecanismo da seleção natural, permitindo comparar a evolução no tempo – por

**O presente texto busca entrelaçar uma série temporal de ideias que envolvem conceitos fundamentais tanto para a química como para a biologia, à luz da seleção natural. Destaca, por exemplo, as diferentes fontes de energia para a atividade biológica, os processos de oxidação e redução, a evolução dos seres vivos em meio à diversidade de condições ambientais.**

exemplo, em 2,5 bilhão de anos, quais condições ambientais abriram caminho para o despontar do metabolismo aeróbio. Nesse aspecto, é necessário destacar que o aparecimento dos seres aeróbios não significou a eliminação completa dos seres anaeróbios; ainda hoje, coexistem organismos dos dois tipos, assim como encontramos vias metabólicas aeróbias e anaeróbias em nosso próprio organismo.

Ao utilizar exemplos de vias metabólicas fundamentais, com a glicólise e o ciclo de Krebs, permite aos professores de química e de biologia explorar conceitos bioquímicos centrais, como utilização diferencial de substratos e produtos, atividade enzimática, classificação de micro-organismos do ponto de vista da fonte de energia utilizada, etc. No caso da figura 2, os dois ramos podem ser utilizados para discutir conceitos de oxidação e de redução. Em todos os exemplos destacados, é possível localizar os fenômenos temporalmente e discutir seu significado evolutivo, aumentando as chances de uma aprendizagem mais duradoura.

Por outro lado, do ponto de vista tanto do ensino quanto da aprendizagem, é preciso redobrar a atenção com processos altamente abstratos, como é o caso da seleção natural, pois envolvem frequentemente uma série de conceitos equivocados, tanto por parte dos estudantes (Nehm e Reilly, 2007) quanto dos professores (Petrosino et al., 2015). Por exemplo, é comum considerar como corretas as seguintes ideias: i) as adaptações são produto do acaso; ii) a seleção natural visa à produção de seres “ótimos” ou “perfeitos”; iii) o mais forte sobrevive (Understanding, 2012).

Sugere-se, para efeito motivacional, que a discussão do texto seja antecedida pela apresentação de uma situação problema que chame a atenção dos estudantes. Por exemplo, um problema que destaque aspectos do Grande Evento Oxidativo e que termine com uma provocação: como uma via aeróbia complexa como o ciclo de Krebs surgiu em um ambiente dominado por bactérias primitivas e em uma atmosfera praticamente sem oxigênio? Ao final, podem ser propostas algumas questões para discussão em grupos; por exemplo, que abordem a interpretação comparativa das informações contidas na figura 1, as consequências de uma atmosfera redutora (primitiva) versus oxidativa (atual), as adaptações responsáveis pelo sucesso dos seres aeróbios (do ponto de vista do aumento da complexidade celular e tecidual, e do maior saldo de ATP para o organismo).

### Considerações finais

Do ponto de vista da aprendizagem, é importante que os estudantes tenham a noção de que os seres vivos de hoje

e os processos bioquímicos que os mantêm funcionais não apareceram do dia para a noite. O presente artigo demonstra o fato notável de que, nos dois bilhões de anos seguintes ao surgimento da vida, a Terra tenha sido habitada unicamente por seres procariontes, bactérias primitivas atualmente classificadas no Domínio Archaea<sup>3</sup>. Em seu conjunto, as informações apresentadas sugerem fortemente que devemos àquelas minúsculas entidades não só a gênese do ciclo de Krebs e da respiração aeróbia, mas também a criação e o aprimoramento dos processos bioquímicos fundamentais à

manutenção da vida: a fermentação, a fotossíntese e a fixação de nitrogênio. Além disso, as bactérias mantêm o equilíbrio planetário ao participar dos ciclos de compostos orgânicos (por meio da decomposição, por exemplo) e de substâncias inorgânicas (água, nitrogênio etc.).

A vida é um processo dinâmico, cuja existência depende das condições ambientais (e, portanto, atmosféricas), as quais são continuamente modificadas pelos processos bioquímicos que sustentam os seres vivos. Estes, por sua vez, podem sofrer modificações que levam a uma seleção dos indivíduos

mais adaptados, que são mantidos na população. Tem-se, dessa forma, um ciclo interativo, orientado pela seleção natural, que mantém a homeostase e a diversidade na biosfera.

### Notas

<sup>1</sup> Este tipo de respiração ocorre quando um substrato, reduzido por fermentação, transfere seus elétrons para um aceptor final diferente do oxigênio (no caso, para o CO<sub>2</sub>).

<sup>2</sup> Fotofosforilação é o processo de síntese de ATP a partir da energia luminosa. Pode ser cíclica ou acíclica. Na fotofosforilação cíclica, a transferência de elétrons envolve um ciclo de transportadores de elétrons, sem distinção de um aceptor final de elétrons. No processo acíclico, o transporte de elétrons é linear, com um aceptor final específico, o NADP<sup>+</sup>.

<sup>3</sup> Existem dois outros Domínios: o Bacteria, que compreende também procariontes (por exemplo, *E. coli*, *S. mutants* etc.), mas com características diferentes, e o Domínio Eucaria, que inclui todos os seres eucariontes (protistas, fungos, animais, plantas etc.).

**Eduardo Galembeck** (eg@unicamp.br), bacharel em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), mestre e doutor em Bioquímica pela Universidade Estadual de Campinas, é docente do Instituto de Biologia da UNICAMP. Campinas, SP - BR. **Caetano da Costa** (caedacosta@yahoo.com.br), bacharel em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), mestre em Bioquímica e doutor em Psicologia pela Universidade de São Paulo (USP), é pós-doutorando em Ensino de Bioquímica na UNICAMP. Campinas, SP - BR.

## Referências

AUDESIRK, T.; AUDESIRK, G. e BYERS, B.E. *Biology: life on Earth*. 9<sup>th</sup> ed. San Francisco, CA: Pearson Benjamin Cummings, 2011.

BALDWIN, J.E. e KREBS, H. The evolution of metabolic cycles. *Nature*, v. 291, n. 5814, p. 381-382, 1981.

BARBOSA, H.R. e TORRES, B.B. *Microbiologia básica*. São Paulo: Atheneu, 2005.

FUCHS, G. Alternative pathways of carbon dioxide fixation: insights into the early evolution of life? *Annual Review of Microbiology*, v. 65, p. 631-658, 2011.

JACOB, F. Evolution and tinkering. *Science*, v. 196, n. 4295, p. 1161-1166, 1977. Disponível em: [http://www.gvsu.edu/cms3/assets/6D2549F6-ED41-142A-2D7251DEDEE796B4/Evolution and tinkering.pdf](http://www.gvsu.edu/cms3/assets/6D2549F6-ED41-142A-2D7251DEDEE796B4/Evolution%20and%20tinkering.pdf). Acessado em 03 set. 2015.

JARDIM, W.F. A evolução da atmosfera terrestre. *Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola*, Edição especial, p. 5-8, 2001.

LYONS, T.W.; REINHARD, C.T. e PLANAVSKY, N.J. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere. *Nature*, v. 506, n. 7488, p. 307-315, 2014.

MADIGAN, M.T.; MARTINKO, J.M.; DUNLAP, P.V. e CLARK, D.P. *Brock Biology of Microorganisms*. 12<sup>th</sup> ed. San Francisco, CA: Pearson Benjamin Cummings, 2009.

MARGULIS, L. e SAGAN, D. *Microcosmos – quatro bilhões de anos de evolução de nossos ancestrais microbianos*. Trad. Mirtes Frange de Oliveira Pinheiro. São Paulo: Cultrix, 2011.

MARTIN, W. e RUSSELL, M.J. On the origins of cells: a hypothesis for the evolutionary transitions from abiotic geochemistry to chemoautotrophic prokaryotes, and from prokaryotes to nucleated cells. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, v. 358, n. 1429, p. 59-85, 2003.

MAYR, E. *Biologia, ciência única*. Trad. Marcelo Leite. São Paulo: Companhia das Letras, 2005.

MEYER, D. e EL-HANI, C.N. *Evolução: o sentido da biologia*. São Paulo: Editora UNESP, 2005.

MURTA, M.M. e LOPES, F.A. Química pré-biótica: sobre a origem das moléculas orgânicas na Terra. *Química Nova na Escola*, n. 22, p. 26-30, 2005.

NEHM, R.H. e REILLY, L. Biology majors' knowledge and misconceptions of natural selection. *BioScience*, v. 57, n. 3, p. 263-272, 2007. Disponível em: <http://bioscience.oxfordjournals.org/content/57/3/263.full.pdf+html>. Acessado em 31 ago. 2015.

PETROSINO, A.J.; LUCERO, M.M. e MANN, M.J. De-

centralized thinking and understanding of evolution in K-12 evolution education. *Evolution: Education and Outreach*, v. 8, n. 1, artigo 2, 2015. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1186%2Fs12052-014-0028-x#page-1>. Acessado em 31 ago. 2015.

RAVEN, P.H.; JOHNSON, G.B.; MASON, K.A.; LOSOS, J.B. e SINGER, S.R. *Biology*. 9<sup>th</sup> ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2011.

UNDERSTANDING evolution. II. Misconceptions about natural selection and adaptation, 2012. Disponível em: [http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/misconceptions\\_about\\_evolution.pdf](http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/misconceptions_about_evolution.pdf). Acessado em 31 ago. 2015.

WEITZMAN, P.D.J. Evolution in the citric acid cycle. In: SCHLEIFER, K.H. e STACKEBRANDT, E. (Eds.). *Evolution of Prokaryotes*. London: Academic Press, 1985, p. 253-275.

## Para saber mais

A fim de aprofundar o conhecimento a respeito dos aspectos químicos e biológicos envolvidos na evolução dos seres vivos, frente às múltiplas adversidades ambientais, sugere-se a leitura dos materiais a seguir. Além disso, para uma visão mais abrangente das implicações da evolução para a compreensão da vida e do mundo, vale a pena explorar o site indicado nas referências (Understanding, 2012) para além do item II – os demais itens abordam conceitos equivocados (*misconceptions*) sobre evolução dos pontos de vista teórico, filogenético, populacional, científico, ético, religioso e pedagógico.

BILGEN, T. Metabolic evolution and the origin of life. In: STOREY, K.B. (Ed.). *Functional metabolism: regulation and adaptation*. New York: Wiley-Liss, 2004, p. 557-582.

DOBZHANSKY, T. Nothing in biology makes sense except in light of evolution. *The American Biology Teacher*, v. 35, n. 3, p. 125-129, 1973. Disponível em: <http://biologie-lernprogramme.de/daten/programme/js/homologer/daten/lit/Dobzhansky.pdf>. Acessado em 03 set. 2015.

MELÉNDEZ-HEVIA, E.; WADDELL, T.G. e CASCANTE, M. The puzzle of the Krebs citric acid cycle: assembling the pieces of chemically feasible reactions, and opportunism in the design of metabolic pathways during evolution. *Journal of Molecular Evolution*, v. 43, n. 3, p. 293-303, 1996. Disponível em: <http://courses.chem.indiana.edu/c582/documents/Krebs-cycle.pdf>. Acessado em 03 set. 2015.

PERETÓ, J. Out of fuzzy chemistry: from prebiotic chemistry to metabolic networks. *Chemical Society Reviews*, v. 41, n. 16, p. 5394-5403, 2012.

**Abstract:** *Evolution of the Earth atmosphere composition and of the life forms on the planet.* During past 3.5 billion years of the planet history, the atmosphere's evolution paralleled the evolving of life. Early Earth chemical composition was essential for life emergence. Primitive unicellular organisms were capable of altering the environment, converting plentiful substances into different ones, used by novel life forms. Such modifications allowed natural selection to operate and to contribute for life diversification. Thus, successively, a wide range of microorganisms evolved and altered the composition of the Earth's atmosphere. This text is aimed at provide support for chemistry and biology teachers in order to establish a dialogue between these disciplines. Such interaction involves issues from Earth's history as such prebiotic chemistry, energy sources for biological activities, oxidation and reductive reactions, cellular organization and metabolism, diversity and evolution of life beings.

**Keywords:** early atmosphere, metabolic diversity, evolution.