

Genética na escola

Volume 16 • Nº 2 • Sup • 2021



- Conceitos em Evolução
- Evolução e Sociedade
- Investigações em Ensino de Evolução
- Na Sala de Aula
- Materiais Didáticos
- Resenhas

Índice

Conceitos em Evolução

Evolução como processo emergente:
desafiando o senso comum para remover obstáculos cognitivos334

Leandro Rabello Monteiro

Como a teoria evolutiva na atualidade pretende explicar a origem
da inovação das características vivas?344

Beatriz Ceschim, Matheus Ganiko-Dutra, Ana Maria de Andrade Caldeira

Evolução e Sociedade

Domesticação de plantas: um processo co-evolutivo.....356

*Leila do Nascimento Vieira, Hugo Pacheco de Freitas Fraga, Giulia Melilli Serbin, Raquel Santos da Silva,
Clarissa Alves Stefanello, Charles Roland Clement*

Evolução em ação: lições de uma pandemia368

Rhewter Nunes, José Alexandre Felizola Diniz Filho, Mariana Pires de Campos Telles

Negacionismo, criacionismo e o ensino de evolução380

Leonardo Augusto Luvison Araújo, Cláudio Ricardo Martins dos Reis, Ronaldo Antonio Paes

O pensamento evolutivo antes de Darwin388

Ricardo Campos-da-Paz, Mário de Pinna

Investigações em Ensino de Evolução

Seminário em formato *live*:
uma abordagem alternativa no ensino-aprendizagem de evolução biológica420

Jéssica Prado Silva, Roberto Meira Pires Rocha, Luciana Aguilar-Aleixo

Panorama das pesquisas em ensino de evolução biológica publicadas
na revista Genética na Escola no período de 2006 a 2020.....430

Luciana Aguilar-Aleixo, Fagner Teles Almeida Leite

Ensino de evolução: o que dizem as pesquisas?440

Nelio Bizzo, Leonardo Augusto Luvison Araújo

Na Sala de Aula

Pandemia da COVID-19: a evolução sob nossos olhos450

Luís Bizzo

Materiais Didáticos

Alelotório: um simulador virtual didático para o ensino de deriva genética458

Ediko Dominike Cruz Pessoa, Maíra de Paiva Leite, Janaina Lima de Oliveira

Evolução Humana através da gamificação466

Marília Carina Baltazar, Mariana Freitas Nery

Que direção seguir? Melhor nenhuma! Explorando o problema da teleologia e da
hierarquia evolutiva no Ensino de Evolução com o uso de materiais didáticos digitais474

*Alessandra da Conceição Zanin, Marina Corrêa Scalon, Paula Carolina Ferreira, Allana K. P. da Silva, Felipe Aguiar Martin,
Guilherme Rosa, Iago Gabriel da Silva, Isabela Santos Kropiweic, Laura Laino da Costa, Luddy Searom Carias de Moraes,
Nickolas Spinelli Klein, Pollyana de Brito, Yasmin Cristina Ribeiro da Silva, Fabricius M. C. B. Domingos*

Resenhas

Ensino de Biologia: uma perspectiva evolutiva –
a evolução como eixo integrador na educação básica.....488

Leonardo Augusto Luvison Araújo

Infinitas formas de grande beleza:
como a evolução forjou a grande quantidade de criaturas que habitam nosso planeta.....490

Nicolle Souza Leto, Janaina Lima de Oliveira

Genética na escola



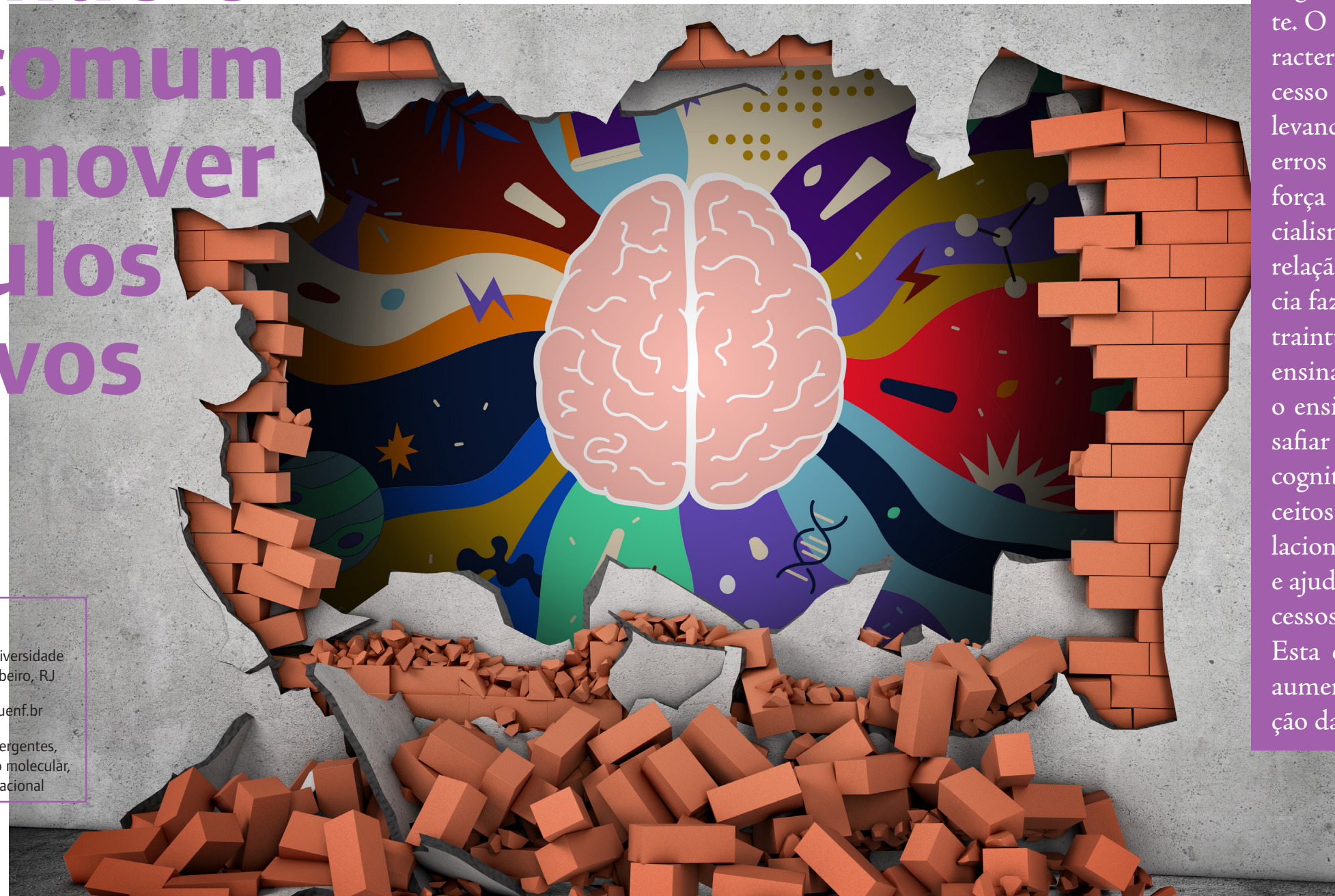
Evolução como processo emergente: desafiando o senso comum para remover obstáculos cognitivos

Leandro Rabello Monteiro

Laboratório de Ciências Ambientais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, RJ

Autor para correspondência - lrmont@uenf.br

Palavras-chave: esquemas causais emergentes, deriva genética, seleção natural, relógio molecular, problemas conceituais, raciocínio populacional



Os processos evolutivos, como deriva genética e seleção natural, emergem como modificações nas frequências gênicas em populações e espécies, a partir da interação entre organismos individuais e o ambiente. O senso comum, no entanto, caracteriza a evolução como um processo sequencial com causas diretas, levando a dificuldades cognitivas e erros conceituais comuns, pois reforça ideias intuitivas como essencialismo e propósito evolutivo em relação às espécies. Esta discrepância faz com que a evolução seja contraintuitiva e um tema difícil de ser ensinado e ser aprendido. Durante o ensino de evolução, é preciso desafiar o senso comum e as barreiras cognitivas, reforçar linguagem e conceitos corretos, um raciocínio populacional baseado em probabilidade, e ajudar os alunos a reconhecer processos evolutivos como emergentes. Esta estratégia tem potencial para aumentar a compreensão e a aceitação da evolução biológica.

“O senso comum é um guia muito fraco para o insight científico, já que quase sempre se trata de um preconceito cultural, e não da honesta inocência do garoto diante do rei despido.”

Stephen J. Gould (2005) *Darwin e os grandes enigmas da vida*. Martins Fontes, São Paulo.

A evolução das espécies é um fato histórico corroborado por mais de 150 anos de observações científicas diretas e indiretas. A noção de que as espécies se modificam ao longo do tempo e compartilham um ancestral comum é tão bem estabelecida que sua realidade histórica não foi questionada nem por críticos dos mecanismos propostos por Darwin para explicar a origem e a diversidade das espécies. A teoria da evolução, por sua vez, é um conjunto de hipóteses e explicações amplamente testadas, postulando que a diversidade de formas biológicas atuais resulta da modificação das espécies ao longo de bilhões de anos sob os efeitos da seleção natural e da deriva genética. Apesar da solidez científica da evolução como fato e teoria científica, ainda há uma certa resistência por parte do grande público em aceitar tal realidade.

As razões para a dificuldade em aceitar a evolução são múltiplas. Existem, por um lado, resistências culturais e religiosas, particularmente em relação à evolução humana. Por outro lado, existem obstáculos cognitivos que, associados a estratégias inadequadas no ensino sobre evolução, podem gerar equívocos conceituais e dificultar a compreensão e aceitação da evolução. Parte do problema envolve a falta de familiaridade com matemática, particularmente probabilidade e estatística, essenciais para desenvolver um “raciocínio populacional”, que consiste em entender espécies como grupos de indivíduos únicos, diferentes entre si, o que contrasta com uma tendência natural do cérebro humano de desconsiderar as diferenças entre indivíduos pertencentes a uma espécie (variabilidade), projetando as propriedades da espécie de modo homogêneo para todos os indivíduos (essencialismo).

Outra tendência é atribuir intenção e finalidade aos processos evolutivos em relação às populações e às espécies (teleologia), como se existisse uma mão invisível direcionando a evolução. Além disso, as experiências diárias dos estudantes na relação com o ambiente em que vivem ajudam a construir uma estrutura de raciocínio baseada em causas diretas e seus efeitos. Por exemplo, um giro do pedal desencadeia uma sequência de eventos (movimento da correia, das engrenagens e da roda) causando um movimento da bicicleta para a frente. A contração dos músculos do coração causa o fluxo de sangue pelos vasos. O raciocínio de causas diretas facilita o aprendizado de processos que envolvem uma sequência de eventos e um objetivo final, como divisão celular e fotossíntese, chamados processos diretos ou sequenciais. Por outro lado, dificulta a assimilação e compreensão de fenômenos naturais regidos por causas indiretas que emergem da soma de interações entre elementos de um sistema, como é o caso da difusão molecular e da evolução, chamados processos emergentes. Nesses casos, as interações entre as partes são regidas por regras de probabilidade relativas ao campo microscópico (e.g. colisões entre moléculas em solução), que fazem emergir um padrão direcional em um nível macroscópico (fluxo observado a olho nu), mas sem que haja uma força direcionando as moléculas de um lado para outro.

O propósito desta contribuição é examinar como a compreensão da evolução depende do raciocínio populacional e dos processos emergentes, revisando propostas da literatura sobre como enfatizá-los para fugir do senso comum e remover obstáculos cognitivos quando do ensino de biologia evolutiva.

O senso comum e a contra intuitividade da biologia evolutiva

Como professor de Biologia Evolutiva para um curso de graduação em Ciências Biológicas, eu costumo, durante as primeiras aulas, coletar alguns conceitos trazidos pelos alunos de sua formação prévia como, por exemplo, evolução, adaptação e seleção natural. É comum observar que os conceitos trazidos pelos alunos do ensino médio envolvem equívocos que decorrem da aplicação de um raciocínio essencialista e teleológico derivado do senso comum. O que chamamos de senso comum é um conhecimento prático derivado de tendências cognitivas observadas desde a infância que procuram organizar o mundo de acordo com uma “intuição natural”. Essas tendências resultam da evolução do nosso cérebro e favorecem a compreensão de fenômenos em pequena escala de tempo e espaço, que possuem causas diretas. No entanto, essas mesmas tendências dificultam a compreensão de fenômenos de massa, envolvendo grandes tamanhos populacionais, grandes períodos de tempo ou dimensões espaciais, que emergem em escalas maiores a partir de interações das unidades (indivíduos) em escalas menores, com resultados inesperados que parecem contraintuitivos.

O essencialismo, por exemplo, é a ideia psicologicamente enraizada de que as propriedades de um organismo individual são fruto do seu tipo ou sua ancestralidade, e que as diferenças entre indivíduos são irrelevantes. Cachorros são criaturas multicelulares e têm quatro patas, diz o senso comum. No entanto, existe algo que poderíamos considerar um tipo de cachorro, mas que é um parasita unicelular chamado tumor venéreo transmissível canino (TVTC), que se originou como células tumorais em um cão há milhares de anos e vem contagiando outros cachorros e se perpetuando desde então. Para todos os efeitos, o TVTC é descendente de um cachorro, mas não manteve algumas das propriedades

mais evidentes que esperamos na forma corporal canina. O senso comum sozinho não nos permite desafiar essa noção essencialista do que esperamos de uma determinada espécie. A teleologia, por sua vez, elabora explicações sobre processos naturais ou características dos organismos com referência às suas funções como fins em si mesmas.

A ideia de que coisas têm um propósito é particularmente comum em crianças, já que realmente grande parte dos objetos encontrados em seu mundo têm um propósito ou função específica. Propósito é um termo que pode ser usado como sinônimo de função em explicações adaptativas – a coloração de certos animais tem o propósito de escondê-los de seus predadores. A associação entre função e adaptação não é um problema em si, a não ser que reflita uma convicção adaptacionista de que a função atualmente exercida basta como explicação para a evolução de uma característica. Por outro lado, quando o propósito é atribuído a uma força interna ou externa direcionadora do processo evolutivo, temos um problema conceitual sério. Por não serem desafiadas durante o curso do aprendizado sobre o mundo natural, essas tendências cognitivas geram concepções equivocadas como a direcionalidade da evolução, o progresso das espécies e a dificuldade em entender o papel da aleatoriedade no processo evolutivo.

É comum observar estudantes, mesmo em nível universitário, escreverem sobre como indivíduos evoluem ou se adaptam. Esse vazamento dos processos evolutivos entre níveis de organização (genes, indivíduos, populações) pode ser atribuído à nossa predisposição, talvez inata, de explicar o mundo a partir de causas e efeitos diretamente observáveis. Processos como evolução, seleção natural e especiação não têm causas diretas, mas emergem a partir do somatório das ações de muitos elementos (interações entre indivíduos) em um nível de organização inferior ao que se observa o fenômeno. É mais fácil ensinar e corrigir equívocos conceituais sobre processos de causalidade direta, como a circulação do sangue ou fotossíntese, do que corrigir equívocos sobre processos com



causas emergentes, como difusão de solutos e evolução biológica. Equívocos que surgem pela aplicação de esquemas causais incorretos durante o aprendizado são robustos e necessitam de um maior esforço para serem suplantados.

Processos sequenciais, emergentes, e equívocos conceituais

Um processo corresponde a uma série de ações ou operações que levam a um resultado como um jogo de futebol, a circulação de sangue pelo corpo ou a formação de uma nova espécie. A circulação sanguínea e a difusão de moléculas em fluidos são processos que ilustram, respectivamente, exemplos contrastantes de ação direta e emergente. A circulação de sangue pelo corpo envolve o bombeamento do fluido pelo coração em direção a diferentes partes, com uma relação direta de causa e efeito. Os batimentos do coração empurram as moléculas que compõem o sangue em direção aos pulmões ou a outras partes do corpo. Assim, é fácil inferir que existe uma relação causal direta e uma força fazendo com que o sangue circule, além de componentes como válvulas, músculos e vasos, cada um com um papel claro e influência direta na sequência de eventos. Equívocos conceituais como, por exemplo, a ideia de que a circulação aconteça em um circuito único (do coração para o resto do corpo) em vez do circuito duplo (coração-pulmão-corção-corpo), são facilmente corrigidos até no autoaprendizado com a leitura de livros-texto.

A difusão de moléculas em um fluido, por outro lado, não apresenta essa relação clara de causa e efeito em que um agente está movendo as moléculas em uma direção. Vamos imaginar dois recipientes, um com líquido transparente e outro com um líquido com

corante azul. Em um determinado momento, conectamos os recipientes por um tubo e temos a impressão de que o corante azul está fluindo para o recipiente com líquido claro. Mais adiante, a coloração dos líquidos nos dois recipientes ficará homogênea e temos a impressão de que o fluxo foi interrompido. Essa descrição do padrão macroscópico pode dar a impressão de que existe alguma força movendo as moléculas do corante em direção ao recipiente com líquido transparente. No entanto, observado molecularmente, o fenômeno da difusão decorre de movimentos aleatórios das moléculas e de suas interações (choques). Seguindo regras simples de probabilidade, as moléculas de um determinado soluto eventualmente se espalham da região de maior concentração (onde seu número é maior) para a região de menor concentração.

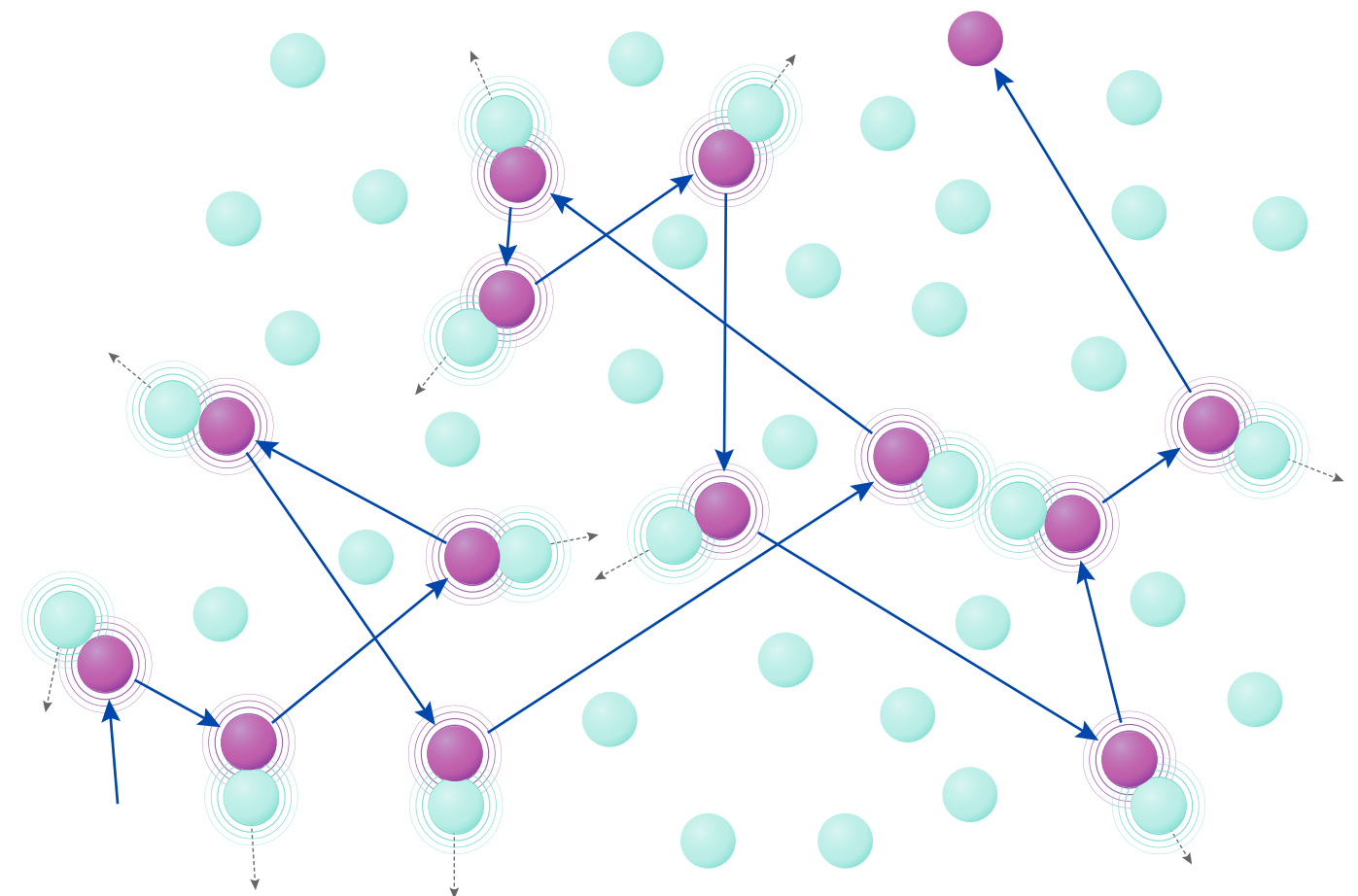
O mesmo processo acontecerá com as moléculas no líquido transparente, mas não será perceptível em escala macroscópica. Não existe uma força empurrando as moléculas de soluto em direção à área de menor concentração. Não é raro observar o equívoco conceitual de atribuir às moléculas uma tendência de se mover da região de maior para a menor concentração. No entanto, se acompanharmos o movimento de uma única molécula, veremos que não há tendência em se deslocar em uma direção específica. É o que chamamos de *caminhada aleatória*. Diferente do padrão de circulação do sangue causado pelo bombeamento do coração, o padrão aparente de fluxo entre recipientes tem uma relação de causalidade indireta com os componentes do sistema (moléculas). O padrão emerge em maior escala (macroscópica) a partir da soma das interações dos componentes em menor escala (molecular). Posso aumentar a temperatura da solução e acelerar o movimento das moléculas, aumentando o fluxo, mas o calor não direciona as moléculas de corante em direção ao outro recipiente. O efeito é indireto, mediado pelo aumento das interações (choques) entre moléculas. Por ser um processo emergente, equívocos conceituais relativos à difusão são mais robustos que os relativos aos processos sequenciais.

Evolução como processo emergente

O movimento aleatório das moléculas em um fluido, chamado *movimento Browniano*, é utilizado como analogia e modelo matemático simples para inúmeros fenômenos naturais, inclusive a evolução neutra, quando diferentes formas de um gene (alelos) não aumentam nem diminuem a sobrevivência e a reprodução de quem as possui. Assim, podemos esperar que flutuações nas quantidades relativas (frequências) de alelos neutros em populações isoladas produzam um aumento das diferenças genéticas entre populações ao longo do tempo (Figura 1A), processo conhecido como deriva genética. Nesse processo, o padrão macroscópico é a modificação das frequências dos alelos ao longo do tempo, levando à divergência entre populações isoladas. Os componentes do sistema são cópias dos genes nos gametas produzidos pelos indivíduos de cada população. Esses indivi-

duos e gametas interagem, combinando-se aleatoriamente para produzir uma nova geração. Como o número de indivíduos é finito, a amostragem aleatória de gametas deve produzir uma geração em que o número de cópias de um gene é ligeiramente diferente da anterior. A diferença será tanto maior quanto menor for o tamanho da população.

Ao longo de muitas gerações, é esperado que a reprodução aleatória em populações pequenas cause uma flutuação (deriva) nas frequências dos genes e que populações reprodutivamente isoladas por barreiras impedidas do fluxo de gametas fiquem cada vez mais diferentes geneticamente. Assim como não é possível atribuir a movimentação das moléculas de corante em direção à região de menor concentração a uma tendência, não é possível atribuir a divergência entre as populações, na Figura 1A, a uma “força” com ação direta ou tendência inerente das populações a divergir indefinidamente. A divergência genética neutra emerge como consequência natural da reprodução aleatória em populações finitas.



O acúmulo de mutações neutras ao longo de muitas gerações amplifica a escala, mas segue o mesmo processo. Quando uma nova mutação surge em uma população, é uma única cópia de um gene entre milhares de outras. Vamos considerar que o alelo mutante seja um em um milhão de cópias do gene considerado normal espalhadas pela população. Se é

uma mutação neutra, a mutação não aumenta nem diminui a sobrevivência do portador. É possível prever que a chance dessa mutação ser fixada (chegar a 100% de frequência) na população é um em um milhão (0,000001). É uma probabilidade muito pequena, então podemos dizer que, provavelmente, a mutação desaparecerá da população.

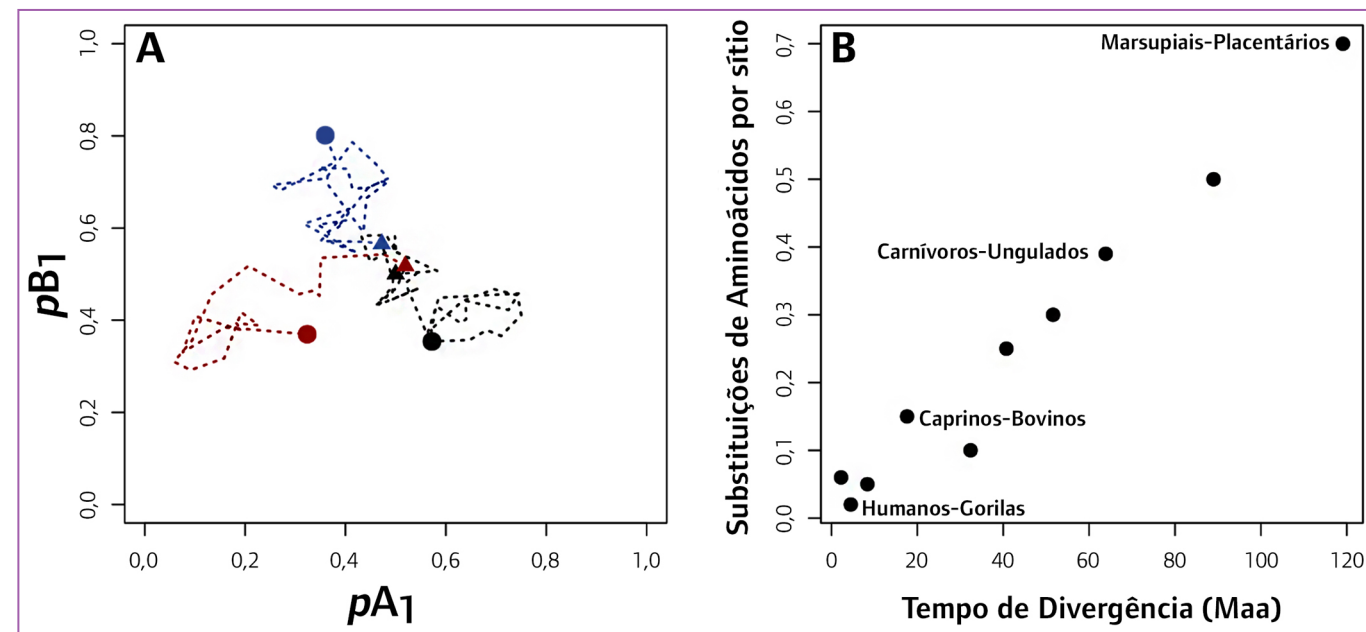


Figura 1.

A. Deriva genética e divergência de três populações no espaço das frequências de dois genes (A e B). Para simplificar, apenas a frequência (p) de um dos alelos é mostrada para cada gene. O processo é iniciado no ancestral comum (triângulo preto) e procede por $t = 40$ gerações, com as populações representadas em azul e vermelho separando-se em $t = 10$ e $t = 20$, e permanecendo isoladas da preta na posição dos triângulos das respectivas cores. **B.** Divergência genética entre grupos de mamíferos medida pela substituição de aminoácidos por sítio em sequências de hemoglobina α , β , citocromo c e fibrinopeptídeo A, em relação ao tempo geológico de separação medido pelo registro fóssilífero. Modificado de GRAUR (2000).

Por outro lado, podemos considerar que os genomas de todos os indivíduos podem apresentar várias mutações neutras em uma determinada geração (cada base do DNA é um sítio de mutação potencial). Como as mutações aleatórias são eventos independentes entre si, se queremos saber se alguma mutação ficará fixada para a posteridade, podemos somar as probabilidades de todas as mutações ao longo de um número de gerações (mutação 1, ou mutação 2, ou mutação 3, e assim por diante). Esse somatório de probabilidades deve, eventualmente, chegar ao valor um, após um certo número de gerações. Esse acúmulo de mutações fixadas em diferentes populações isoladas resulta da deriva genética e leva a uma divergência genética previsível de acordo com o tempo de isolamento, o chamado *relógio molecular* (Figura 1B). Esse resultado é muito importante

pois permite estimar intervalos temporais para eventos de especiação, mesmo quando o registro fóssilífero não é conhecido.

A seleção natural adiciona mais componentes ao processo, pois existe a possibilidade de as mutações favorecerem ou prejudicarem a sobrevivência ou reprodução dos portadores. Nesse caso, o processo incorpora além da taxa de acúmulo de mutações, uma probabilidade de sobrevivência e reprodução (o valor adaptativo ou aptidão). Por exemplo, se a mutação favorece a sobrevivência, a probabilidade de os portadores chegarem à fase adulta e se reproduzirem deve ser maior que a probabilidade de sobrevivência média dos demais genótipos. Tal evento aumenta o número de cópias mutantes entre os adultos da população a cada geração. Em populações grandes, o mutante benéfico tende a

ser fixado na população. Por outro lado, se a mutação prejudica a sobrevivência, os alelos mutantes tendem a ser removidos da população. Dependendo dos valores do coeficiente de seleção (o complemento 1- valor adaptativo) e da taxa de mutação, é possível haver um equilíbrio entre mutações e seleção, mantendo os alelos mutantes em frequências baixas.

As probabilidades de sobrevivência ou valores adaptativos são determinadas pelos desafios que os indivíduos encontram, regularmente, para se alimentar, se proteger de predadores e das intempéries, os quais chamamos agentes de seleção. Essas probabilidades podem variar ao longo do tempo, entre regiões, ambientes, e até mesmo de acordo com a abundância do genótipo (seleção dependente de frequência). A seleção natural e a adaptação emergem a partir dessas interações entre indivíduos e agentes de seleção, e por causa da volatilidade dos valores adaptativos, não faz sentido imaginar qualquer tendência direcional de longo prazo da seleção ou que o processo tenha uma finalidade. Tendências observadas ao longo do tempo geológico, como aumento da complexidade dos organismos e a aparência de ordem no mundo natural são consequências inevitáveis das interações entre genes, células e indivíduos, sem que haja a necessidade de um controle central ou finalidade inerente ao processo evolutivo em relação às populações e espécies.

Assim como em outros processos emergentes, acompanhar o destino de um único componente do sistema (gene, indivíduo) é raramente informativo. Por exemplo, um animal pode ser portador de uma mutação que o torna muito eficiente para sobreviver no seu ambiente natural, evitando ataques de predadores. No entanto, existe uma chance de que venha morrer por motivos alheios à sua aptidão, como sofrer uma descarga de um raio, o que não muda o fato de que outras cópias do gene favorecido em outros indivíduos terão maior chance de sobreviver e se reproduzir que os indivíduos que não as possuem. Este exemplo também ilustra a possibilidade de que uma ou poucas cópias de uma mutação benéfica possam desaparecer por acaso, o que será sentido com mais efeito em popula-

ções pequenas. Neste caso, a deriva genética pode anular o efeito da seleção. O raciocínio populacional evita as armadilhas que encontramos ao focar no comportamento ou destino de indivíduos isoladamente.

Recomendações para o ensino de evolução

Nosso cérebro evoluiu para sobreviver em um domínio que Richard Dawkins chamou de *mundo do meio*. Esse domínio corresponde a um pequeno intervalo de percepção em escalas de tempo (segundos a anos), espaço (décimo de milímetro até alguns quilômetros), espectro luminoso e sonoro. A ciência expande essa percepção, mas exige ferramentas cognitivas para sua compreensão que não evoluíram nesse contexto. Por isso, o grande biólogo evolutivo J. B. S. Haldane disse que o mundo natural não é apenas mais estranho do que imaginamos. É mais estranho do que somos capazes de imaginar. Podemos entender o funcionamento de uma bicicleta olhando para suas partes e como causam diretamente efeitos umas sobre as outras. Um giro do pedal deve efetuar um movimento na roda pela ação da corrente. Processos sequenciais, ocorrendo em estágios, como a circulação do sangue, divisão celular ou fotossíntese são mais facilmente aprendidos por se encaixarem bem em esquemas causais diretos, que são cognitivamente favorecidos pelos nossos cérebros. Por outro lado, processos emergentes como evolução e seleção natural, e até mesmo pandemias e mudanças climáticas, exigem um raciocínio populacional e probabilístico para sua compreensão, encaixando-se em esquemas causais emergentes, que parecem contraintuitivos e exigem maior esforço de aprendizado. No ensino de evolução, professores devem dedicar algum tempo a explicar como estudantes podem discriminar processos sequenciais de emergentes a partir de características básicas do seu funcionamento e exemplos identificando os processos evolutivos claramente como emergentes e ativando o esquema cognitivo correto.



Os padrões evolutivos emergem do comportamento individual e das interações dos componentes do sistema, de acordo com regras de probabilidade. Nesse contexto, os agentes que podem causar modificações nos processos evolutivos não devem ser explicados como forças ou pressões seletivas. Infelizmente, a tendência de utilizar tal linguagem e explicar a seleção natural em termos de forças é pervasiva na literatura e entre professores de biologia evolutiva (eu próprio reconheço minha parcela de culpa). O próprio Darwin reconheceu no livro *“The Variation of Animals and Plants under Domestication”*, que o termo seleção natural era ruim pois parecia implicar uma ação consciente. Darwin acreditava que essa associação com uma força que causa modificação seria abandonada após o estudante adquirir alguma familiaridade com o conceito, o que, atualmente sabemos, foi uma posição otimista demais.

Ensinar o processo de seleção natural como atuação de uma força pode reforçar um equívoco comum, que é atribuir propósito

e finalidade ao processo evolutivo em relação às espécies. Nossas mentes teleológicas agarram-se a essas explicações como à própria vida, por se encaixarem bem no senso comum. O equívoco leva também a uma conceituação lamarckista, confundindo variação e necessidade, e inferindo incorretamente uma intenção de evoluir ou se adaptar. É importante que professores evitem utilizar termos como força de seleção ou pressão seletiva. O ideal é apresentar a seleção natural como uma consequência emergente das interações entre organismos, seu ambiente, e os processos aleatórios de mutação e recombinação. É preciso enfatizar que os agentes de seleção, como clima ou predadores, podem formar filtros, impedindo ou facilitando o acúmulo de determinadas variantes genéticas ao longo das gerações, mas não têm capacidade de direcionar ou pressionar para o surgimento de mutações favoráveis.

A dificuldade em compreender processos emergentes e evolução decorre parcialmente

de lacunas no ensino em todos os níveis, relativas à probabilidade e estatística. Afinal de contas, explicações evolutivas são inerentemente estatísticas. É comum observar entre estudantes, associações entre aleatoriedade e ineficiência em sistemas biológicos, assim como o equívoco conceitual de associar aleatoriedade à falta de padrões, regras ou previsibilidade. Em sistemas emergentes, o comportamento aleatório dos componentes em termos de organização (genes, células, organismos), gera padrões com aparência de um ordenamento superior (fenótipos, comportamento, populações). A aleatoriedade na reprodução e na interação dos indivíduos entre si e com o ambiente faz com que os processos evolutivos sigam regras de probabilidade, as quais permitem prever o comportamento do sistema em grandes escalas de tempo e populacionais, mas são incapazes de determinar com precisão o destino de indivíduos de uma determinada espécie.

Além da ênfase na numeracia, na alfabetização de dados, em probabilidade e estatística, a utilização de *software* para simulações de modelos baseados em agentes tem se mostrado útil para o ensino de evolução como processo emergente. Os agentes dos modelos são entidades computacionais com propriedades e comportamentos específicos que simulam os componentes de sistemas evolutivos, como animais, plantas e micro-organismos. Essas simulações permitem aos estudantes visualizar os agentes e modificar as regras simples de probabilidade dos modelos, gerando padrões macro em grandes escalas de tempo, como deriva genética, seleção natural, interações ecológicas e coevolução.

A interação dos estudantes com os modelos, modificando por exemplo, as taxas de mutação, a herdabilidade, os coeficientes de seleção ou os tamanhos populacionais, assim como as interações entre os agentes, permite uma compreensão robusta de conceitos evolutivos importantes. O projeto BEAGLE (*Biological Experiments in Adaptation, Genetics, Learning and Evolution*) (<http://ccl.northwestern.edu/rp/beagle/index.shtml>) coloca à disposição, gratuitamente, um grande leque de modelos que podem ser utilizados em atividades com estudantes de diferentes níveis.

É preciso desafiar o senso comum e fazer com que os estudantes estejam conscientes dos obstáculos cognitivos que precisam superar. A compreensão e a aceitação da evolução como fato e teoria depende de estratégias adequadas de ensino nos diferentes níveis, desde a formação de professores até a educação infantil. A tarefa e a responsabilidade dos professores de biologia são grandes, pois uma sociedade que não compreende princípios evolutivos básicos pode sofrer sérias consequências ao lidar com desafios emergentes, como pandemias, mudanças climáticas e cooperação econômica.

Agradecimentos

Agradeço aos meus alunos, em especial ao Lucas de O. Carneiro pela leitura crítica do texto. Sou também grato ao Dr. Diogo Meyer pelas sugestões construtivas e importantes para a qualidade da versão final.

Para saber mais

- CHI, M. T. H. Commonsense conceptions of emergent processes: why some misconceptions are robust. *Journal of the Learning Sciences*, v. 14, n. 3, p. 161-199, 2005.
- COOPER, R. A. Natural selection as an emergent process: instructional implications. *Journal of Biological Education*, v. 51 n. 3, p. 247-260, 2017.
- GRAUR, D.; LI, W. *Fundamentals of molecular evolution*. Sunderland: Sinauer, 2000.
- QUEDI, R. P.; DARROZ, L. M. Conceitos básicos de estatística: as lacunas conceituais de acadêmicos ingressantes no curso superior. *Revista Thema*, v. 15, n. 4, p. 1256-1268, 2018.
- ROSENGREN, K. S.; BREM, S. K.; EVANS, E. M.; SINATRA, G. M. (Eds.). *Evolution challenges: integrating research and practice in teaching and learning about evolution*. Oxford: Oxford University Press, 2012.
- THAGARD, P.; FINDLAY, S. Getting to Darwin: obstacles to accepting evolution by natural selection. *Science & Education*, v. 19, p. 625-636, 2010.
- WILENSKY, U.; NOWAK, M. Teaching and learning evolution as an emergent process: the BEAGLE project. In: TAYLOR, R. S.; FERRARI, M. (Eds.) *Epistemology and science education: understanding the evolution vs. intelligent design controversy*. New York: Taylor & Francis, 2011, p. 213-242.



Como a teoria evolutiva na atualidade pretende explicar a origem da inovação das características vivas?

Beatriz Ceschim¹, Matheus Ganiko-Dutra¹,
Ana Maria de Andrade Caldeira²

¹ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,
Programa de Pós-Graduação em Educação para Ciência, Bauri, SP

² Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,
Departamento de Educação, Bauri, SP

Autor para correspondência - beatriz.ceschim@unesp.br

Palavras-chave: síntese estendida da evolução, síntese moderna da evolução, ensino de evolução, teoria de construção do nicho, herança inclusiva, plasticidade fenotípica

Sabemos que teorias científicas sofrem mudanças ao longo do tempo. Com a teoria evolutiva não é diferente. Nos últimos anos, um conjunto de pesquisadores tem defendido que a evolução biológica precisa ser explicada por uma Síntese Estendida da Evolução, de modo que novos conhecimentos permitam ampliar a Síntese Moderna da Evolução, originada há mais de meio século. A necessidade da ampliação, também explorada em nosso texto, consiste em uma tentativa de abandonar visões genecêntricas, que atribuem toda explicação de características vivas para o DNA e, em um esforço para conectar fatores externos e internos do organismo, como ambiente-desenvolvimento, em explicações mais abrangentes. É objetivo do texto destacar fontes mais plurais de inovação das características dos seres vivos, indicando outras formas de hereditariedade que não sejam genéticas, algumas também não genealógicas e tratando de alguns elementos centrais para a discussão atual da Síntese Estendida, como a evo-devo e a eco-evo-devo.

Aparência, o funcionamento e o comportamento dos seres vivos impressionam e instigam os cientistas, dada a beleza, a diversidade e a complexidade que apresentam, sejam eles plantas, animais ou mesmo algas, protozoários, fungos e bactérias, pois a morfologia e a fisiologia, resultantes de uma história evolutiva longa, podem proporcionar meios que dão manutenção à vida e aos processos de reprodução, de modo a garantir a perpetuação das espécies ao longo do tempo.

A biologia não se basta com descrições sobre as estruturas e os processos que os seres vivos possuem. Como sabemos, a ciência da vida também investiga as origens históricas de cada parte constituinte de um organismo. Estamos falando, neste caso, da evolução biológica que investiga como os organismos modificam-se ao longo do tempo.

A evolução biológica explica semelhanças e diferenças dos seres vivos, explica por que novas formas surgiram e por que continuam a surgir, ou melhor, a evolução explica como isso acontece. Inicialmente, no período denominado como “Darwinismo”, Darwin e Wallace estabeleceram a seleção natural, a partir de 1859, mas ainda se admitia a herança de caracteres adquiridos, tal como proposto por Lamarck. No Neodarwinismo, a herança de caracteres adquiridos é rejeitada a partir de estudos de diferentes autores, como August Weismann, e posteriormente, a genética vai ganhando força, de modo que, após anos de discussões, é produzida uma lista de processos ou mecanismos, incluindo cinco fatores evolutivos: mutação, recombinação, seleção natural, isolamento e deriva genética. Fica então estabelecida a Síntese Moderna da Evolução (Ver Figura 1).

Desse modo, podemos dizer que também a teoria evolutiva pode evoluir, assim como qualquer teoria científica. Se considerarmos que a teoria da evolução esteve em um dado momento representada por Jean Lamarck e a teoria do uso e desuso, juntamente com a herança dos caracteres adquiridos, podemos considerar que a teoria evoluiu no sentido de que modificou-se quando passou a rejeitar essa forma de herança e passou a admitir somente as variações genéticas como fonte de inovação evolutiva.

Atualmente, também estamos vivendo um novo momento evolutivo da teoria da evolução biológica, pois temos autores em várias partes do mundo discutindo se devemos expandir a Síntese Moderna ou não. Uma vez que a síntese tenha sido estruturada em torno de 1940, embora tenha incorporado alguns novos saberes ao longo do século XX, não houve uma reorganização para acomodar os conhecimentos que vêm sendo produzidos nos últimos anos a partir do uso de tecnologia contemporânea e com novas abordagens. Por exemplo, uma das áreas cuja inclusão na teoria evolutiva foi intensamente reivindicada a partir do fim do século XX é a Biologia do Desenvolvimento. Alguns nomes como Sean Carroll, Gerd Müller e Alan Love defendem que a relação entre o desenvolvimento e a evolução, a relação “evo-devo”, deveria fazer parte das explicações evolucionistas, uma vez que padrões corpóreos e regulações gênicas poderiam ser explicados de formas bem atualizadas por meio de novas abordagens de pesquisa.

A reivindicação para a expansão da Síntese Moderna para dar origem ao que seria chamado de Síntese Estendida da Evolução tem um caráter muito coerente com o que o nome propõe, uma vez que a proposta é a de que não ocorra troca ou substituição, muito menos exclusões. Todo o poder explicativo da Síntese Moderna, especialmente dos processos de recombinação, mutação, isolamento, seleção natural e deriva genética, seria ampliado e reorganizado dentro de um quadro mais abrangente.

A Síntese Estendida, por exemplo, inclui como causa adicional da diversidade a origem de características dos organismos a partir de variação não genética, antes tratada como ruído ou como caso excepcional. Também inclui a ideia de que organismos não só recebem passivamente as consequências do processo seletivo, pois também podem atuar determinando condições de seus ambientes. Autores como Massimo Pigliucci e Kevin Laland propõem que, muito diferente de uma substituição, a Síntese Estendida visa ampliar e tornar ainda mais abrangente a teoria evolutiva preexistente (Figura 1).

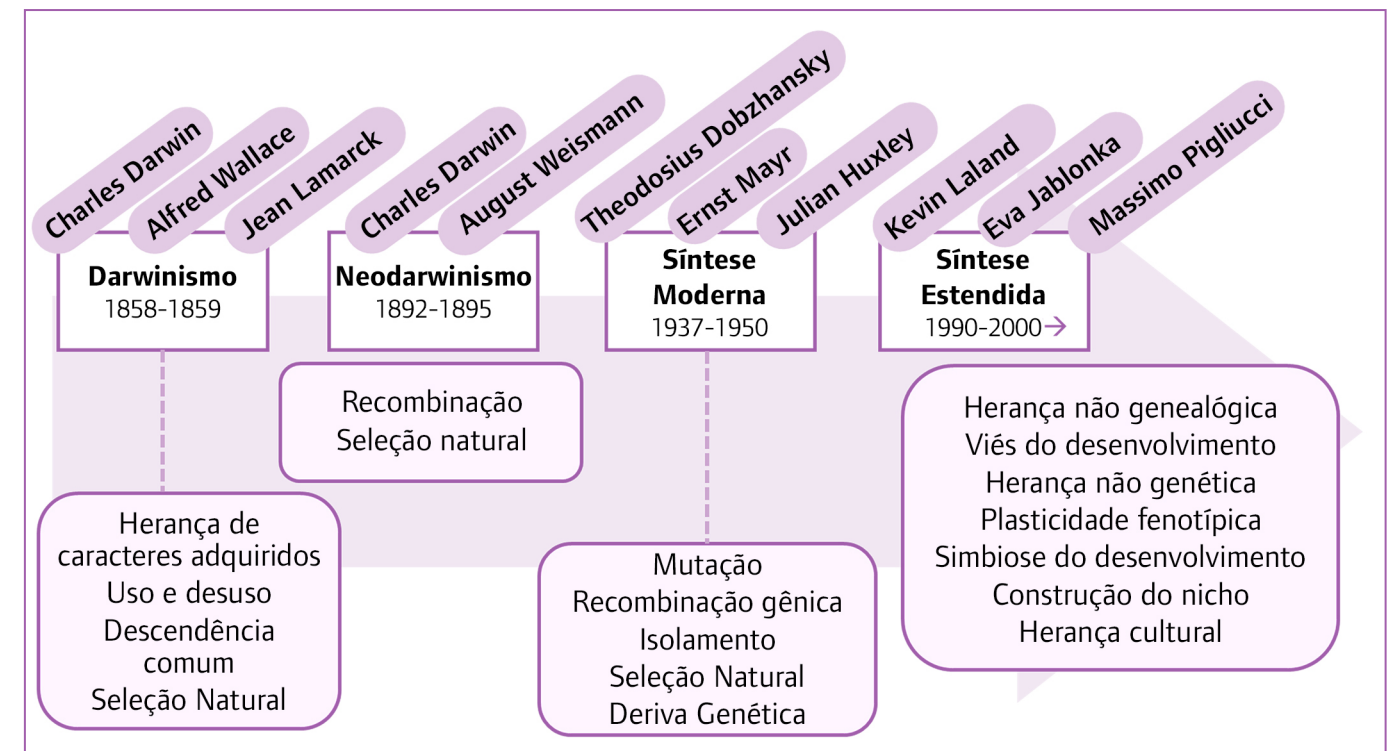


Figura 1.

Diagrama que destaca as principais modificações da teoria evolutiva desde Darwin. Os retângulos superiores indicam os principais períodos, Darwinismo, Neodarwinismo, Síntese Moderna e Síntese Estendida, com suas respectivas datas aproximadas de início. Acima desses retângulos, estão associados alguns dos principais autores cujas ideias foram muito centrais no período. Conectados abaixo de cada período, estão outros retângulos com cantos arredondados, indicando os principais conceitos que compõem a estrutura explicativa em cada momento. Vale ressaltar que, no caso da Síntese Estendida, além dos conceitos próprios que constam no retângulo, deve-se considerar também aqueles conceitos da Síntese Moderna. Fonte: elaboração dos autores.

Apesar da inclusão de novos conceitos para explicar questões evolutivas, a Síntese Estendida vai além de uma ampliação no arcabouço conceitual da Síntese Moderna. Existem reorientações teóricas importantes de serem levadas em consideração. Neste sentido, podemos diferenciar o enfoque da Síntese Moderna do enfoque da Síntese Estendida, por mais que ambas compartilhem alguns conceitos centrais como mutação, recombinação gênica, seleção natural, deriva genética e isolamento. Podemos, assim, destacar, pelo menos, três pontos principais em que estas teorias diferem enfaticamente.

O primeiro ponto diz respeito à relação entre as interações entre o organismo e o ambiente. Na Síntese Moderna, o ambiente desempenha um papel mais determinista pois ele é decisivo para a sobrevivência e reprodução dos organismos. Somente um organismo que resiste às condições impostas por um dado ambiente consegue sobreviver. Já na Síntese Estendida, a relação não é tão unidirecional porque, assim como o ambiente exerce certa influência na história de vida

dos organismos, estes também são capazes de alterar o ambiente. Pense na espécie humana e na forma como transformamos o ambiente ao alterarmos paisagens para construir lavouras e produzir alimentos em larga escala para que nossa espécie fosse bem-sucedida em sobrevivência e reprodução. Apesar de a Síntese Moderna incluir um papel dinâmico para o ambiente nas interações com os organismos, a Síntese Estendida enfatiza a reciprocidade.

O segundo ponto em que tais teorias divergem é a causa das explicações da forma, do funcionamento e do comportamento dos organismos. Enquanto a Síntese Moderna explica a origem de novas características com ênfase em mutações e recombinação gênica, a Síntese Estendida enfatiza alguns processos, além destes citados, que podem explicar tais novidades, como a plasticidade fenotípica, os genes reguladores do desenvolvimento e transmissão horizontal de genes, por exemplo. Por isso, dizemos que na Síntese Estendida existem múltiplas causas que explicam as características dos organismos.

A terceira diferença de ênfase que merece destaque é acerca da herança, ou seja, da forma como as características são transmitidas entre os organismos. Na Teoria Sintética, a transmissão de características acontece, necessariamente, da geração parental para seus descendentes e por meio exclusivo da sequência do DNA. Na Síntese Estendida, à herança genética são acrescentadas outras formas de transmissão de características. A herança pode ser não genética, como, por

exemplo, a transmissão da microbiota; e também pode acontecer entre organismos não relacionados, como acontece na transmissão de cultura.

A partir destas diferenças de ênfases, é possível identificar diferenças nas perguntas de pesquisa colocadas por cada teoria, bem como nos conceitos utilizados para responder a essas perguntas. Estas comparações estão sintetizadas no Quadro 1.

Quadro 1.
Comparação entre a estrutura conceitual da Síntese Moderna e da Síntese Estendida em relação ao enfoque; principais perguntas científicas possíveis em cada teoria; e principais conceitos que respondem a essas perguntas.

		Síntese moderna da evolução	Síntese estendida da evolução
Compreensão de evolução		Mudança na frequência da composição genética de populações	Mudança nas características dos organismos e na sua distribuição nas populações
Enfoque	Surgimento de inovação evolutiva	Fonte genética	Fonte múltipla
		Como surge a inovação do material genético? <i>Mutações e recombinação gênica</i>	Como surge inovação da forma, do funcionamento e do comportamento dos organismos? <i>Mutações e recombinação gênica; Troca de materiais entre organismos (transferência horizontal de genes, cleptoplastia e simbiose); Ação de genes reguladores do desenvolvimento; e Fontes não genéticas (herança não genética e plasticidade fenotípica)</i>
		Como as frequências de sequências gênicas são alteradas ao longo das gerações? <i>Seleção natural, isolamento e deriva genética</i>	Como as frequências de fenótipos são alteradas ao longo das gerações? <i>Seleção natural, isolamento e deriva genética</i>
	Herança	Genética genealógica	Herança Inclusiva
		Como a geração parental transmite suas características para os descendentes? <i>Herança genética</i>	Como os organismos (com ou sem parentesco) transmitem suas características para outros organismos? <i>Herança genética genealógica e sem parentesco, epigenética, efeito parental, herança ecológica, herança cultural e transmissão de simbioses</i>
	Relação organismo-ambiente	Determinismo do ambiente	Reciprocidade organismo-ambiente
		De que forma o material genético relaciona-se com o organismo ao longo da vida? <i>O organismo é a expressão de seu material genético mediado por interações com o ambiente</i>	De que forma o material genético relaciona-se com o organismo ao longo da vida? <i>O organismo expressa o material genético de modo integrado com sinais ambientais em processos de desenvolvimento, com regulação epigenética e com simbioses</i>
		De que forma o material genético e o organismo relacionam-se com o ambiente? <i>O ambiente com papel seletivo determinará o sucesso do material genético e do organismo</i>	De que forma o material genético e o organismo relacionam-se com o ambiente? <i>Organismos produzem modificações no ambiente e também produzem cultura, que podem ser transmitidos. Desse modo, o ambiente é reorganizado de modo que os fatores evolutivos também são regulados, em parte, por ação dos organismos</i>

Existe uma crítica em relação à Síntese Estendida que argumenta que ela não é necessária. Argumenta-se que a Biologia já emprega esses conceitos, como o desenvolvimento e epigenética, por exemplo, nas explicações dos problemas evolutivos que se colocam nas investigações. Desse ponto de vista, adotar a Síntese Estendida seria apenas mais um rótulo desnecessário, entretanto, não se trata apenas de reunir determinados conceitos sob um mesmo nome. Conforme discutido e apontado no quadro, a Síntese Estendida propõe uma reorientação teórica, ou seja, uma mudança na forma de olhar para estes fenômenos que deve ser levada em consideração por permitir uma interpretação mais complexa da biologia, por fazer novas perguntas de pesquisa e por aumentar o poder científico de fazer previsões.

Esta reorientação é valiosa principalmente no ensino de biologia. Dois dos principais obstáculos de aprendizagem identificados nas pesquisas nesta área são i) o genocentrismo, isto é, a ênfase nas explicações genéticas; e ii) as explicações lineares que atribuem uma única causa para fenômenos biológicos, que são complexos. O enfoque da Síntese Estendida permite o enfrentamento destes dificultadores da aprendizagem ao integrar diversos conceitos da Biologia em uma abordagem de fontes múltiplas para as características dos organismos, da herança inclusiva e da reciprocidade entre organismo e ambiente. Sendo assim, nas próximas seções, serão respondidas algumas perguntas referentes à produção de inovação evolutiva sob a ótica da Síntese Estendida da Evolução.

Como a troca de materiais entre organismos pode gerar inovação?

Entre os seres vivos pode ocorrer troca ou transferência de estruturas biológicas, tais como organelas celulares, material genético e até mesmo organismos inteiros que passam para o interior de outro, de modo que

novas características tornam-se possíveis a partir dessas interações. São bem conhecidos os exemplos de hospedeiros que abrigam ou acomodam parasitas, mas o olhar evolutivo que se tem dado recentemente para relações como essas e outras relações nas quais não há prejuízo para nenhum dos envolvidos, consiste em evidenciar e destacar os casos nos quais novas características surgem a partir da interação dos seres. Vale ressaltar que essas interações, que podem resultar em novas características, chamamos de **simbiose do desenvolvimento**.

Nomes da atualidade, como Scott Gilbert, explicam que os seres vivos podem ser entendidos como construídos, em parte, pelas interações entre si (o hospedeiro) e os microrganismos que nele habitam, denominados como microrganismos simbióticos. O organismo hospedeiro somado à sua comunidade microbiana, incluindo bactérias, vírus, arqueias, fungos, protozoários e helmintos, pode ser entendido como um ecossistema e, no todo, pode ser denominado como “holobionte”.

Em alguns casos, é possível dizer que a construção do corpo animal é dependente de seus microrganismos simbioses, ou seja, animais realizam interações com os microrganismos que são necessários ou indispensáveis para a conclusão da diferenciação celular durante o desenvolvimento. A razão para tal está aparentemente no papel dos microrganismos no fornecimento de sinais para múltiplas etapas de desenvolvimento do animal. Por exemplo, algumas bactérias são necessárias para que ocorra metamorfose em muitos invertebrados; outras bactérias são imprescindíveis para o desenvolvimento completo do intestino de ratos, como afirmam pesquisadores, como Margaret McFall e Thomas Bosch.

Já o inseto pulgão da espécie *Acyrtosiphon pisum* pode exibir o fenômeno da simbiose do desenvolvimento na característica de sua cor. Normalmente, o pulgão exibe coloração vermelha, porém, ao se associar com a bactéria *Rickettsiella viridis*, sua superfície torna-se verde. O mais interessante é que como



os pulgões tendem a viver em folhas de cor verde, a cor induzida pela associação com a bactéria resulta em menos risco de predação em comparação com pulgões vermelhos não infectados, como conta o pesquisador Tsutomu Tsuchida.

Também muito importantes são as inovações vivas que surgem quando ocorre a doação de material genético de um ser vivo para outro, que passa a executá-los, originando produtos gênicos de outra espécie. É como se os organismos estivessem fazendo transgênicos naturais e o mais intrigante é que o DNA desses seres vivos passa a conter material hereditário que não foi originado de forma genealógica. Quando ocorre essa doação de material genético, também chamada de **transferência horizontal de genes**, o organismo doador do gene e o organismo que o recebe podem ser evolutivamente distantes.

Pode se tratar de arqueias e bactérias, ou bactérias e eucariotos, por exemplo.

Um caso de transferência de genes entre organismos evolutivamente distantes é o da doação de material genético de arqueias e bactérias para uma alga vermelha da espécie *Galdieria sulfuraria*. Os genes adquiridos originam proteínas que permitem a capacidade de sobreviver em ambientes vulcânicos, salinos e tóxicos onde a alga citada atualmente reside, como identificaram pesquisadores, como Gerald Schönknecht.

Nos exemplos acima, tratamos de associações simbióticas ou transferências genéticas não genealógicas que conferiram uma nova característica a pelo menos um dos organismos envolvidos. Para encerrar essa seção, abordamos o caso, à primeira vista mais enigmático dentre os apresentados aqui.

Com base na constatação de que um molusco marinho com coloração esverdeada apresentava a capacidade de fazer fotossíntese, estudos foram realizados para elucidar quais eram os meios para tal e as origens das estruturas envolvidas. O molusco, da espécie *Elysia chlorotica*, uma lesma-do-mar, ingeria em sua alimentação algas da espécie *Vaucheria litorea*. Neste caso, a ingestão tem algo especial pois a captura dos cloroplastos provenientes da alga ocorre sem que seja feita a digestão. Assim, os cloroplastos são interiorizados para o ambiente das células da lesma-do-mar ainda funcionais, um processo denominado **cleptoplastia**. A lesma passa então a ser verde e passa a ter a capacidade de fazer fotossíntese, sendo que tais processos são obrigatórios para completar seu desenvolvimento, como explicam Mary Rumpho e outros pesquisadores.

fazer a regulação que ativa/desativa os genes durante o desenvolvimento, mas o resultado talvez tenha sido o menos esperado possível: cientistas identificaram que os genes reguladores do desenvolvimento são compartilhados por praticamente todos os animais.

Atualmente os genes reguladores são chamados de genes Hox e, embora sejam encontrados em grupos muito diferentes, como insetos ou mamíferos, podem originar estruturas morfológicas muito variadas, ou seja, estruturas presentes em diferentes filos, como olhos, membros e corações, que parecem ter evoluído de forma completamente independente, originam-se a partir de conjuntos semelhantes de genes e circuitos de reguladores genéticos profundamente conservados. Esses genes parecem guardar segredos de como dar origem às estruturas variadas de cada grupo de organismo.

Mais do que responder pela origem das diferenças e semelhanças dos seres vivos, os genes reguladores também podem significar a fonte de inovação de características caso sofram mutações, como defende Sean Carroll. Considerando que sejam genes que determinam uma série de processos simultâneos, tendo sofrido uma mutação, e que poderia iniciar uma mudança significativa na produção da estrutura do organismo em desenvolvimento.

O papel do desenvolvimento era tradicionalmente entendido pela visão da restrição à variabilidade, ou seja, como nem todas as estruturas podem ser originadas durante a produção da forma, entendia-se que o desenvolvimento tivesse um papel de reduzir as possibilidades de características vivas. Porém, no contexto da Síntese Estendida, entende-se que as estruturas vivas são produzidas pelo **viés de desenvolvimento**, que consiste na possibilidade de que algumas variantes surjam mais prontamente do que outras, como explica Tobias Uller e outros pesquisadores. Um resultado importante desse viés é que, uma vez acumulado, passa a determinar padrões morfológicos dos seres vivos de modo a direcionar tendências evolutivas.

Como genes podem controlar outros genes originando inovação no desenvolvimento?

O estudo do desenvolvimento dos organismos tem resultado em conhecimentos que tem interfaces importantes com a evolução biológica. Como mencionamos anteriormente, a relação entre a evolução e o desenvolvimento, é hoje comumente abreviada como “**evo-devo**” uma vez que grande parte dos saberes dessa área de estudo são originárias de investigações referentes a como genes expressam-se ou como não se expressam. As pesquisas foram evidenciando proteínas responsáveis por ativar e desativar a expressão de vários genes envolvidos na produção de estruturas dos organismos durante o desenvolvimento.

Muitos esforços foram dedicados para identificar quais seriam os genes responsáveis por



Como outras fontes além da genética podem originar inovação?

Até o momento da estruturação da Síntese Moderna, pode-se dizer que os termos “herança” e “genética” estavam muito atrelados, uma vez que a herança biológica que estava sob foco de estudo era a herança genética. Era um período importante para os avanços do entendimento sobre a célula e, poucos anos depois, para o entendimento da estrutura e do funcionamento do DNA. Meio século mais tarde, pesquisadores como Eva Jablonka passam a reivindicar a necessidade de considerar outras formas de herança além daquela estritamente genética.

Uma das formas de herança não genética seria aquela mediada por epialelos, ou seja, as sequências de DNA são idênticas em suas sequências, mas diferem em suas modificações secundárias como na metilação do DNA ou na acetilação/metilação das histonas, que são as proteínas presentes nos cromossomos. Os processos de metilação e acetilação alteram os padrões de expressão dos genes, desligando ou ativando a expressão onde ocorrem, o que significa que podem influenciar as proteínas produzidas e, consequentemente, as características do organismo.

Alguns estados epigenéticos são mantidos na linha germinativa e podem ser transmitidos à descendência. Vale ressaltar que variações epigenéticas podem alterar o desempenho dos organismos, influenciando nos resultados adaptativos – é o que dizem os pesquisadores Ilkka Kronholm e Sinéad Collins. Sendo assim, a característica originada a partir da epigenética pode ser alvo da seleção natural, resultando no aumento da distribuição de determinada característica na população, ainda que não ocorra mudança direta nas frequências dos genes.

A **herança epigenética** parece resgatar o passado da história da teoria evolutiva, uma vez que, embora a herança genética não permita que traços adquiridos durante a vida sejam

transmitidos aos descendentes, a herança epigenética permite. Porém, ao contrário da herança lamarckiana, a concepção moderna de transmissão de características adquiridas não envolve o uso e desuso de órgãos em resposta a mudanças ambientais. Assim, não se trata da herança de uma resposta do organismo dirigida aos estímulos ambientais, mas sim da herança de estados epigenéticos possíveis que são adquiridos durante a vida do indivíduo. Um exemplo é o da planta *Laguncularia racemosa* (L.) encontrada no mangue brasileiro. Uma população que crescia em ambiente altamente salino exibiu menor altura e área foliar reduzida em comparação com a população que crescia às margens do rio. Tais diferenças observadas não estavam associadas à diferença genética nas plantas

de cada ambiente, mas havia elevada variação nos padrões de metilação do DNA, sugerindo que as variações epigenéticas permitem um ajuste entre tais organismos e seus respectivos ambientes, como observaram Catarina Lira e outros pesquisadores.

Outro aspecto importante referente à genética e que está sob o holofote da Síntese Estendida é a questão das mudanças que as características vivas exibem sob influência ambiental, ainda que o DNA mantenha-se inalterado, o que é conhecido como **plasticidade fenotípica**. Vale lembrar que o termo “genótipo” refere-se ao material genético, enquanto o termo “fenótipo” refere-se às características vivas que são produzidas, sejam elas estruturais, fisiológicas ou comportamentais).

À época da Síntese Moderna, o fenótipo dos seres vivos era entendido como resultando do controle genético, ou seja, o fenótipo seria a manifestação exata do genótipo. Neste caso, geneticistas tendiam a descartar traços plásticos denominando-os como “ruídos do desenvolvimento”. Termos como “penetrância incompleta” e “expressividade” foram associados a fenótipos plásticos que representavam a dificuldade de associar determinado alelo a um determinado fenótipo. Porém, ao longo do século XX, foi possível a identificação de vários traços que resultam de uma complexa interação entre influências genéticas e ambientais.

Atualmente, podemos dividir dois grandes tipos de plasticidade fenotípica: o polifenismo e a norma de reação. No caso de um mesmo genótipo, capaz de produzir ou uma abelha rainha um ou uma abelha operária, temos apenas duas alternativas de fenótipos, neste caso, trata-se de polifenismo. Ao contrário, se tivermos um caso de um espectro contínuo de fenótipos expressos a partir de um único genótipo em uma gama de condições ambientais, esse espectro é chamado de norma de reação, como explica Scott Gilbert. Tais relações entre fenótipo e ambiente podem ser interpretadas à luz da abordagem da **eco-evo-devo**, que reúne os campos da evolução, do desenvolvimento e da ecologia.

No contexto da Síntese Estendida, considera-se que a plasticidade fenotípica seja capaz de iniciar e/ou acelerar o ritmo da evolução adaptativa e promover a diversificação. O processo conhecido como “acomodação fenotípica”, por exemplo, permite um ajuste adaptativo, sem mudança genética, de aspectos estruturais após um *input* ou estímulo durante o desenvolvimento, ou seja, durante a vida do organismo, alguma incorrência é tomada como um sinal que desencadeia um processo de reorganização corpórea que permite ao organismo produzir ajustes de seu próprio fenótipo. Neste caso, esse ajuste ou inovação não é proveniente de uma série de mutações, mas da expressão reorganizada de estruturas que já estavam presentes de forma potencial. Vale



ressaltar que, por se tratar de elementos preexistentes no organismo, o ajuste não é infinitamente plástico e não é responsivo a qualquer desafio que possa enfrentar, para não incorrer em um pensamento com tom lamarckiano.

A acomodação fenotípica é defendida pela pesquisadora Mary Jane West-Eberhard também propositora de que se houver variação genética por trás da resposta fenotípica dos diferentes indivíduos, a seleção natural produzirá o processo de “acomodação genética”. O significado de tais discussões sobre processos está na ideia de que, por acomodação fenotípica seguida de acomodação genética, a seleção adaptativa pode ocorrer sem depender lentamente da mutação aleatória. Além disso, como o fenótipo foi ambientalmente induzido, vários indivíduos da população podem ter sido responsivos ao mesmo tempo e diferentemente das mutações que foram iniciadas em indivíduos isolados.

Como modificar o ambiente e outros comportamentos podem influenciar a evolução?

Ninguém discorda de que o ambiente tem um papel importante no processo evolutivo. Porém, a especificação desse papel não é a mesma na proposta da Síntese Estendida e na Síntese Moderna de pouco mais de meio século atrás, antes concebido como um agente seletivo, ou como um desafio externo que funciona aproximadamente como uma pressão sobre os organismos. Hoje, o ambiente é reinterpretado: se antes uma seta imaginária iria do ambiente em direção ao organismo, hoje, seriam necessárias muitas setas para representar as relações entre o organismo e o ambiente no processo evolutivo.

Uma das maiores contribuições para romper com a visão de um papel passivo do organismo com relação ao meio talvez tenha sido a **Teoria da Construção do Nicho**, defendida por pesquisadores como John Odling-Smee. Ao secretar substâncias químicas, armazenar recursos e ao construir artefatos, os seres vivos realizam o que pode ser considerado como construção de nicho, que é o processo pelo qual o metabolismo e as atividades dos organismos modificam os próprios nichos e/ou outros nichos. Além dos exemplos mencionados, também é possível citar que os organismos podem se mover ativamente no espaço, às vezes escolhendo o momento em que o fazem e, desse modo, expondo-se a condições alternativas.

Certamente os seres vivos apresentavam tais características na época da Síntese Moderna, mas o olhar para elas mudou, porque hoje se considera que, por meio da construção de nicho, os organismos determinam parcialmente as pressões de seleção às quais eles e seus descendentes estão expostos de maneira não aleatória, ou seja, passam a codirigir a própria evolução, como defende Kevin Laland e outros pesquisadores. São exemplos de intervenção dos seres vivos no ambiente os ninhos de aves, formigueiros, cupinzeiros, colmeias, construção de teias, tocas etc. Também podemos mencionar o efeito que a produção fotossintética de oxigênio a partir de bactérias, algas e plantas teve para a atmosfera; ou o efeito que os microrganismos fixadores de nitrogênio têm para diferentes espécies.

Como os resultados da construção do nicho não estão restritos a uma única geração, o termo **“herança ecológica”** é utilizado para designar as modificações ambientais produzidas por organismos que constroem nichos, ambientes seletivos alterados que são herdados pelos descendentes. Porém, como os componentes ambientais incluem outros organismos vivos, é possível afirmar que uma herança ecológica seja transmitida de múltiplos organismos para múltiplos outros organismos, dentro e entre gerações, não somente de modo genealógico.

Um outro fator importante que pode ser transmitido de geração em geração e não depende de vias genéticas nem genealógicas é a **herança cultural**. Podemos pensar o conceito de cultura de um modo abrangente, como a transmissão de conhecimentos e comportamentos por meio da interação social, por ensino ou imitação, podendo afetar o sucesso reprodutivo dos indivíduos.

Acredita-se que a capacidade de adquirir cultura por imitação tenha contribuído para a adaptação de indivíduos, pois a plasticidade do comportamento permite uma resposta às condições ambientais mais rápida que o surgimento de fenótipos adaptativos mediados pela genética, como discute Paulo Abrantes e outros pesquisadores. Um exemplo da aquisição de cultura por primatas consiste no comportamento de lavar batatas identificado em macacos japoneses. Estes animais eram alimentados com batatas que chegavam cobertas de terra. O ato de lavar as batatas num riacho surgiu com uma fêmea e sua atitude foi imitada por todo o grupo. Essa pesquisa de Syunzo Kawamura indica como é possível um comportamento, até então inexistente em uma população, uma vez que se torne útil ou estabelecido, tenha reais chances de ser imitado e de se tornar generalizado para todos.

Os efeitos da distribuição de um traço cultural em uma população podem impactar até mesmo padrões de herança genética, levando a uma coevolução de gene-cultura. Por exemplo, a lactase é uma enzima produzida por mamíferos que permite a degradação da lactose, um carboidrato do leite e que tem sua produção diminuído pelo organismo com o final do período de amamentação. Assim, mamíferos adultos exibem naturalmente intolerância à lactose. Entretanto, a tradição da domesticação de animais produtores de leite por determinadas populações humanas, um traço cultural, favoreceu o aumento da distribuição de indivíduos que possuíam uma disposição genética que permitia a tolerância à lactose na fase adulta. Essa é uma explicação que o pesquisador Kenichi Aoki fornece e que consiste em um exemplo da coevolução da herança gene-cultura.

Considerações finais

Diante de exemplos apresentados sobre como as características dos seres vivos podem ser originadas por outros meios além de mutação e recombinação gênica, foi possível elencar evidências de que a Síntese Estendida visa ampliar de forma fundamentada e plural as explicações sobre como a inovação evolutiva surge. Com ênfase para a articulação de fatores causais, a interação entre os organismos e também dos organismos com o ambiente é ressaltada sem que a genética perca a importância e passa a ser interpretada mais conectada com o desenvolvimento e os fatores ambientais, por exemplo.

A Síntese Estendida pode ser muito exitosa nessa tarefa de fazer conexões entre as áreas de estudo da biologia e entre os diversos fatores que compõem o mundo ecossistêmico, no qual se inserem os seres vivos, pois para entender a evolução, não faz sentido que uma ou outra área da biologia seja desconsiderada. Theodosius Dobzhansky disse que “nada na biologia faz sentido exceto à luz da evolução”, assim, a Síntese Estendida talvez esteja visando evidenciar que nada na evolução faz sentido exceto à luz de todas as áreas da biologia.

Para saber mais

CESCHIM, Beatriz; OLIVEIRA, Thais Benetti de; CALDEIRA, Ana Maria de Andrade. Teoria Sintética e Síntese Estendida: uma discussão epistemológica sobre articulações e afastamentos entre essas teorias. *Filosofia e História da Biologia*, v. 11, n. 1, p. 1-29, 2016.

CESCHIM, Beatriz; GANIKO-DUTRA, Matheus. “Genético” e “hereditário”: como a biologia contemporânea explica essa relação? In: CALDEIRA, Ana Maria de Andrade. *Didática e epistemologia da biologia*. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2020. p. 169-202.

LALAND, K. N. On evolutionary causes and evolutionary processes. *Behavioural processes*, v. 117, p. 97-104, 2015.

PIGLIUCCI, M. An extended synthesis for evolutionary biology. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1168, n. 1, p. 218-228, 2009.



Domesticação de plantas: um processo co-evolutivo



**Leila do Nascimento Vieira¹,
Hugo Pacheco de Freitas Fraga¹,
Giulia Melilli Serbin²,
Raquel Santos da Silva³,
Clarissa Alves Stefanello¹,
Charles Roland Clement⁴**

¹ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Botânica, Curitiba, PR

² Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, mestranda no Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas (Botânica), Manaus, AM

³ Universidade Federal do Paraná, doutoranda no Programa de Pós-graduação em Bioinformática, Curitiba, PR

⁴ Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Coordenação de Tecnologia e Inovação, Manaus, AM

Autor para correspondência - leilavieira@ufpr.br

Palavras-chave: domesticação de plantas, síndrome de domesticação, Américas, biodiversidade, recursos genéticos, evolução

Quando Charles Darwin apresentou sua teoria da seleção natural em 1859, ele começou com uma apresentação sobre a domesticação de animais e plantas porque sabia que todo mundo entenderia de algo relativo ao cotidiano. Ele descreveu exemplos da variabilidade de animais e plantas dos quais ele cuidava no próprio jardim e também exemplares que eram cuidados em jardins de seus amigos. Darwin explicou que o acúmulo de variabilidade ocorre por seleção inconsciente, porque as pessoas queriam tipos diferentes das espécies que lhes interessavam, mas não tinham a intenção de mudar as populações, somente de ter mais tipos (variabilidade). Observe que domesticação é uma interação entre humanos e plantas, e que pode gerar benefícios para ambas as partes. Os humanos podem aproveitar-se dos produtos das plantas e de sua companhia; as plantas podem ser favorecidas por receberem cuidados humanos em um espaço seguro. É por isto que a domesticação é considerada um exemplo de co-evolução. Neste ensaio estudamos este processo com mais atenção para demonstrar como a interação gerou mudanças em plantas nativas das Américas, especialmente da América do Sul.

A domesticação de plantas no nosso cotidiano

Vivemos em uma sociedade agrícola cuja história está intimamente relacionada à domesticação de paisagens, plantas e animais. A domesticação de paisagens e de plantas iniciou-se em diversas regiões do planeta de forma independente e, em muitas delas, há mais de 10 mil anos.

A maioria dos livros sobre a história de humanos modernos (*Homo sapiens sapiens*) afirma que as primeiras comunidades humanas viviam de coletar e caçar os alimentos, esgotando momentaneamente os recursos de cada região em que se encontravam e migrando para novas regiões em busca de mais alimentos. No entanto, vale ressaltar que mesmo os humanos nômades modificam seus ambientes, acumulando plantas (e animais) em seus acampamentos. As modificações de ambientes são chamadas de domesticação das paisagens e o acúmulo de plantas é o primeiro passo na domesticação das mesmas. As modificações aparecem nos registros arqueológicos durante o Pleistoceno tardio; no Holoceno são associados a muitos grupos humanos.

O conjunto de comportamentos humanos que resulta na modificação de ambientes é chamado de construção de nicho. O nicho de uma espécie refere-se ao conjunto de fatores ambientais abióticos (e.g., temperatura, umidade) e bióticos (e.g., alimentos, predadores, parasitas etc.) que permitem a sobrevivência e reprodução. Todos os organismos modificam os próprios nichos, o que muitas vezes facilita a adaptação ao ambiente. Pense em pássaros construindo ninhos e em formigas construindo seus formigueiros. Olhando ao redor, dá para ver que humanos são especialmente bons em construir nichos, pois a maioria do que se vê foi modificado ou construído pelos humanos. Uma paisagem domesticada, como um quintal ou pomar, é um exemplo de construção de nichos no ambiente, enquanto que a domesticação de plantas é um exemplo de construção de ni-

chos no tempo, pois as mudanças que ocorrem são mais visíveis ao longo do tempo.

A partir do momento em que os humanos começaram a construir seus nichos, manejando a paisagem e cultivando plantas, a história da humanidade e de muitas espécies de plantas mudaram por completo. As ações humanas de promoção, manejo e cultivo alteram gradativamente o ambiente em que as populações de plantas se encontram. Também gradativamente, as populações de plantas começam a se diferenciar das populações silvestres nas características de interesse dos humanos, como sabor do fruto, cor das flores, e tamanho da parte usada. As características de interesse dos humanos são parte do fenótipo, como também são as folhas, raízes, e todas as outras partes da planta que fazem com que seja reconhecida como membro de uma espécie.

Ao longo do tempo, as plantas cultivadas passaram a ser cada vez mais cuidadas e manipuladas pelos homens, porque quando a seleção é natural ela acontece onde os cuidados e a seleção humana não atuam. De forma similar, as sociedades humanas aumentaram o tamanho e o número de suas populações e também tornaram-se dependentes das plantas que estavam cultivando, iniciando-se um processo de interdependência. Devido a essa interdependência, o processo de domesticação de plantas pode ser descrito como um processo coevolutivo, já que impactou e impacta tanto os humanos quanto as plantas envolvidas no processo. Nos estudos da evolução, sucesso é definido simplesmente em termos de reprodução. Como se sabe, os humanos são numerosos, o que significa que somos bem-sucedidos. A mesma medida pode ser aplicada às plantas. A mandioca silvestre (*Manihot esculenta* ssp. *flabellifolia*) ocorre ocasionalmente no norte do Cerrado, enquanto que a mandioca cultivada (*M. esculenta* ssp. *esculenta*) ocorre em muitas partes de Brasil e na maioria dos países tropicais do mundo. Qual é mais bem-sucedida?

A domesticação de plantas é parte do nosso cotidiano e, portanto, é um processo social. Pessoas gostam de plantas por muitas razões – utilitárias (como produzir sombra, formar cercas), estéticas, mágicas, religiosas

etc. Tipos diferentes com alguma característica de interesse podem ser obtidos de diferentes fontes, tais como amigos, vizinhos, no comércio ou na natureza. Quando algumas novidades são levadas para ambientes domésticos, as pessoas geralmente se preocupam em plantá-las em locais apropriados e depois cuidam delas, regando, adubando, protegendo-as ou expondo-as mais ao sol. Para quem gosta de plantas, o cuidado é um dever. Dessa forma, muitas plantas cultivadas gradualmente aumentaram a dependência por cuidados humanos e perderam algumas adaptações em relação ao nicho natural. Se ao longo de gerações de cultivo aparecem novas variações, e elas forem selecionadas, aumentam mais ainda as diferenças entre a população cultivada e a população silvestre que a originou. Quando uma planta cultivada não tem similar na natureza, podemos dizer que a domesticação está em andamento.

Como a domesticação modifica o fenótipo das plantas?

Os caracteres observáveis de uma planta ou população formam o fenótipo, que é o resultado da interação entre os fatores ambientais e o conjunto de genes. Durante o processo de domesticação, alguns caracteres fenotípicos são selecionados por humanos, até o ponto em que um determinado conjunto de características diferencia as plantas domesticadas de seus ancestrais silvestres. A esse conjunto de características promovidas damos o nome de síndrome da domesticação. Cada espécie domesticada possui uma **síndrome de domesticação** própria, porque cada uma é acumulada e selecionada por diferentes razões.

As modificações fenotípicas encontradas nas plantas domesticadas são consequência de seleção realizada de forma inconsciente ou, menos frequentemente, consciente. As populações humanas selecionam, promovem, cultivam as plantas mais atraentes, com frutos maiores, mais saborosos, mais coloridos, entre tantas outras propriedades. Quando diferentes variedades da mesma espécie são

plantadas próximas umas das outras como, por exemplo, em um jardim, elas podem se cruzar e produzir descendentes diferentes. Se a planta diferente chamar a atenção, ela ganhará espaço próprio no jardim. De cruzamento em cruzamento, os humanos vão acumulando mais variabilidade em seus cultivos, e frequentemente se tornam diferentes das plantas ancestrais.

Algumas das características diferentes podem impactar diretamente o sucesso de reprodução dessas populações na ausência do cuidado humano. Por exemplo, o ancestral silvestre do milho, localmente chamado de teosinto (*Zea mays* ssp. *parviglumas*), apresenta deiscência dos grãos, um mecanismo de dispersão natural em que a ligação do grão à espiga solta naturalmente quando o grão está maduro. Já o milho domesticado (*Zea mays* ssp. *mays*) perdeu esse mecanismo de deiscência dos grãos, ou seja, os grãos permanecem aderidos à espiga mesmo após o amadurecimento. Com isso, o milho passa a depender do auxílio humano para se dispersar e reproduzir.

As síndromes de domesticação variam de acordo com o uso que a população humana identificou na planta. Em muitas plantas domesticadas o uso relaciona-se com a parte comestível (folhas, raízes, tubérculos, frutos ou sementes). A mudança no tamanho do fruto, geralmente o aumento do mesmo, é uma característica comum a diversas espécies que foram domesticadas para uso dos frutos. Bons exemplos desse tipo de seleção são o tomate (*Solanum lycopersicum*), cujo tipo silvestre pesa 2 ou 3 gramas, enquanto alguns tipos domesticados pesam 100 gramas; e as pimentas picantes e doces, como o pimentão (*Capsicum annuum*), a malagueta (*C. frutescens*), a dedo de moça (*C. baccatum*) e o murupi (*C. chinense*), variam em tamanho, cor e ardência (grau de ardência).

O aumento no tamanho de órgãos vegetais (como flores e frutos) é algumas vezes resultante de uma mudança genética comum nas plantas domesticadas, que é a multiplicação total do genoma, que chamamos de poliploidia. Muitas espécies de plantas e a maioria dos animais, como os humanos, são diploides, pois tem dois conjuntos cromossômicos,



um de origem materna e outro paterna. Os humanos possuem 23 pares e o milho possui 10 pares de cromossomos, por exemplo. Se o número diploide for duplicado, cria-se um tetraploide, se for triplicado, cria-se um haploide, e assim sucessivamente. Quando o conteúdo de DNA de um indivíduo é multiplicado, podemos observar mudanças em seu fenótipo como, por exemplo, o aumento do tamanho de suas estruturas (folhas, frutos etc) e uma maior facilidade de se estabelecer em paisagens domesticadas. No entanto, apesar de comum, a correlação entre o aumento do tamanho dos frutos e alterações de ploidia não é regra. Em plantas como as pimentas do gênero *Capsicum* e na pupunha (*Bactris gasipaes*), por exemplo, observamos um aumento significativo no tamanho dos

frutos durante a domesticação sem mudanças de ploidia.

O biribá (*Annona mucosa*) é uma árvore frutífera muito cultivada na região amazônica que apresenta populações domesticadas hexaploides. A polpa do fruto tem sabor agradável e adocicado e, como consequência da seleção humana e poliploidia, apresenta uma ampla variabilidade fenotípica da casca, além da mudança de tamanho. A casca do fruto maduro costuma ser amarelada e apresenta saliências que variam em forma e tamanho, caracterizando-os como diferentes morfotipos. O tamanho do fruto pode variar de menos de 50 gramas em populações silvestres até 2.500 gramas em populações domesticadas (Figura 1).

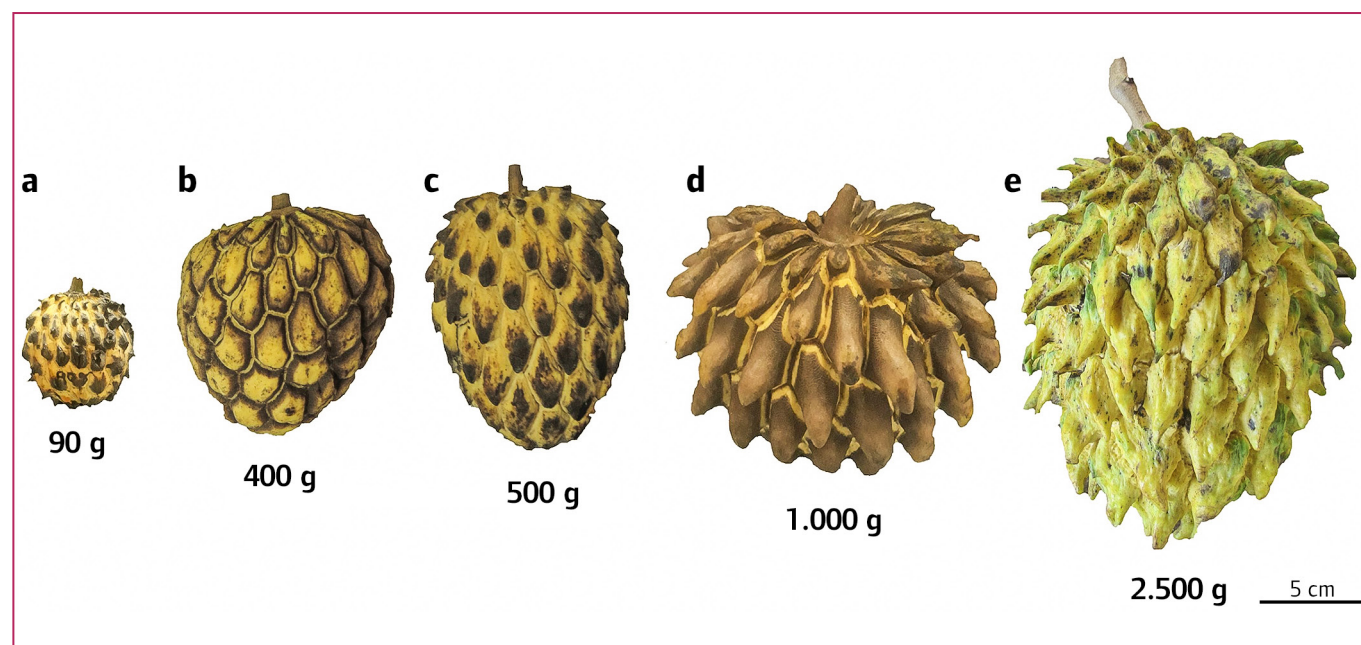


Figura 1.

Variações no tamanho, formato do fruto, coloração e formato das saliências de frutos de biribás (*Annona mucosa*) domesticados, encontradas nos mercados de Manaus, Amazonas. Fotos por Giulia Melilli Serbin.

Entre as síndromes de domesticação mais comuns nas raízes tuberosas e tubérculos estão o aumento no tamanho da porção comestível, aumento no número de órgãos comestíveis, aumento na razão da proporção órgãos comestíveis / órgãos não-comestíveis. Alguns exemplos de plantas domesticadas com esse propósito são a mandioca, uma raiz, e a batata (*Solanum tuberosum*) e o inhame/cará (*Dioscorea trifida*), ambos tubérculos.

Na mandioca domesticada, por exemplo, observamos raízes mais grossas e com maior capacidade de armazenamento de carboidratos. Além disso, algumas variedades de mandioca apresentam uma diminuição importante no conteúdo de um composto tóxico, o glicosídeo cianogênico ou cianeto. Quando uma variedade possui pouco cianeto e é comestível após simples cozimento é chamada de mandioca doce, aipim ou macaxeira (no-

mes em Guarani e Tupi, respectivamente), mas quando tem muito cianeto é chamada de mandioca brava. Mudanças no conteúdo de compostos secundários são características comuns em síndromes de domesticação, tanto em raízes e tubérculos, como em espécies usadas para outras finalidades, inclusive medicinais.

Em plantas que foram domesticadas para uso de suas sementes, as síndromes de domesticação mais comuns incluem aumento no tamanho das sementes, a casca (testa) da semente mais fina, germinação mais rápida e uniforme, perda de deiscência, entre outras. Os feijões comum (*Phaseolus vulgaris*) e de-lima/fava (*P. lunatus*) e o amendoim (*Arachis hypogaea*) são exemplos de plantas que foram domesticadas nas Américas para uso de suas sementes, e possuem síndromes similares. Essas semelhanças ocorrem porque as três são parentes próximas (todas são leguminosas), os dois feijões são do mesmo gênero e também porque, nos três casos, o alvo da seleção foi a semente.

A domesticação de plantas nas Américas

Como vimos nos tópicos acima, as sociedades humanas vêm manejando ecossistemas para obter seus alimentos há milhares de anos. Por muitas vezes, elas não produziam a totalidade ou mesmo a maioria dos alimentos necessários para sua manutenção, e boa parte do aporte nutricional e calórico dessas populações vinha de manejo e coleta. Essa interação das sociedades humanas com os ecossistemas resultou na domesticação de muitas plantas nas Américas sem, necessariamente, desenvolver uma forma de agricultura tradicional como conhecemos hoje.

Essas populações ancestrais concentravam-se principalmente em três regiões: (1) Sul do México e Norte da América Central (a Mesoamérica); (2) Região Andina; (3) Terras baixas da América do Sul (região ao leste da cordilheira dos Andes, incluindo regiões dos domínios Amazônicos, Cerrado, Caatin-

ga, entre outras). As regiões mesoamericana e andina foram os berços de diversas civilizações, o que não ocorreu nas terras baixas, onde as sociedades foram diversas, mas sem presença de estados. É importante destacar que essas sociedades sempre faziam intercâmbio de plantas. Como resultado, remanescentes de milhares de anos de plantas originárias, por exemplo, do Sul do México, são encontradas nas Terras Baixas da América do Sul e vice-versa.

Um interessante exemplo desse intercâmbio é a cherimoia (*Annona cherimola*). A cherimoia é uma frutífera conhecida nos Andes que se tornou subutilizada nas Américas após a conquista europeia. Acreditava-se que seu centro de domesticação era nos vales andinos do sul do Equador e norte do Peru, entretanto, após mais de 10 anos de pesquisas, os estudiosos descobriram que seu centro de origem é, na verdade, a Mesoamérica. Os humanos trouxeram a cherimoia da Mesoamérica para o Peru por rotas de comércio marítimo no Oceano Pacífico há 4.700 anos e posteriormente foi cultivada na América do Sul antes da chegada dos espanhóis.

Dentre as plantas que foram domesticadas nas Américas podemos citar: abóboras e morangas, feijões, milho, tomate, abacate, algodão, pimentas doces e picantes, batatas, quinoa, amendoim, mandioca, pupunha, cacau, entre muitas outras. Essas plantas faziam parte da cultura das populações ancestrais das Américas e são uma valiosa herança que temos desses povos. Nesse tópico vamos comentar um pouco sobre a domesticação e síndromes de domesticação de algumas dessas plantas.

A Mandioca

A mandioca é uma das principais fontes de carboidratos de diversos países, principalmente nas regiões tropicais, e é uma das dez plantas alimentícias mais produzidas no mundo. Apesar do amplo cultivo atual, a mandioca estava restrita às Américas até o século XVI. Registros arqueológicos sugerem que as populações indígenas do sudoeste da Amazônia tenham iniciado o processo de domesticação da mandioca há 9.000 anos,

o que significa que na época da conquista europeia a mandioca já estava domesticada e amplamente cultivada nas terras baixas da América do Sul, especialmente em solos bem drenados, bem como na Mesoamérica.

Nas bordas sul e oeste da bacia amazônica, nos estados de Tocantins, Goiás, Mato Grosso, Rondônia e Acre, ainda existem populações de *Manihot esculenta* subsp. *flabellifolia*, indicadas como o parente silvestre da mandioca. O parente silvestre da mandioca é encontrado em locais de mata onde a mandioca não é cultivada e não se desenvolve espontaneamente. Além disso, a mandioca que cultivamos hoje não consegue se estabelecer na natureza sem cuidado humano e não migra dos locais de cultivo, ou seja, sua ocorrência está restrita a paisagens domesticadas.

Quando comparamos as populações silvestres com a mandioca domesticada, podemos perceber diferenças na tolerância às condições luminosas: transição da área de mata (sombra) das populações silvestres para áreas de cultivo em campo aberto da mandioca; nas características do hábito de crescimento, transição de lianas/trepadeiras (silvestre) para crescimento arbustivo (mandioca); presença de raízes fibrosas na silvestre para uma raiz mais grossa que armazena muitos carboidratos (mandioca); e redução na floração.

As mandiocas domesticadas foram inicialmente divididas entre mandioca brava e macaxeira / mandioca doce. No entanto, a diversidade de morfotipos de mandioca vai muito além, como: diferentes arquiteturas de planta; sabores; colorações de raiz derivadas principalmente do acúmulo de compostos secundários como licopeno e carotenoides; tempo de tuberização; entre outros. Ainda hoje, temos uma grande diversidade de variedades de mandioca no Brasil.

A Pupunha

A pupunha (*Bactris gasipaes*) é uma palmeira nativa da Amazônia que foi domesticada no Sudoeste da Amazônia no período pré-colombiano. As pupunhas silvestres podem ser encontradas na faixa sul da Amazônia na mata aberta e seus frutos são ricos em óleos, sendo considerada uma importante fonte de energia. No entanto, os frutos das pupunhas silvestres são muito pequenos, variando de 1 a 2 gramas. As populações de pupunha domesticadas apresentam, de forma geral, aumento de tamanho do fruto (Figura 2), maior quantidade de polpa (mesocarpo), maior quantidade de amidos e menor quantidade de óleos no mesocarpo, e variação nas cores (amarelo, laranja, vermelho e suas gradações).



Figura 2.

Da esquerda para a direita são ilustrados frutos de plantas silvestres, frutos incipientemente domesticados e frutos domesticados de pupunha (*Bactris gasipaes*). Barra: 1 cm. Ilustração por Clarissa Alves Stefanello.

As síndromes de domesticação de pupunha variam de uma população para outra, tanto para o tamanho dos frutos, como para outras características. Assim, existem populações domesticadas com frutos pequenos (ao redor de 20 g), chamadas de microcarpas (micro =

pequeno; carpa = fruto), mesmo que os frutos sejam maiores que os silvestres (1-2 g); populações com frutos médios (20+ a 70 g), chamadas de mesocarpas; e populações com frutos grandes (70+ a 200 g), chamadas de macrocarpas (Figura 3).

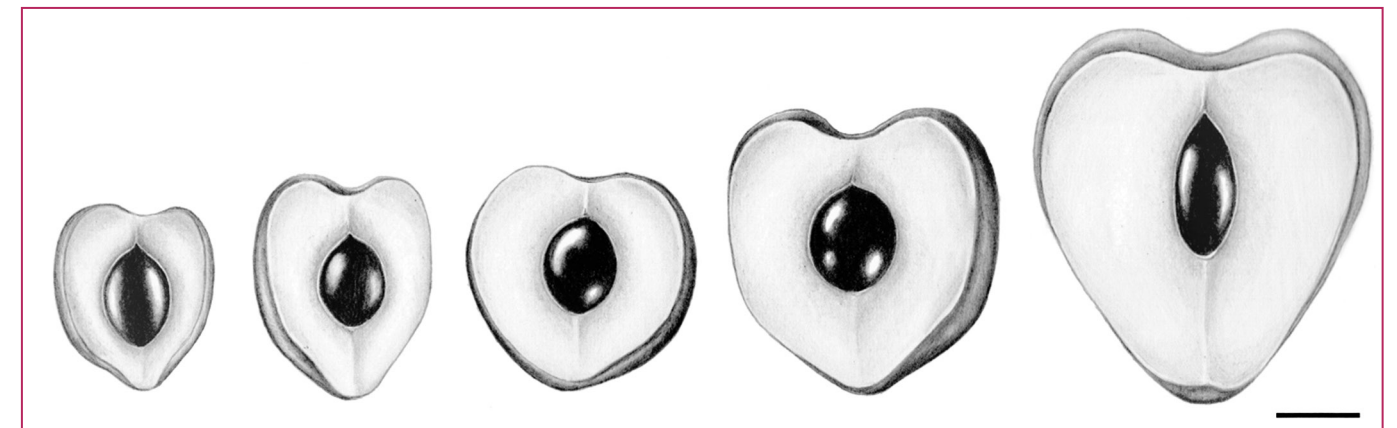


Figura 3.

Frutos de pupunha domesticada (*Bactris gasipaes*). Da esquerda para direita podemos observar o aumento no tamanho do mesocarpo, característico das pupunhas microcarpa, mesocarpa e macrocarpa. Barra: 1 cm. Ilustração por Clarissa Alves Stefanello.

No início de seu processo de domesticação, a pupunha foi selecionada para fornecer madeira para a confecção de ferramentas. Com o passar do tempo, o interesse humano pela pupunha mudou, e as plantas passaram a ser selecionadas pelos seus frutos. Em algumas regiões foram selecionados frutos mais oleosos, em outras regiões frutos com mais amido, mais polpa (mesocarpo) e de maior tamanho.

Essas características variam entre as diversas regiões em que a pupunha vem sendo cultivada há milhares de anos. Apesar de ter sido domesticada no sudoeste da Amazônia, a pupunha foi levada para diferentes regiões da América do Sul e Central, e em cada região dessas podemos encontrar muita variabilidade de frutos e usos da pupunha, passando pela seleção de frutos para serem consumidos cozidos, frutos com maior teor de amido para obtenção de uma bebida fermentada, ou consumo do palmito, especialmente na atualidade.

O Abacaxi

O abacaxi (*Ananas comosus*) é uma espécie de bromélia (família Bromeliaceae) originária e domesticada na América do Sul. Diferentemente de outras espécies de bromélias, que são usadas principalmente para fins ornamentais, o abacaxi é cultivado pelos seus frutos. O cultivo do abacaxi, atualmente, ocorre em todos os países tropicais, incluindo o Brasil, que é seu maior produtor mundial e onde é cultivado em quase todos os estados do país.

O abacaxi foi domesticado há mais de 6.000 anos, com vestígios arqueobotânicos datados de 3.500 anos atrás na América do Sul, sendo posteriormente distribuído para a América Central, há mais de 2.500 anos. O ancestral mais provável do abacaxi cultivado é chamado de *Ananas comosus* var. *microstachys* (Figura 4), e é encontrado na maioria das regiões tropicais da América do Sul ao leste dos Andes, crescendo em solos com

baixa retenção de água. O abacaxi silvestre é caracterizado por folhas longas e estreitas, de até 2 m de comprimento e menos de 4 cm de largura, e inflorescência de tamanho pequeno a médio. O fruto formado é pequeno, com polpa branca ou amarela, firme e fibrosa e com alto teor de açúcar e acidez, com numerosas sementes.

Uma das variedades consideradas domesticadas, mas que divergem consideravelmente dos abacaxis mais comumente comercializados, é o abacaxi vermelho (*Ananas comosus* var. *bracteatus*). Ele apresenta uma cor rosa a vermelho vivo, sendo o nome "*bracteatus*" derivado das suas longas brácteas. Originalmente, esse abacaxi era cultivado para obtenção de fibras, suco de frutas e como cerca viva, e atualmente é cultivado para fins

ornamentais. Ele apresenta frutos um pouco maiores quando comparado às variedades silvestres, porém menores que outros abacaxis domesticados. A planta é vigorosa, com folhas longas, espinhos grossos e abundantes brotações. Além disso, seus frutos possuem sementes, assim como o abacaxi silvestre.

Alguns abacaxis pré-colombianos foram selecionados para baixo teor de fibra nos frutos e reduzida produção de sementes, derivado de uma menor fertilidade e também de auto-incompatibilidade. Estes frutos são muito maiores, mais doces e menos ácidos. Os abacaxis que apresentam essas características são conhecidos como *Ananas comosus* var. *comosus* (Figura 4) e compreendem o grupo de abacaxis mundialmente comercializados e apreciados.

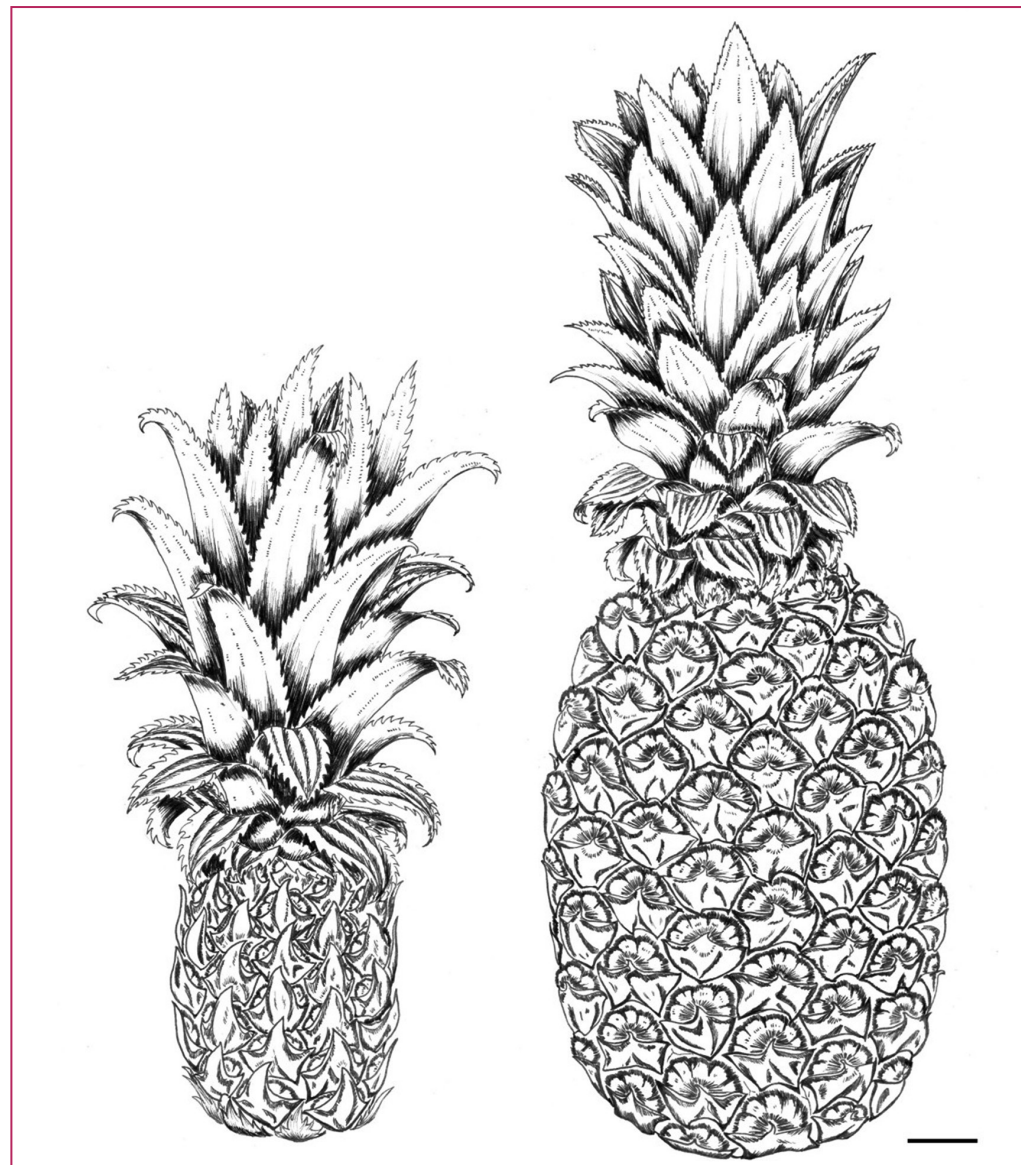


Figura 4.

Aspectos gerais de frutos de abacaxi silvestre (*Ananas comosus* var. *microstachys* – fruto da esquerda) e abacaxi domesticado (*Ananas comosus* var. *comosus* – fruto da direita). Barra: 1 cm. Ilustração por Clarissa Alves Stefanello.

Dentre as características que diferenciam o abacaxi da var. *comosus* em relação ao abacaxi silvestre está a presença de um maior número de folhas e folhas mais largas e curtas. Essa modificação teve um impacto relevante na obtenção de energia por meio da fotossíntese por essas plantas, que passaram a utilizar maiores quantidades de fotoassimilados (principalmente os açúcares produzidos durante a fotossíntese) no desenvolvimento de frutos maiores e mais doces. Além disso, os frutos maiores e com mais água em seu interior tornaram necessária uma melhor captação e economia de água pelas plantas de abacaxi. Essas modificações fisiológicas fazem parte da síndrome de domesticação do abacaxi.

Com a diminuição na produção de sementes viáveis nas variedades domesticadas de abacaxi, a propagação vegetativa (assexuada) ganhou mais importância por ser um modo de reprodução que não depende de sementes. Vale destacar que a diminuição expressiva na forma sexuada de propagação (sementes) diminuiu consideravelmente seu sucesso reprodutivo em condições naturais. Essa diminuição tornou as variedades domesticadas de abacaxi muito mais dependentes do manejo humano, uma importante característica da domesticação.

O Guaraná

Uma das frutas mais famosas do Brasil, o guaraná (*Paullinia cupana* var. *sorbilis*), teve sua origem na Amazônia há apenas 500 a 1000 anos. A história da sua domesticação e cultivo é contada em uma lenda sobre a origem dos indígenas Sateré Mawé, um povo do tronco linguístico Tupi, que até hoje habita o baixo rio Amazonas. Conforme recontado pelo povo ao etnógrafo Nunes Pereira em 1939, a lenda é sobre a rivalidade entre dois irmãos e sua irmã Onhiamuaçabê.

A lenda conta que os irmãos não queriam que ninguém se casasse com sua irmã, pois ela tinha um grande conhecimento sobre plantas e suas medicinas. Onhiamuaçabê também era dona de um lugar encantado chamado de Noçoquem. Em certo dia, uma cobra se apaixonou por Onhiamuaçabê, a seduziu, e então a engravidou, gerando revolta em seus irmãos que resolveram assassinar seu filho. No local encantado, Noçoquem, o pequeno índio foi decapitado por seus tios e Onhiamuaçabê ouviu seus gritos de angústia, mas quando chegou ao local já era tarde demais.



Onhiamuaçabê então arrancou e enterrou o olho esquerdo do menino, e em seguida o olho direito, e finalmente enterrou o cadáver de seu filho. Em voz alta ela gritou: “Você, meu filho, será a maior força da Natureza; você fará o bem para todos os homens; Você será ótimo; você vai libertar os homens de algumas doenças e curá-los de outras.” Do olho esquerdo nasceu guaraná (o falso guaraná), do olho direito nasceu o guaraná (o verdadeiro), e do túmulo do menino surgiram as plantas e animais que seriam importantes para o povo, e por fim surgiu o primeiro Sateré Mawé. A lenda relata dois eventos importantes: o surgimento de um povo, os Sateré Mawé e a domesticação do guaraná quando Onhiamuaçabê reconhece um tipo especial de guaraná, mais útil e que deveria ser plantado para o bem das próximas gerações.

Da cultura e sabedoria indígena surgiram inspirações para as pesquisas genéticas sobre o guaraná. Descobriram que a variedade “sorbilis”, cultivada pelos Sateré Mawé, é um poliploide. Com 210 cromossomos, a variedade foge do padrão observado nos seus parentes mais próximos dentro do gênero, que possuem 24 cromossomos. O guaraná verdadeiro é notavelmente diferente dos falsos guaranás (outras espécies do gênero *Paullinia*) que crescem nas florestas do território Sateré Mawé. Morfologicamente, o guaraná verdadeiro apresenta frutos e sementes maiores, além de frutos mais coloridos. Essas diferenças podem estar relacionadas a poliploidia, que tem como consequência variabilidade morfológica e diferentes adaptações ecológicas.

A principal evidência da domesticação do guaraná é a baixa variabilidade genética observada na variedade “sorbilis” entre as amostras coletadas em diferentes localidades da Amazônia central, incluindo o município em que os Sateré Mawés vivem atualmente. Para a pesquisa, regiões específicas do DNA foram comparadas entre as populações e os pesquisadores observaram que essas populações não apresentaram estrutura geográfica (não apresentaram diferenças entre populações), confirmando a origem recente da domesticação do guaraná.

A domesticação continua em nosso cotidiano

Algumas das plantas domesticadas na América são apreciadas em todas as regiões do Brasil, de diversas formas e desde antes da chegada dos portugueses. Você consegue imaginar o povo brasileiro sem farinha de mandioca, tapioca ou pão de queijo? Todos eles têm a mandioca como principal matéria-prima para sua produção. Além deles, são feitos de mandioca: o sagu; a farinha de tapioca; a puba (massa de mandioca fermentada); o tucupi (caldo fermentado de mandioca); a maniçoba (fermentado de ramos e folhas de mandioca); o caium (bebida fermentada de mandioca); e também bolos, pães, biscoitos e a mandioca cozida em água.

No entanto, já perceberam que, em alguns centros urbanos, a diversidade de mandioca que encontramos é muito baixa? Isso representa um forte contraste com a diversidade de mandioca que temos no Brasil. Ela é uma planta que faz parte da cultura de diversos povos indígenas, comunidades tradicionais e produtores familiares. Essas populações têm uma ligação forte com as variedades de mandioca que mantêm em cultivo. Além de manter, muitos produtores observam as poucas sementes que germinam após a queima de uma roça. Quando as plântulas são vigorosas, os produtores podem deixar crescer e replantar a partir da maniva, pois planta oriunda de semente tem raiz fina e que cresce para baixo (como o tipo silvestre), enquanto que planta oriunda de maniva tem raiz grossa e que cresce horizontalmente. Se a raiz grossa é boa para comer, criam uma nova variedade plantando estacas. Estes produtores são os mantenedores de boa parte da diversidade de mandioca que temos e continuam fazendo domesticação.

Não apenas para a mandioca, mas para muitas plantas brasileiras, os povos indígenas, comunidades locais, produtores familiares, jardineiros, e outras pessoas que cultivam e gostam de plantas continuam a manejar e



selecionar, consciente ou inconscientemente, diferentes tipos de plantas: uma pitanga maior, uma jabuticaba ou um cajá/taperebá mais doce, um caju com polpa mais firme, um fruto de pupunha com menos óleo ou uma araucária que produza mais pinhas.

O processo de domesticação de plantas tem acompanhado o desenvolvimento das sociedades humanas, moldando a nossa forma de interagir com o ambiente e as paisagens. Este ensaio poderia ter dado a impressão que domesticação é algo que humanos fazem às plantas, sem que as plantas façam algo aos humanos. Mas veja a sentença anterior: as plantas moldam nossa forma de interagir com o ambiente e as paisagens, especialmente das pessoas que vivem no campo e produzem alimentos, flores ou medicinais. As plantas têm demandas e nós humanos atendemos, cuidando, agitando, capinando,

paparicando e até cantando para elas, tanto no campo como na cidade. Isto é coevolução, uma interação que beneficia ambas as partes da relação. O intrigante processo coevolutivo que herdamos dos nossos antepassados é contínuo e permanecerá sendo um dos aspectos centrais da nossa existência como seres humanos.

Para saber mais

CLEMENT, C.R.; BORÉM, A.; LOPES, M.T.G. Da domesticação ao melhoramento de plantas. In: BORÉM, A.; LOPES, M.T.G.; CLEMENT, C.R. *Domesticação e melhoramento - espécies amazônicas*. Viçosa: Editora da UFV, 2009. p.11-38.

CLEMENT, C.R.; JUNQUEIRA, A.B. Plantas domesticadas, uma história fascinante. *Scientific American Brasil*, p. 28-34, 2008.

PRADO, H.M.; MURRIETA, R.S.S. Presentes do passado. *Ciência Hoje*, v. 55, p. 18-23, 2015.



Evolução em ação: lições de uma pandemia*

O surgimento de novas mutações em linhagens do vírus SARS-CoV-2 ganhou grande repercussão na mídia e nas redes sociais no segundo ano da pandemia. O ponto central da questão é que algumas mutações em determinados genes dessas linhagens podem conferir a elas maior capacidade de infecção e, talvez, maior patogenicidade. Tendo em vista que o vírus tem um tempo de geração extremamente curto, o surgimento e a manutenção dessas mutações permite observar a evolução em ação. Nesse artigo é discutido como os diferentes processos evolutivos podem ser percebidos ao acompanhar o surgimento de novas linhagens de SARS-CoV-2 durante a pandemia. Além disso, será apresentado um exemplo de aplicação de um modelo epidemiológico chamado de SIR (Suscetível-Infetado-Recuperado). Ele servirá para exemplificar uma situação hipotética em que novas mutações aumentam a capacidade de transmissão do vírus, ilustrando um exemplo de evolução adaptativa.

Rhewter Nunes¹, José Alexandre Felizola Diniz Filho², Mariana Pires de Campos Telles^{1,3}

¹ Laboratório de Genética & Biodiversidade, ICB, Universidade Federal de Goiás, Goiânia

² Laboratório de Ecologia Teórica & Síntese, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Goiás

³ Escola de Ciências Médicas e da Vida, Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Autor para correspondência - tellesmpc@gmail.com

Palavras-chave: coronavírus, filogenia molecular, genômica, modelagem epidemiológica, SARS-COV-2, variação adaptativa

* Material produzido no contexto do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Ecologia, Evolução e Conservação da Biodiversidade (INCT_EECBio) e do Projeto Mapeamento das variações genéticas do Coronavírus (SARS-COV-2) em Goiás (FAPEG).



Evolução em diferentes escalas

Uma das maiores dificuldades para ensinar evolução é que se torna necessário pensar em processos que acontecem em grandes escalas de tempo. Pode-se comparar os organismos e entender as relações de ancestralidade a partir da identificação de padrões de compartilhamento de características em diferentes momentos no tempo (o que forma uma “filogenia”). Também é possível mapear certas características sobre a sequência histórica de diferenciação e correlacionar as características com variações climáticas ou biogeográficas. Tudo isso permite ajudar no entendimento dos processos, ou mecanismos, subjacentes aos padrões evolutivos que se pretende estudar. De modo geral, o maior interesse está em entender os processos adaptativos, ou seja, aqueles que são resultado da ação de **seleção natural**, que implicam aptidão diferencial, em termos de sobrevivência ou fecundidade, entre linhagens ou populações e que explicam o ajuste do organismo ao ambiente. Mas é possível também tentar avaliar de forma integrada o efeito de outros processos que explicam de forma mais ampla a evolução dos organismos, em termos de **mutações** (dando origem à variabilidade), **migração** (criando padrões geográficos de variação) e **deriva genética** (evolução neutra).

Quando se lida com padrões e processos em grandes escalas de tempo, normalmente os biólogos imaginam eventos que ocorreram há milhares ou milhões de anos, tempo suficiente ou necessário para que certas mudanças aconteçam nas populações e nas espécies. Entretanto, pensando de forma mais ampla, o tempo é relativo ao tipo de organismo que está sendo analisado. A medida comum e mais geral seria o que se pode chamar de “tempo de geração”, ou seja, qual o intervalo entre duas gerações sucessivas? Já que os mecanismos de mudança evolutiva ocorrem durante a reprodução, essa é a medida apropriada de tempo, ou seja, intervalo entre dois

eventos reprodutivos na população. Há muitos detalhes técnicos para estimar o tempo de gerações, mas de qualquer modo é possível avaliar que o tempo de geração da espécie humana (digamos, 15-20 anos) é bem maior do que o tempo de geração de algumas espécies de pequenos animais ou plantas, que podem ser anuais (ou seja, a cada ano temos uma nova geração), de um mosquito (alguns poucos meses) ou de uma bactéria ou vírus (alguns minutos). Ou seja, o tempo de uma geração entre espécies diferentes pode ser considerado um tempo relativo e que o tempo absoluto (em horas, dias, meses, etc) dessa mesma uma geração varia dentro desse conjunto de organismos. Sendo assim, em alguns casos será possível observar a evolução ocorrendo em um curto espaço de tempo.

Como os coronavírus replicam-se de forma assexuada dentro de uma célula, criando mais e mais cópias do seu genoma (diferente dos animais e outros organismos celulares em que o material genético é composto de DNA, em alguns vírus, como os coronavírus, o genoma é composto de RNA de fita simples +), na realidade, quando o SARS-CoV-2 infecta uma pessoa observa-se ali milhões de eventos reprodutivos acontecendo simultaneamente e sequencialmente, de modo que o tempo de geração é realmente muito curto (minutos). Isso significa que eventos evolutivos que levariam milhares de anos para acontecer em animais ou plantas, acontecem em questão de dias, no máximo semanas, para os vírus. Realmente é isso que os pesquisadores estão observando desde o início da pandemia, ou seja, a evolução em ação.

O objetivo deste ensaio é apresentar dados e informações acumuladas durante a pandemia para discutir, em um contexto mais amplo, diferentes processos evolutivos, vinculado a um contexto atual e cotidiano dos estudantes, com o intuito de fornecer material para ser utilizado em trilhas de aprendizagem interdisciplinar (ecologia, evolução e genética), contribuindo para o processo de ensino e aprendizagem.

Seleção Natural - processo em que ocorre sobrevivência e reprodução diferencial de determinados indivíduos devido às diferenças no fenótipo.

Mutações - alterações que ocorrem no material genético dos organismos. É um mecanismo evolutivo que promove variabilidade genética.

Migração - movimento de alguns indivíduos, ou de seus gametas, entre diferentes subpopulações de uma espécie. O movimento resulta no que chamamos de fluxo gênico e tende a diminuir as diferenças genéticas entre as subpopulações.

Deriva genética - mudanças nas frequências dos alelos de um determinado locus devido à amostragem aleatória. A amostragem aleatória pode fazer com que determinados alelos desapareçam da população ao longo do tempo ou mesmo que alelos, inicialmente raros, passem a ser mais frequentes.

Filogenia - também chamada de árvore filogenética, é um diagrama que apresenta as relações evolutivas entre um grupo de organismos com base em uma inferência obtida a partir de métodos específicos.

Clado - grupo de linhagens ou organismos que possivelmente tenham evoluído de um mesmo ancestral comum.

Sequenciamento de genomas e monitoramento da evolução de SARS-CoV-2

O evento inicial que marcou o transbordamento (*spillover*) do SARS-CoV-2 na China ocorreu em algum momento no final de 2019, e isso envolveu certamente uma adaptação para um tipo diferente de hospedeiro, a espécie humana.

Comparando as sequências dos genomas de SARS-CoV-2 ao redor do mundo, é possível reconstruir uma **filogenia**, relações evolutivas ou de ancestralidade entre as linhagens e, além disso, mapear as frequências dessas linhagens para avaliar sua origem em termos geográficos (Figura 1). No mundo todo, os genomas de SARS-CoV-2 que foram e estão sendo sequenciados são normalmente depositados em um banco de dados público de genomas chamado GISAID e, dessa forma, essas informações podem estar disponíveis para outros pesquisadores ao redor do mundo, auxiliando na compreensão da importância de alguns processos evolutivos. Na parte “A” da figura 1, obtida da plataforma GISAID, observa-se uma filogenia gerada a partir das sequências de genomas de SARS-CoV-2, amostradas em diferentes datas. A partir da filogenia é possível perceber grupos e subconjuntos de genomas, que formam **clados**. Atualmente, são reconhecidos 12 principais clados ao redor do mundo e sua frequência, por país, pode ser observada na parte B da figura 1. Além disso, na parte C da figura 1 é possível observar a proporção de cada clado ao longo do tempo.

Os primeiros clados que surgiram em 2019, no começo da pandemia, quase não aparecem na porção mais à direita da figura, indicando que, efetivamente, o vírus evoluiu desde o seu surgimento e que as frequências das linhagens foram mudando ao longo do tempo. Em síntese, portanto, essas linhagens são caracterizadas por MUTAÇÕES diferentes que ocorreram ao longo do tempo e que se espa-

lham na população como consequência dos outros processos evolutivos (seleção natural, deriva genética e migração). O primeiro passo para as análises, nesse sentido, é entender o genoma do SARS-Cov2 para avaliar como e onde essas mutações acontecem.

Uma primeira versão da sequência do genoma de SARS-CoV-2 foi publicada em março de 2020 na revista científica *Nature* e teve a sua importância discutida em uma matéria na revista Superinteressante – ver “Para saber mais” ao final desse texto). Essa sequência foi obtida a partir de um conjunto de genomas de RNA presentes no fluido broncoalveolar de um paciente que apresentava síndrome respiratória grave em dezembro de 2019. A abordagem de sequenciar uma coleção de genomas presentes em uma determinada amostra é chamada de metagenômica e permitiu identificar a presença de um novo genoma de vírus da família Coronaviridae, 89,1% similar ao genoma de SARS-CoV (vírus causador da doença SARS que ocorreu na China em 2002), permitindo, dessa maneira, definir aquele que foi denominado SARS-CoV-2, o novo coronavírus.

Com a primeira sequência do genoma, obtida para SARS-CoV-2, foi possível identificar que o seu genoma é composto de 29.903 bases nitrogenadas e apresenta dois conjuntos principais de genes: os complexos de poliproteínas chamados de pp1a e pp1b, e as proteínas constituintes da partícula viral, conforme pode ser observado na Figura 2. Os complexos de poliproteínas são quebrados em proteínas menores que participam dos processos de transcrição de genes e da replicação do genoma, enquanto os genes de constituição da partícula viral codificam proteínas que formarão glicoproteínas de membrana (M), proteínas do capsídeo (N), proteínas do envelope (E) e proteínas *Spike* (S), como pode ser observado na Figura 2. Dentre essas proteínas, a *Spike* é particularmente importante por causa de sua função biológica, pois está presente na parte mais externa da partícula viral e confere aos coronavírus o aspecto de coroa que se popularizou nas representações gráficas do vírus na mídia. A proteína *Spike* é responsável por mediar a ligação entre a partícula do vírus e a célula do hospedeiro, consequentemente, promover a infecção.



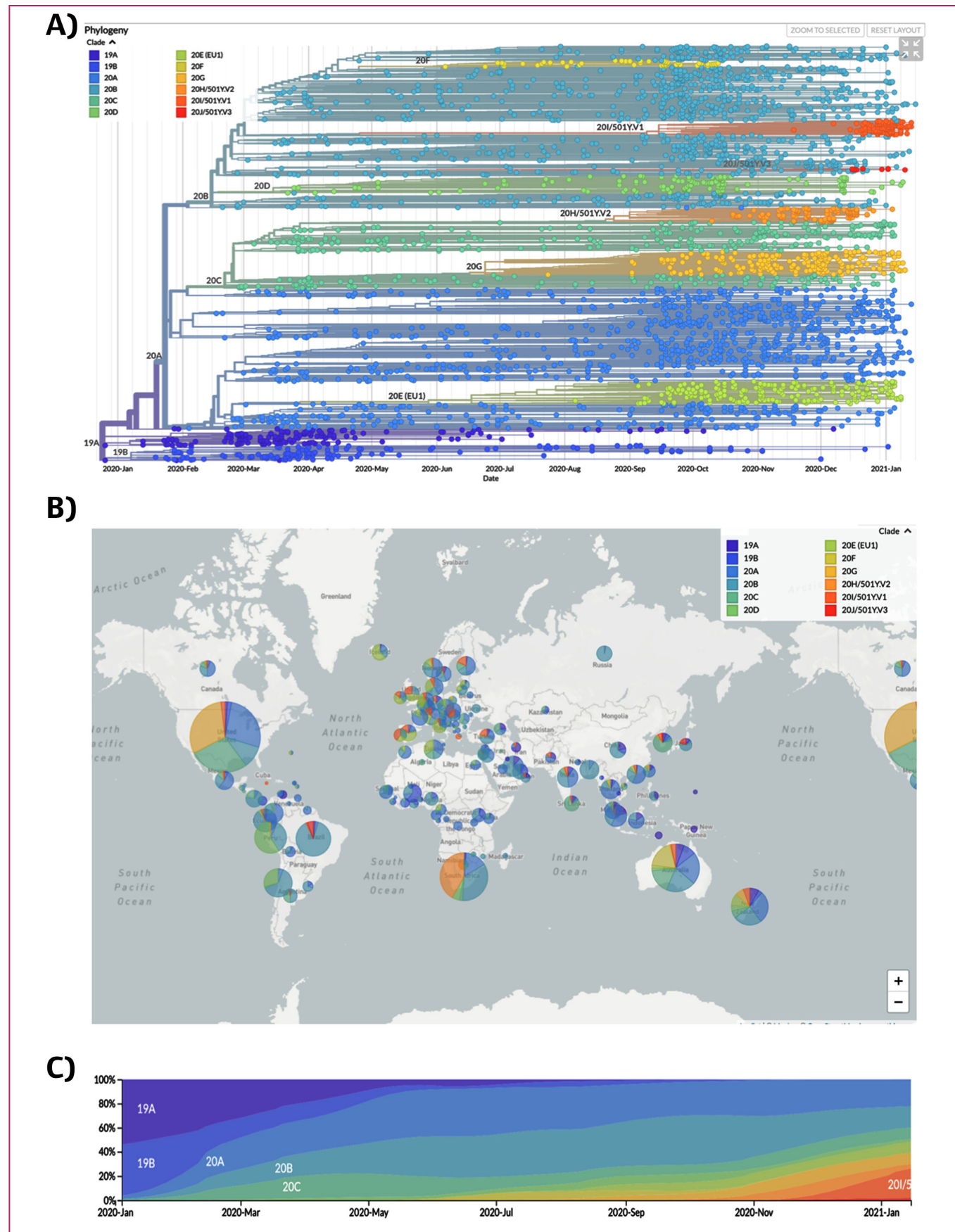


Figura 1. Principais clados formados na análise filogenética de sequências genômicas de SARS-CoV-2 entre janeiro de 2020 e janeiro de 2021. **A)** Amostras sequenciadas plotadas na filogenia seguindo a data de amostragem e coloridas conforme o clado a que pertencem; **B)** Distribuição da proporção de cada clado por país em 2021 e; **C)** Proporção de cada clado ao longo do tempo. Figuras extraídas da plataforma Nextstrain em 15/01/2021.

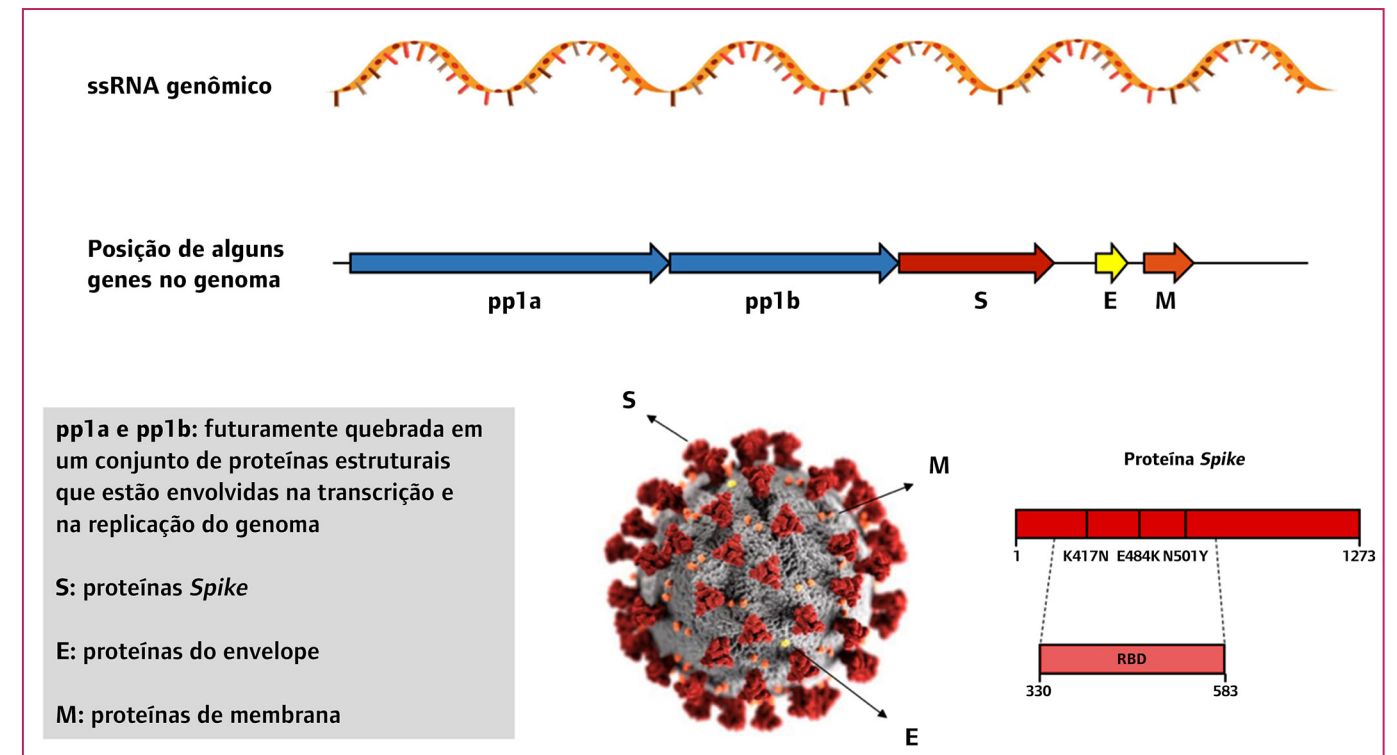


Figura 2.

Representação da posição de alguns genes que compõem o genoma de SARS-CoV-2. ssRNA: *single strand RNA* (RNA de fita única, em português) e foco na proteína Spike, constituída de 1273 aminoácidos, sendo os aminoácidos 330 a 583 os que formam a região chamada de **RBD**, e onde as mutações K417N, E484K e N501Y se encontram.

RBD - do inglês, *receptor-binding domain*, ou domínio de ligação ao receptor. É uma região da proteína Spike de SARS-CoV-2 que se liga fortemente aos receptores da enzima conversora de angiotensina 2 (ACE2) do hospedeiro. O vírus utiliza da ligação entre a proteína Spike e o receptor ACE2 para promover a infecção da célula do hospedeiro.

Refletindo sobre a função da proteína Spike, não é difícil concluir que é um dos principais alvos para estudos no desenvolvimento de vacinas, terapias utilizando anticorpos e testes para diagnóstico baseados em antígenos. Mas, além das questões relacionadas com prevenção, diagnóstico e tratamento, é importante avaliar o gene envolvido (S) no que pode ser chamado de monitoramento genético da epidemia, que nada mais é que avaliar a evolução da estrutura do genoma do vírus ao longo do tempo. Basicamente, o monitoramento é feito pelo sequenciamento e análise de genomas de SARS-CoV-2 oriundos de pacientes de diferentes localidades e em diferentes datas.

No Brasil, um primeiro esforço para sequenciar genomas de SARS-CoV-2 de pacientes daqui foi publicado na revista científica Science em setembro de 2020. Neste estudo, foi possível detectar quais eram os grupos de genomas que circulavam no país nos primeiros meses da pandemia, além de avaliar o efeito de intervenções não farmacológicas (fechamento de escolas, por exemplo) no avanço e disseminação do vírus no país. O primeiro estudo foi extremamente importante para traçar estratégias de enfrentamento ao coronavírus. No entanto, é preciso ressaltar que o esforço de sequenciamento do país como um todo no ano de 2020

foi muito baixo, pelo menos quando comparado com outros países emergentes, como a África do Sul, que depositou 2.882 sequências no banco de dados GISAID no final de 2020. Essa quantidade de genomas depositados era quase o dobro do valor brasileiro, embora o Brasil já apresentasse cerca de sete vezes mais casos confirmados que a África do Sul.

As mutações que podem ser observadas nos genomas do SARS-Cov2 ao longo do tempo e que caracterizam as diferentes linhagens implicam na substituição de uma determinada base nitrogenada do RNA por outra, ou pela inserção ou deleção de uma ou mais bases em uma determinada posição. De acordo com o código genético, três bases nitrogenadas (códon) codificam para um único aminoácido. As mudanças nesses códons (trincas de bases nitrogenadas), por efeito de mutação pontual durante a replicação, podem refletir em troca de aminoácidos, alterando, dessa forma, a estrutura primária da proteína. Em outras palavras, uma mutação pode gerar uma nova versão da proteína, diferente da conhecida anteriormente e que, por ter uma modificação em sua sequência de aminoácidos, pode vir a ter uma modificação também em seu funcionamento, tornando-se, por isso, uma mutação que pode alterar o valor adaptativo daquela linhagem.

De modo geral, as variações que podem ser observadas na filogenia do SARS-COV-2 parecem ocorrer no contexto do que se chama evolução neutra, como proposto pelo cientista japonês Mooto Kimura, ainda nos anos 1970, como no caso do DNA ou RNA, considerando o coronavírus. A maior parte das mutações não causa mudanças na aptidão, de modo que o aumento ou a diminuição de frequência dessas mutações na população ocorre por acaso e se fixa por processos estocásticos relacionados à deriva genética (a deriva é mais rápida em pequenas populações, ou pode explicar por que certas variantes ocorrem em um lugar e não em outro, pelo chamado “efeito fundador”, ou seja, simplesmente porque alguém contaminado com aquela linhagem chegou naquele lugar antes, por migração). Na realidade, existe uma discussão se há mesmo variações neutras, no sentido estrito, e a literatura traz o termo evolução **quase-neutra**, no sentido de que as diferenças de aptidão seriam muito pequenas, e nesse caso, processos de deriva genética podem ser mais importantes do que essa diferença no sentido de aumentar ou diminuir a frequência das mutações em diferentes lugares.

Assim, em princípio, as muitas mudanças nas linhagens do coronavírus, que podem ser observadas na Figura 1, ocorrem de forma neutra, e aparentemente não tiveram impacto muito grande sobre a sua transmissão ou patogenicidade. Entretanto, não é fácil de avaliar tal questão devido aos efeitos simultâneos de muitas variáveis que podem criar fatores que geram dúvidas e tornam as análises difíceis como a localização de diferentes linhagens dominantes que podem variar em termos de comportamento da população, política governamental, fatores sócio-econômicos, estrutura etária e, até mesmo, sistema de registro dos dados.

Variações Adaptativas

Entretanto, algumas mutações que começaram a aparecer já no final de 2020, quase 1 ano após o início da pandemia, parecem ser diferentes em termos de transmissão. Por exemplo, em Manaus foi detectada uma nova linhagem chamada de P.1 (Gamma), que é descendente da linhagem B.1.1.28, descrita primeiramente por

Nuno Farias e colaboradores, mas também detectada e descrita de forma independente por Felipe Naveca e colaboradores. O que chamou a atenção na P.1. foi a presença de mutações no gene codificador da proteína *Spike*, que receberam os nomes de S: K417N, S: E484K e S: N501Y. O “S” no nome delas se refere ao gene em que as mutações ocorrem, o gene S, que codifica a proteína *Spike*. Os demais caracteres referem-se à posição da mutação na proteína e a que tipo de alteração de aminoácidos é observada em relação ao genoma de referência. Por exemplo, no caso na N501Y, o aminoácido que ocupa a posição 501 da proteína, segundo o genoma de referência, é uma *Asparagina* (simbolizada pela letra N) e no genoma recém-sequenciado esse aminoácido foi substituído por uma *Tirosina* (simbolizado pela letra Y). Tais mutações apareceram em 13 dos 31 genomas sequenciados de amostras coletadas entre 15 e 23 de dezembro de 2020, mas não estavam

presentes em 26 genomas de amostras coletadas entre março e novembro, indicando que o surgimento delas é recente no referido local. Outras mutações e linhagens têm aparecido desde então, demonstrando o potencial evolutivo do vírus.

A mutação N501Y já havia sido observada em outras linhagens, como a B.1.1.7 (Alpha) na Inglaterra. A mutação N501Y é bastante importante pois ocorre em uma porção superior da proteína *Spike*, em uma região de interação com um receptor nas células humanas. É como se essa região de interação, chamada de RBD (Domínio de ligação ao receptor), fosse um quebra-cabeça em que a forma típica do SARS-CoV-2 formasse um encaixe meio frouxo, enquanto a versão com a mutação N501Y já fosse mais ajustada e, portanto, aumentasse as chances de uma infecção bem sucedida. A mutação observada no gene S, além de outras como a E484K, parece ter evoluído de forma independente em diferentes linhagens em outros países do mundo como Austrália, Dinamarca, Japão, Holanda, África do Sul, País de Gales, Estados Unidos e, como já mencionado, na linhagem B.1.1.28 aqui no Brasil. A mutação E484K pode ser particularmente importante porque parece estar ligada também a uma maior probabilidade de reinfecção, o que apresenta muitas implicações epidemiológicas (ver próxima seção).

Evolução quasi-neutra - teoria que propõe que algumas mutações não são estritamente neutras (que não estão sob ação da seleção natural), mas que podem ser levemente deletérias. Em populações grandes o suficiente, mutações levemente deletérias tendem a serem eliminadas por seleção purificadora enquanto que, em populações pequenas, elas são mais toleradas e se comportam de maneira neutra. Essa teoria foi desenvolvida por Tomoko Ohta a partir da teoria neutra proposta por Motoo Kimura.

Homoplasia é um determinado evento em que uma característica ou mutação foi ganhada ou perdida de forma independente em diferentes linhagens ao longo da evolução. Ela pode surgir tanto por pressão de seleção atuando na adaptação das linhagens quanto por efeitos da deriva genética.

Assim, quando se avaliam as mutações N501Y, E484K e as outras no gene S, é possível definir mais claramente que elas envolvem processos de adaptação do vírus, que se torna, evolutivamente falando, mais eficiente em invadir as células e, com isso, aumenta o seu poder de disseminação. Como o genoma viral é formado por uma sequência de RNA relativamente simples – mas altamente eficiente e especializada – dificilmente pode-se dizer que é improvável que as mesmas mutações evoluam de forma independente, em diferentes lugares.

Dado bastante tempo (no sentido do vírus) e uma enorme população de infectados, chega a ser quase inevitável que essas convergências adaptativas apareçam (tecnicamente, em análise filogenética, essas mutações N501Y e E484K, por exemplo, são **homoplasias**). Aparentemente, é isso que é possível detectar nas várias linhagens que estão aparecendo no Brasil (Manaus), na Inglaterra, na África do Sul e em outros países. E muitas outras coincidências devem acontecer, mesmo nas mutações neutras, mas sabe-se pouco sobre tal fato exatamente porque o número de genomas sequenciados é relativamente pequeno e não está distribuído uniformemente pelo mundo. Sendo assim, embora existam linhagens diferentes do coronavírus, que podem ser reconhecidas como “clados” (grupos formados por todos os descendentes de um mesmo evento evolutivo, no caso uma ou mais mutações), tais linhagens podem ter uma ou mais mutações que aparecem de forma independente, e isso é especialmente plausível se essas mutações forem adaptativas.

Um ponto importante, mais conceitual: é comum que as pessoas pensem nas adaptações biológicas quase que de forma intencional, como já discutido antes, mas de fato o que temos é simplesmente um processo de seleção natural como pensado por Darwin e Wallace em meados do século XIX. No caso do coronavírus, processo acontece dentro do hospedeiro. Se há pacientes com diferentes respostas imunes, em algum momento uma mutação que aconteceu ao acaso, modificando os aminoácidos gerados (como explicado anteriormente), que se mostre mais funcional no sentido de entrar na célula, esses pacientes particularmente vão transmitir mais e a nova mutação começará a aumentar de frequência na população.

Observa-se, desse modo, um processo de seleção natural dentro do organismo (população viral dentro do hospedeiro humano) e que se propaga para o nível populacional do hospedeiro (população humana mundial). Então, é importante entender que a mutação N501Y, por exemplo, não foi direcionada para infectar mais, em termos de intencionalidade, ou seja, o vírus não está evoluindo para se tornar mais infeccioso, isso é uma consequência que aparece após a reprodução diferencial da linhagem que carrega a nova mutação. Vale ressaltar que esse é um dos aspectos mais difíceis de ser ensinado e entendido conceitualmente em biologia evolutiva. O que acontece, de fato, é que qualquer mutação que apareça ao acaso e afete certas características do vírus, como as que acontecem na porção RBD, podem fazer com que ele seja mais eficiente para entrar na célula humana. Se ele infecta mais as pessoas, a carga viral pode ser maior e, consequentemente, a chance de haver transmissão e infecção de outra pessoa é mais alta. Como a sequência do vírus SARs Cov-2 é curta e relativamente simples, eventualmente mudanças ao acaso no genoma dele podem ser adaptativas no sentido positivo, para o vírus.

Outra preocupação tem sido descobrir se as mutações têm potencial para driblar a imunização gerada pelas vacinas ou por infecções anteriores. Um estudo preliminar com experimentos *in vitro* apresentou resultados alarmantes de que as mudanças naturais, que têm surgido em SARS-CoV-2, teriam o potencial para escapar de uma resposta imune eficaz e que, portanto, deve-se buscar por vacinas que consigam controlar as formas emergentes do vírus. Se esse for o caso, haverá um esforço contínuo no sentido de aprimorar as vacinas, como vemos no caso da gripe (influenza). Por outro lado, as empresas que desenvolveram algumas das vacinas (no caso a *Pfizer*) insistem que é pouco provável que essas mutações afetem a eficácia das mesmas, considerando que elas foram experimentalmente testadas com formas diferentes do coronavírus. Mais investigações sobre esse tema ainda são necessárias e, de qualquer modo, é preciso focar na imunização do maior número de pessoas possíveis com as vacinas disponíveis, mesmo que a eficiência delas possa ser parcialmente reduzida (se é que isso acontecerá) para novas linhagens.



Modelagem epidemiológica e o aumento da capacidade de transmissão do vírus

A expansão de uma epidemia normalmente é descrita por modelos epidemiológicos tipo SIR (de Suscetíveis, Infectados e Recuperados), que descrevem a trajetória desses três conjuntos na população de hospedeiros. A lógica do modelo mais simples é a seguinte: um patógeno (no nosso caso, o coronavírus) chega na população com um número de suscetíveis S inicial (S_0) igual ao tamanho da população (N), assumindo que não existe uma imunidade natural. À medida que o patógeno começa a infectar os hospedeiros, o número de suscetíveis diminui, assumindo que não existe reinfeção (ou seja, os recuperados – ou mortos – não voltam ao conjunto de suscetíveis). Em termos de modelo, a transferência dos indivíduos do compartimento de suscetíveis para os infectados é dada pela taxa de infecção (α), enquanto a taxa γ determina a taxa de recuperação desses infectados. A razão entre as duas taxas (α/γ) é o chamado número reprodutivo R_0 , que pode ser pensado também como número médio de novos infectados que surgem a partir de um infectado inicial. Quando o R_0 é maior do que 1, significa que as infecções ocorrem mais rápido do que as recuperações, de modo que a epidemia está, de fato, acelerando.

Na prática, o R_0 é a condição inicial das transmissões, mas à medida que o número de suscetíveis diminui, a probabilidade de novas infecções começa a diminuir, de modo que há uma relação inversa entre a proporção de suscetíveis e o número de transmissões. Nesse modelo, portanto, à medida que o tempo passa o R efetivo (R_e) é dado por $R_0 * S/N$. Com isso, cria-se um comportamento logístico no número de infectados e o número de infectados por tempo forma uma onda, um crescimento acelerado. A epidemia cresce de forma acelerada, chega em um pico e depois começa

a diminuir (pois o número de pessoas na população que ainda são suscetíveis é pequeno). No caso do coronavírus, o R_0 aparentemente estaria em torno de 2,5 ou 3,0, mas certamente esse número se reduz a partir do momento que se implementam medidas de distanciamento e isolamento social ou quarentena e depende de uma série de fatores.

A importância epidemiológica das mutações na proteína *Spike* pode ser entendida exatamente no contexto do R_0 , pois na Inglaterra e em outros países da Europa estima-se que essa nova linhagem com a mutação N501Y possua um R_0 entre 50% e 70% maior do que a linhagem originalmente mais comum até então. A redução do R_0 para R_e pode ser ainda menor se houver uma possibilidade maior de reinfeção por causa da mutação E484K, pois a nova linhagem pode ser mais eficiente em termos de se contrapor às defesas imunológicas do hospedeiro. Desse modo, ela se expande mais rápido e requer uma atitude mais enérgica das autoridades na tentativa de controlá-la. É importante destacar que embora o R_0 seja sempre entendido como uma **medida ecológica** de crescimento da população de infectados, na realidade ele termina sendo exatamente a medida de **aptidão darwiniana** do SARS-CoV-2, assumindo uma correlação entre a multiplicação no nível celular e uma maior transmissão entre os hospedeiros.

Para ilustrar o processo adaptativo é possível utilizar um modelo SIR simples, começando com uma população humana vivendo em uma cidade de 1 milhão de habitantes. Nessa cidade chegam 10 indivíduos infectados pelo coronavírus e começam a transmitir o vírus para outras pessoas. Para simplificar, é possível assumir que rapidamente as autoridades de saúde detectam a chegada da pandemia na cidade, pois existe de fato um evento de migração a partir de outros locais e implementam diferentes medidas de isolamento social que reduzem rapidamente o R_e , logo no início, para algo em torno de 1,25 (ou seja, cada 100 pessoas infectadas transmitem o vírus para outras 125 pessoas), uma redução em torno de 50% em relação ao R_0 . Assumindo também, para fins de simplificação, que o intervalo serial (o tempo entre as gerações) é entre a infecção e o máximo de transmissões, que ocorre em uma semana. Na verdade, o intervalo é

Modelagem epidemiológica – é a construção de modelos matemáticos que descrevem o comportamento de uma doença na população durante uma epidemia. É uma ferramenta extremamente importante para direcionar práticas de contenção da doença.

Medidas ecológicas de crescimento da população – métricas definidas a partir das taxas de natalidade e mortalidade e sua variação ao longo do tempo.

Aptidão darwiniana – considera que os organismos melhor adaptados ao meio em que vivem possuem maiores chances de deixar descendentes férteis que os organismos menos adaptados.

um pouco menor, pois é possível observar um pico de infectados pouco depois de 40 semanas após o início da epidemia, que é finalizado após cerca de 70 semanas, com cerca de 38% da população já tendo sido infectada. Note-se que, nessa simulação simples, está sendo demonstrado apenas o número de infectados, ou seja, todas as pessoas que tiveram contato com

o vírus, incluindo aquelas pessoas assintomáticas. Se houver interesse em avaliar o número de casos graves, hospitalizações ou óbitos, é possível utilizar as frequências desses eventos e estimá-los a partir do número de infectados. Por exemplo, para pensar em letalidade, utiliza-se o IFR (do inglês *Infected Fatality Rate*) que para a COVID-19 está em torno de 0,5%.

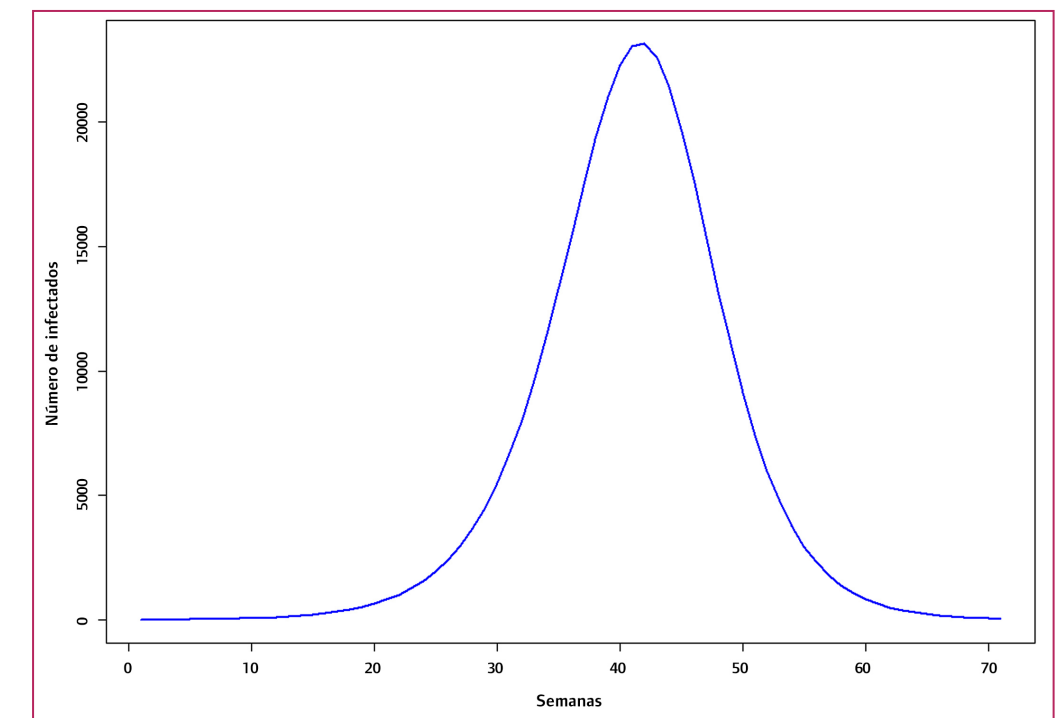


Figura 3. Distribuição do número de infecções por SARS-CoV-2 ao longo das semanas considerando um modelo epidemiológico do tipo SIR (Suscetíveis, Infectados e Recuperados).

Este modelo inicial, entretanto, não considera o fato de que o SARS-CoV-2 está em constante evolução, como discutido anteriormente. Entretanto, se a linhagem com mutações como a N501Y possui uma maior capacidade de transmissão, significa que as duas variantes possuirão dinâmicas diferentes ao longo do tempo e, na perspectiva do vírus, a linhagem com a mutação N501Y é mais adaptada do que a linhagem ancestral. Assim, é possível refazer a simulação apresentada anteriormente e imaginar que uma linhagem com a mutação N501Y chega na cidade na semana 40 e consegue uma capacidade de transmissão 70% maior do que a linhagem original. Neste caso, o que apareceria sob um ponto de vista puramente epidemiológico seria uma 2ª onda de contaminações e casos aparecendo na população (Figura 4A), mas que, na verdade, isso seria em função da diminuição da linhagem representada em azul

e crescimento da linhagem com a mutação N501Y (curva vermelha da Figura 4B), que passou a ter uma trajetória independente da linhagem ancestral. Note que, como a linhagem com a mutação N501Y possui uma maior transmissão, o pico da epidemia é mais alto.

É importante ressaltar também que, no modelo simples, o número de suscetíveis diminui com o total das infecções da Figura 4A, pois a simulação assume que alguém contaminado com a linhagem ancestral não se infectaria com a linhagem que apresenta a mutação N501Y. Mas, é possível que uma nova mutação seja capaz de infectar pessoas que tenham sido infectadas pela linhagem ancestral, o que parece ocorrer da linhagem com a mutação E484K. Se este realmente for o caso, a curva da linhagem mutante crescerá de forma ainda mais rápida, requerendo medidas mais rígidas de isolamento social e

quarentena, a fim de conter o avanço da pandemia. Não há evidência ainda de que isso acontece, mas nada impede que novas mutações gerem linhagens com maior patogenicidade, e nesse caso, nos modelos, o número de hospitalizações e de óbitos também seria diferente para essa linhagem. Ainda é possível determinar se realmente a 2ª. onda que

passou a ocorrer no Brasil a partir do final de 2020 é função da chegada de linhagens com novas mutações, ou se ela é principalmente fruto do aumento das transmissões por uma diminuição drástica do isolamento social a partir desse período. Em Manaus, o recrudescimento da epidemia, que causou um forte colapso no sistema de saúde no início de

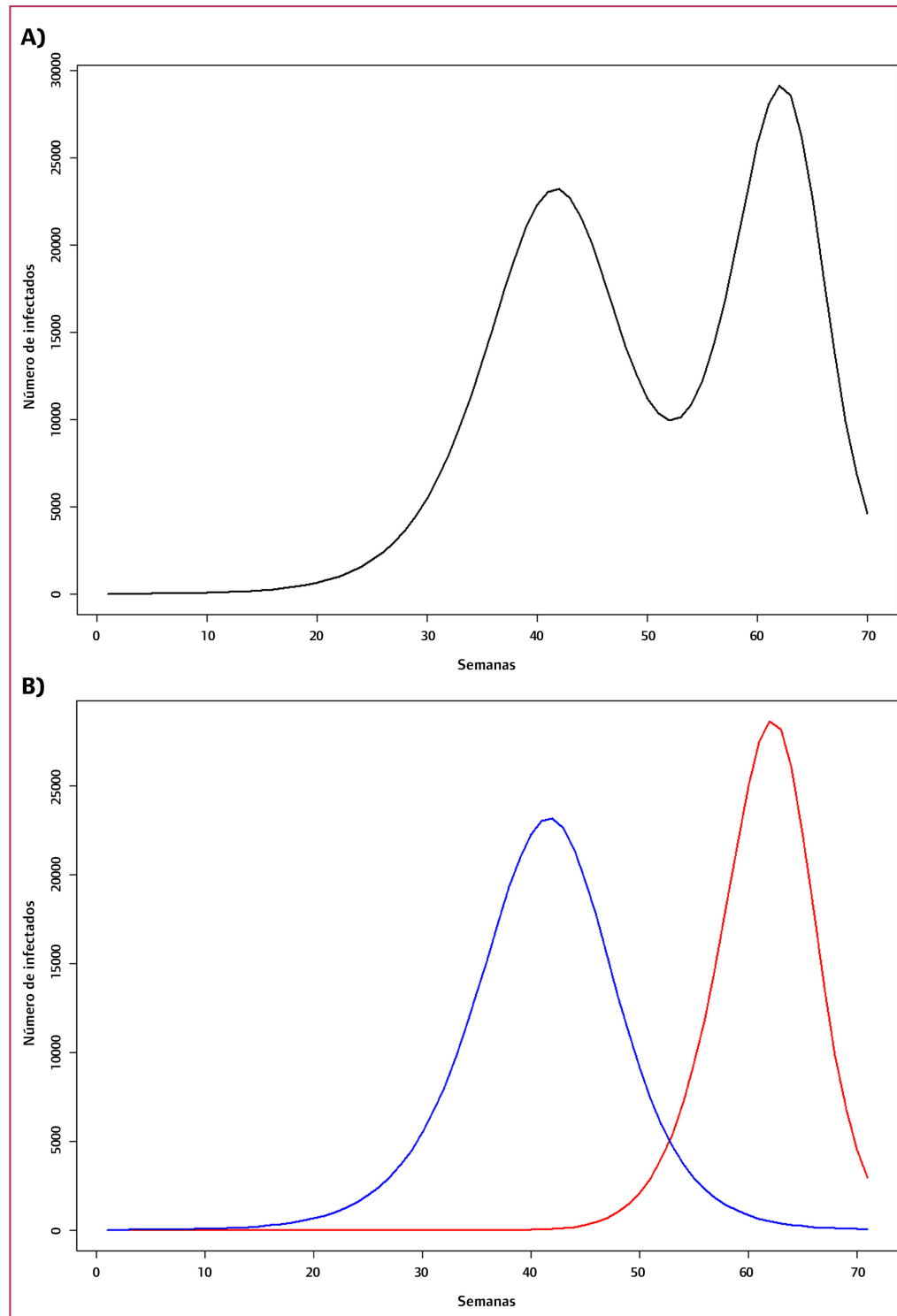


Figura 4. Distribuição do número de infectados por SARS-CoV-2 ao longo do tempo considerando um modelo epidemiológico SIR simples. **A)** O surgimento de uma mutação que confere maior capacidade de transmissão gerando uma segunda onda de infecções; e **B)** Linha azul é a distribuição da primeira onda de infecções e, a vermelha, a da segunda gerada pela nova variante.

2021, pode estar associado à linhagem P1 de forma mais clara. Na Inglaterra e em outros países da Europa a associação de um maior crescimento da pandemia com um aumento de frequência da linhagem com a mutação N501Y é mais clara, mesmo após o início da vacinação em dezembro de 2020.

Considerações finais

Em um sentido mais amplo, é importante entender que, para além da própria dinâmica ecológica e epidemiológica envolvida na pandemia, que é mais amplamente discutida nos meios de comunicação, existe também, na perspectiva do vírus uma dinâmica evolutiva subjacente que pode ter consequências aplicadas importantes. Assim, é preciso continuar estudando os genomas do SARS-CoV-2 e entender suas mudanças, principalmente em busca de linhagens que possam apresentar variações adaptativas com implicações epidemiológicas. Essa é uma importante contribuição científica que a Genética e a Biologia Molecular têm dado para mitigar os efeitos da pandemia, algo que também precisa ser ressaltado em um contexto de ensino.

Certamente é possível também tirar muitas lições importantes da pandemia em termos de ensino de evolução. Em síntese, um professor pode mostrar que as mutações que acontecem no coronavírus em geral são neutras e permitem rastrear a expansão da pandemia a partir da sua fixação em diferentes populações (deriva genética e processos relacionados), que são alcançadas por processos contínuos de migração. Entretanto, em algumas situações essas mutações podem ser adaptativas, estando sujeitas, portanto, à ação da seleção natural. Esse efeito se reflete em uma mudança de parâmetros epidemiológicos relacionados principalmente a uma maior capacidade de transmissão e um aumento no número de casos e óbitos, e isso já foi observado em alguns lugares do mundo. Espera-se que a ilustração da dinâmica evolutiva a partir do que se conhece sobre

a origem e expansão da pandemia da COVID-19, melhore a compreensão geral sobre a evolução e seus processos, pois é possível demonstrar a existência dessa dinâmica em um contexto mais próximo do cotidiano das pessoas, em relação a um assunto que tem sido amplamente discutido no caso da atual pandemia que gerou um grande impacto social.

Para saber mais:

- BADAIN et al., (2021). *Observatório Covid-19 BR*. Disponível em: <<https://covid19br.github.io/analises.html?aba=aba15>> Acessado em: 15/01/2021.
- CANDIDO, D. S. et al. Evolution and epidemic spread of SARS-CoV-2 in Brazil. *Science*, v. 369, n. 6508, p. 1255-1260, 2020.
- CARBINATTO, B. (2020). *Por que sequenciar o genoma do novo coronavírus é importante*. Disponível em: < <https://super.abril.com.br/ciencia/por-que-sequenciar-o-genoma-do-novo-coronavirus-e-importante/>> Acessado em:
- CORUM, J.; ZIMMER, C. (2021). *Inside the B.1.1.7 Coronavirus Variant*. Disponível em: <<https://www.nytimes.com/interactive/2021/health/coronavirus-mutations-B117-variant.html>>, Acessado em: 15/01/2021.
- FARIA, N. R. et al. (2021). Genomic characterization of an emergent SARS-CoV-2 lineage in Manaus: preliminary findings. Disponível em: < <https://virological.org/t/genomic-characterisation-of-an-emergent-sars-cov-2-lineage-in-manaus-preliminary-findings/586> >, acessado em: 15/01/2021.
- GISAID (2021). Genomic epidemiology of hCoV-19. Disponível em: <<https://www.gisaid.org/phylogenetics/global/nextstrain/>> Acessado em: 15/01/2021.
- NAVECA, F. et al. (2021). Phylogenetic relationship of SARS-CoV-2 sequences from Amazonas with emerging Brazilian variants harboring mutations E484K and N501Y in the Spike protein. Disponível em: < <https://virological.org/t/phylogenetic-relationship-of-sars-cov-2-sequences-from-amazonas-with-emerging-brazilian-variants-harboring-mutations-e484k-and-n501y-in-the-spike-protein/585>>, acessado em: 15/01/2021.
- WU, F. et al. A new coronavirus associated with human respiratory disease in China. *Nature*, v. 579, n. 7798, p. 265-269, 2020.



Negacionismo, criacionismo e o ensino de evolução

Leonardo Augusto Luvison Araújo¹,
Claudio Ricardo Martins dos Reis², Ronaldo Antonio Paes³

¹ Pós-doutorando, Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP

² Instituto de Biologia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA

³ Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Campus Feliz, RS

Autor para correspondência - luvison@usp.br

Palavras-chave: criacionismo, design inteligente, negacionismo, pseudociência, fake news, ensino de evolução

Ciência e criacionismo não são necessariamente incompatíveis, se caracterizarmos o criacionismo como toda e qualquer visão de mundo que supõe um criador divino. No entanto, certos grupos criacionistas com grande influência e poder em nossas sociedades são negacionistas científicos. O termo negacionismo é usado para descrever uma rejeição sistemática relativa a fatos e teorias bem estabelecidos na ciência. Como veremos, os diferentes grupos negacionistas compartilham uma série de estratégias empregadas para a distorção e negação da ciência. Por fim, discutiremos algumas afirmações antievolucionistas que podem surgir nas aulas de biologia e forneceremos sugestões de como lidar com elas.



Criacionismo e Design Inteligente

Criacionismo é um termo que engloba uma gama de visões de mundo. Nesse sentido, há múltiplos criacionismos. Geralmente, o que os une é a crença de que o universo, a Terra e os seres vivos foram criados por alguma(s) entidade(s) divina(s). Na medida em que a ciência não lida com a questão da existência ou não de um criador, o criacionismo pode ser compatível com o conhecimento científico, uma vez que a compreensão e a aceitação da ciência e da teoria evolutiva, por exemplo, não pressupõem uma visão de mundo naturalista, isto é, uma visão que negue o divino ou sobrenatural. Em decorrência, tem-se que ciência e a evolução biológica são compatíveis com outras visões de mundo (não naturalistas).

Existem muitos evolucionistas que acreditam num criador, assim como pessoas religiosas que aceitam a teoria evolutiva. Em ambos os casos, o sucesso está em não misturá-los. Cientistas (que também podem ser religiosos) não procuram por hipóteses sobrenaturais quando estão fazendo ciência. Analogamente, religiosos podem entender a evolução como a forma que a divindade utilizou para originar suas criações. Portanto, não há nada de inerentemente incompatível entre ciência e religião, nem entre evolução e criação.

Outra coisa é o negacionismo científico, que pode ser oriundo de movimentos criacionistas, e não é um fenômeno novo. Um caso emblemático e bastante conhecido ocorreu em 1925 nos EUA, com o professor John T. Scopes. O professor foi condenado por ensinar a teoria da evolução em suas aulas, o que violava uma lei estadual da época. Mais recentemente, o negacionismo da evolução manifesta-se em movimentos como o criacionismo “científico” e o design inteligente. O primeiro foi um termo cunhado pelos próprios criacionistas estadunidenses, no início dos anos 1980, como parte de uma estratégia para superar a proibição legal de ensinar uma visão explicitamente religiosa nas escolas públicas norte-americanas. Ao defender uma ideia de criação cientificamente embasada, o criacionismo científico esperava abrir uma fenda na constituição norte-americana sobre a laicidade.

O chamado movimento do design inteligente tem sua origem no criacionismo científico e, estrategicamente, é mais sutil. De modo a evitar uma caracterização religiosa, ele se desvincta de uma menção explícita ao criador. Com outro nome, com outra estratégia e comprometido com uma tese aparentemente mais fraca que a dos criacionistas científicos. Os postulantes do design inteligente esperavam alcançar um estatuto científico definitivo ao defender a necessidade de um projetista devido à complexidade supostamente irredutível dos seres vivos.

No entanto, esse movimento defende uma premissa comum a todas as versões do criacionismo: a ideia de que “algo” foi responsável por projetar (intencionalmente) os seres vivos. Em outros termos, o design inteligente compromete-se com a suposição de que as características dos seres vivos requerem a intervenção de um projetista. O primeiro problema é que esse movimento se pretende *científico*. Contudo, ao tratar a suposição de um projetista como ciência, o design inteligente explicita seu caráter pseudocientífico. O segundo problema é que ele *nega* e *combate* uma teoria científica bem estabelecida por evidências, a teoria da evolução. O terceiro problema é que ele busca a derrubada do materialismo e de seus legados na cultura, com o objetivo de *substituí-lo* por uma compreensão deísta da natureza. Esses pontos estão presentes em um documento publicado em 1999 pelo *Discovery Institute*, principal propagador do design inteligente, expondo um plano conhecido como “estratégia da cunha”.

No contexto brasileiro, a presença de organizações negacionistas da evolução remonta pelo menos ao ano 1972, com a fundação da Sociedade Criacionista Brasileira. Por sua vez, o movimento do design inteligente chegou mais tardiamente ao Brasil, com a fundação, em 2014, da Sociedade Brasileira do Design Inteligente. Três anos depois, em 2017, as atividades do movimento foram aprofundadas, com a criação de uma parceria da Universidade Presbiteriana Mackenzie com o *Discovery Institute*. Nos últimos anos, a ascensão de um cenário político mais conservador e negacionista, tanto no Brasil como em outros países, indica o provável fortalecimento desses grupos e a necessidade de estarmos intelectual e

socialmente bem preparados para lidar com o negacionismo da teoria evolutiva.

Com objetivo de caracterizar e compreender a atuação dos movimentos negacionistas – como o design inteligente –, discutiremos a seguir estratégias relevantes e comuns a esses movimentos. Como veremos adiante, essa discussão trará elementos que contribuem para o ensino de evolução em nosso contexto atual.

Negacionismo científico

Todos os exemplos do quadro 1 são rejeições a fatos e a teorias bem estabelecidos na ciência. Os termos negacionismo e negação da ciência são agora utilizados para descrever essa rejeição sistemática de afirmações bem apoiadas por evidências, mas indesejáveis para determinadas pessoas ou grupos de interesse. Entre vários exemplos, estão os negacionistas da mudança climática, negacionistas do holocausto e negacionistas da evolução. Os movimentos negacionistas compartilham não apenas uma posição, mas uma série de estratégias comumente empregadas para a negação da ciência. Apresentamos algumas delas a seguir:

Avaliação parcial. Para formar um juízo científico bem fundamentado, é essencial avaliar adequadamente o corpo de evidências. Em muitos casos, podemos encontrar pesquisas que apoiaram uma afirmação diferente daquela que é atualmente aceita com base no corpo adequado de evidências. Isso não é um problema, é parte da própria dinâmica da ciência. É assim que a ciência progride. Contudo, os

negacionistas costumam apelar para essas pesquisas isoladas com o objetivo de minar os consensos científicos. Um exemplo atual é a recomendação do fármaco conhecido como cloroquina para o tratamento da Covid-19. Há pesquisas que relatam efeito *in vitro* desse medicamento contra o vírus SARS-Cov-2. Também há estudos clínicos observacionais que relatam melhora no quadro dos pacientes tratados com cloroquina. No entanto, a maioria esmagadora das pesquisas com alta qualidade de evidência – como ensaios clínicos randomizados bem delineados e metanálises com estudos robustos – mostraram que não há evidência clínica forte de eficácia da cloroquina no tratamento da Covid-19, seja ela administrada sozinha ou em combinação com azitromicina. Além disso, esses estudos concluíram que o tratamento com tais medicamentos pode levar a problemas cardíacos severos, entre outros efeitos colaterais. A partir do corpo adequado de evidências, os cientistas estabeleceram um consenso contrário à utilização da cloroquina como tratamento para a Covid-19, e estão em busca de outras possibilidades. No entanto, os negacionistas não estão preocupados com o consenso científico, pelo contrário, eles visam minar tal consenso através de um conjunto de estratégias, entre elas, a avaliação parcial das evidências. A defesa atual da cloroquina – medicamento para o qual se chegou a cantar o hino nacional brasileiro – para tratamento da Covid-19 constitui uma posição expressamente negacionista, mostrando que políticos, ministérios e governos, mesmo os ditos “democráticos” (como o do Brasil), estão promovendo o negacionismo.

Quadro 1.
Exemplos de afirmações negacionistas.

- Vacinas não são seguras e efetivas.
- As espécies atuais não possuem um ancestral comum.
- A Terra é jovem e não possui bilhões de anos.
- Atividades humanas não possuem um papel relevante no aquecimento global.
- A ditadura militar brasileira não colocou em prática uma política de perseguição, prisão, tortura e desaparecimento de centenas de pessoas.

O que essas afirmações possuem em comum?



Interpretação relativista da mudança científica. A ciência muda com o tempo e sua dinâmica envolve a assimilação de novos conhecimentos, muitas vezes com a refutação ou abandono de afirmações anteriores. Os negacionistas, por sua vez, são extremamente relutantes em desistir de suas ideias. Uma estratégia negacionista comum é argumentar no debate público que a mudança científica é um sintoma da baixa confiabilidade da ciência. É interessante notar que há uma conexão estreita entre a interpretação relativista da mudança científica e a característica anterior, a avaliação parcial. A postura de escolher apenas as informações que se quer, deixando de fora as que contradizem tais afirmações, acaba por inviabilizar qualquer modificação do conhecimento. A avaliação parcial e a interpretação relativista da mudança científica reforçam-se mutuamente e podem ser vistas como duas faces de uma mesma moeda viciada, o negacionismo.

Expectativas impossíveis sobre a pesquisa científica. Está implícito na estratégia anterior que a ciência deveria ser imutável e infalível. Essa é uma expectativa impossível, na medida em que pedir certeza total às conclusões científicas expressa uma visão um tanto ultrapassada do que seja ciência. No entanto, os negacionistas buscam minar os consensos científicos com base nessas expectativas, impossíveis de serem satisfeitas. Um exemplo é a crítica por parte de certos grupos criacionistas de que a escassez de formas transicionais no registro fóssil seria uma debilidade da teoria evolutiva. Mas o registro fóssil é necessariamente incompleto, pois a fossilização é um evento raro e depende de uma série de fatores geológicos. Mesmo assim, temos um grande conjunto de fósseis que apoiam extraordinariamente bem a evolução. A título de exemplo, podemos citar os fósseis relacionados com a origem dos cavalos e dos cetáceos modernos. Além disso, as evidências da evolução não se restringem à paleontologia e estão dispersas por todas as áreas da biologia.

Fabricação de controvérsias falsas. Incapazes de convencer o público de que apenas as próprias considerações merecem ser

levadas a sério, os negacionistas adotam a estratégia de alegar que a questão está aberta e sujeita a uma genuína controvérsia científica. Essa estratégia pode ser efetiva porque o público em geral e mesmo os tomadores de decisão geralmente não são treinados para reconhecer debates científicos genuínos. Afinal, são os especialistas da área que conseguem distinguir os resultados de um único estudo, de um punhado de estudos e os consensos científicos estabelecidos ao longo do tempo. A própria qualidade científica de estudos individuais pode ser difícil de ser averiguada para a maioria das pessoas. Essas são dificuldades que os negacionistas exploram e conduzem de maneira habilidosa. Um exemplo é o uso do mote “Ensine a Controvérsia” por defensores do design inteligente. Discutiremos esse exemplo mais adiante.

Uso de teorias da conspiração e de falsos especialistas. Com frequência, os negacionistas propõem que uma conspiração complexa e secreta seria responsável pelo corpo de evidências científicas e consensos estabelecidos, garantindo assim que os negacionistas não sejam desencorajados pelo isolamento extremo de suas teorias. Pelo contrário, esse isolamento é visto por eles como um sinal de coragem intelectual contra a “ortodoxia” da ciência. As teorias da conspiração muitas vezes são complementadas pela difamação de especialistas estabelecidos do campo científico, incluindo o questionamento de suas credenciais, integridade e motivos. A ironia é que geralmente os negacionistas não são especialistas da área, além de eles próprios serem motivados por razões alheias à produção do conhecimento. Um exemplo é o fato de que o maior expoente do design inteligente no Brasil é um químico literalista bíblico.

Apesar dessas estratégias negacionistas não serem novidade, elas têm ganhado força nos últimos anos por se alinharem ao que alguns autores têm chamado de fenômeno da “pós-verdade”. Este termo tomou a atenção do público no contexto do Brexit, na Grã-Bretanha, e no uso crescente de campanhas políticas para desinformação na Hungria, Rússia, EUA, Turquia e Brasil.

A chamada pós-verdade não é apenas parte de uma retórica política que aparentemente sempre existiu. É preciso considerar suas especificidades para entender de que forma ela reforça iniciativas negacionistas. Um dos aspectos centrais desse fenômeno é a disposição de adotar uma “ignorância intencional”, que é a tendência a afirmar algo sem se preocupar em descobrir se as informações estão corretas. É uma indiferença descuidada dos fatos. Outro aspecto característico é o favorecimento de crenças preexistentes. A pós-verdade estabelece um padrão de ceticismo muito grande para crenças em que não se quer acreditar, combinada com a credulidade completa em relação a quaisquer afirmações que reforcem uma agenda prévia. A combinação da ignorância intencional com o favorecimento de crenças preexistentes indica uma despreocupação com as condições objetivas do mundo. Em outros termos, indica que afirmações empíricas não estão sendo avaliadas empiricamente, mas apenas em termos de sua utilidade para reforçar uma agenda prévia.

Em resumo, as estratégias negacionistas têm encontrado terreno fértil num contexto de desinformação e de subordinação política da realidade. Esse contexto coloca desafios imensos aos professores de biologia e de ciências, que precisarão atuar de modo efetivo e crítico num cenário desolador. A tendência é que os professores enfrentem esses desafios cada vez mais, especialmente no que se refere ao ensino de evolução.

Ensino de Evolução

Os desafios ao ensino de evolução são amplamente discutidos na literatura acadêmica. São múltiplos os fatores que contribuem para as dificuldades de ensino de evolução, como abordagens inadequadas em livros didáticos, formação insuficiente de professores e dificuldades conceituais básicas. O fortalecimento de discursos negacionistas sobre o pensamento evolutivo insere-se, portanto, em um contexto de ensino que já enfrenta muitas dificuldades.

No que segue, discutiremos algumas questões e afirmações que flertam com o negacio-

nismo e que podem surgir na sala de aula dos professores de biologia e ciências. Também apresentaremos sugestões de como lidar com tais situações.

O ensino de ciências deve dedicar tempo igual à teoria evolutiva e às controvérsias sobre evolução?

O professor pode se deparar com a afirmação de que a evolução é uma teoria controversa e, portanto, seria apropriado ensinar a controvérsia sobre evolução nas aulas de ciências e de biologia. “Ensine a controvérsia” é um mote ou *slogan* perpetuado no início deste século pelo *Discovery Institute*, a casa institucional do design inteligente. A intenção não é fazer com que os alunos investiguem desacordos científicos sobre padrões e processos evolutivos, mas debater em sala de aula se a evolução realmente ocorre. Trata-se de uma confusão (intencional) porque a comunidade científica que investiga o assunto é unânime sobre o fato de que a evolução ocorre e não serão encontradas instituições científicas que atualmente defendem ou pressupõem o fixismo, isto é, que os seres vivos não passam por mudanças ao longo do tempo. Simplesmente não há debate científico sobre se a evolução ocorre. A evolução é um fato, e a teoria evolutiva busca explicar esse fato, o que não significa que determinados aspectos da teoria evolutiva estejam livres de desacordos entre biólogos. No entanto, a discussão genuína não é se a evolução ocorre, mas *como* ela ocorre.

À primeira vista, a reivindicação para “ensinar a controvérsia” pode parecer democrática e pluralista, mas essa reivindicação foi instrumentalizada numa jogada de *marketing* pelo design inteligente. Trata-se da estratégia que vimos na seção anterior e que denominamos como *fabricação de controvérsias falsas*. Ao colocar a teoria evolutiva e ideias que negam a evolução em pé de igualdade – como dois lados de uma controvérsia científica genuína – o design inteligente simplesmente confunde opinião e conhecimento. Em outros termos, não é capaz de distinguir pensamento



desejoso (*wishful thinking*), por um lado, de teorias empiricamente bem embasadas, por outro. Essa confusão tem nome e constitui uma versão radical de relativismo epistêmico.

No entanto, o movimento do design inteligente não pode ser confundido com a dúvida sincera de algum estudante. O primeiro é um movimento negacionista que utiliza *slogans* como estratégia para ampliar seu poder político e convencimento social. Por sua vez, se estudantes possuírem dúvidas genuínas sobre possíveis controvérsias sobre a evolução, o professor (ou professora) precisa responder adequadamente. Uma boa resposta envolve destacar que não há controvérsia científica sobre a ocorrência da evolução. O fato de que muitas pessoas têm outras opiniões não torna essas opiniões científicas. Nas aulas de ciências, precisamos ensinar teorias bem embasadas empiricamente. Nesse sentido, os conhecimentos produzidos pelas ciências humanas e naturais não podem ser confundidos com meras opiniões ou com discursos obscuros, e os professores possuem um papel central para evitar ou desfazer tais confusões. Estes tempos requerem lucidez para não cairmos em um cientificismo arrogante e perigoso, mas também não podemos assumir um relativismo *sem limites*.

– Professor, não vou acompanhar as aulas sobre evolução porque a teoria vai contra a minha religião

Muitos professores já enfrentaram a triste situação de ter um estudante que se recusa a aprender evolução por conta de alguma instrução prévia da família ou comunidade religiosa. Nesse caso, a estratégia mais comum dos professores é explicar ao aluno que nas aulas de biologia aprendemos sobre o conhecimento científico, e que o aprendizado da teoria evolutiva não precisa entrar em conflito com as crenças pessoais.

Uma forma de entender como cientistas e religiosos conseguem compatibilizar suas crenças é compreendendo que evolução e religião estão em domínios diferentes. A ciência trata de questões relacionadas com fenômenos na-

turais, enquanto a religião lida com questões que estão para além do mundo natural. Essa visão é explicada por Stephen Jay Gould, em seu livro *Pilares do Tempo*:

(...) a esfera ou magistério da ciência engloba o mundo empírico: de que é feito o universo (fato) e por que ele funciona de determinada maneira (teoria). O magistério da religião engloba questões de significado e valor moral. (Gould, 2002, p. 13).

No entanto, muitas vezes essa distinção não surte efeito, e o estudante continua resistente ao conhecimento científico. Outra estratégia utilizada envolve apresentar um argumento mais pragmático ao estudante: a teoria evolutiva é cobrada em exames escolares e de acesso ao ensino superior, então o aluno não pode deixar de aprender este conteúdo. Contudo, tal estratégia parece mais afastar o estudante de uma aprendizagem significativa do que convidá-lo para conhecer genuinamente aspectos do pensamento evolutivo.

Diante da negação da ciência, muitos educadores ou cientistas partem para outra estratégia, que envolve acumular evidências e aprofundar as explicações científicas com rigor. No entanto, alguns estudos recentes sugerem que essa estratégia tem baixa eficácia em diminuir a adesão de estudantes a discursos negacionistas. Quando explicações científicas conflitam com concepções prévias e bastante arraigadas dos estudantes, aprofundar a explicação pode levar a um efeito “ tiro-pela-culatra ” (*backfire effect*). Esse efeito resulta de um viés cognitivo que faz com que as suposições de fundo das pessoas tornem-se mais fortes quando elas encontram evidências contrárias a suas suposições. Em outras palavras, o efeito tiro-pela-culatra é um fenômeno psicológico reativo que ocorre quando alguém apoia suas suposições originais com mais firmeza após ser apresentado a teorias e evidências que contrariam tais suposições. Por isso, é preciso que o professor fique atento às resistências prévias ao conhecimento evolutivo que os alunos trazem para a sala de aula. Simplesmente afirmar que não há conflito entre ciência e religião ou então reforçar o ensino de conceitos evolutivos pode ser ineficaz para construir uma aprendizagem significati-

va. Uma estratégia interessante, discutida na literatura sobre educação em ciências, é convidar o estudante a compreender uma visão diferente sem que ele precise acreditar em tal visão. Se o estudante for capaz de compreender a teoria evolutiva mesmo sem acreditar nela, dificilmente ele será cooptado pelos negacionistas da evolução.

- Professor, recebi no “Whats” que p. (p = uma fake news sobre evolução)

Muitas vezes os alunos trazem para a sala de aula informações que, sem saber, são claramente errôneas. Por exemplo, a ideia de que o ser humano “veio do macaco”, ou que, em seu leito de morte, Darwin arrependeu-se de ter desenvolvido a teoria da evolução.

Em vez de simplesmente corrigir o estudante – e encerrar a discussão – essa pode ser uma oportunidade de discutir com os alunos estratégias para distinguir a qualidade das informações que recebem no seu dia a dia. Uma forma muito mais frutífera é estimular os estudantes a discutir o que constituem boas razões para confiar nas informações que recebemos ou como avaliar fontes de informações, por exemplo.

Vivemos num contexto de propagação generalizada da desinformação, o que requer do professor de ciências uma dedicação maior de tempo ao aprendizado baseado em investigação, pois os alunos precisam estar aptos a relacionar o conhecimento científico com situações de seu cotidiano. Essa contextualização, que envolve inclusive a dinâmica das redes sociais, pode minimizar os perigos e vícios do negacionismo. Os discursos negacionistas não podem ser colocados em pé de igualdade com o conhecimento científico, mas atualmente precisam ser discutidos – criticamente – em sala de aula.

Um exemplo de estratégia que o professor pode utilizar é a chamada leitura lateral. Segundo o cientista Paulo Nussenzweig (2021), as pessoas na internet geralmente “fazem uma leitura vertical. Lêem o conteúdo do topo da página até a parte de baixo, examinando a prosa,

clicam em links internos, lêem informação sobre a página (dada pelos próprios autores), mas raramente examinam outras páginas”. A leitura lateral, por outro lado, envolve a validação de informações olhando fora do próprio site - usando o poder das pesquisas na web para fazer referência cruzada de informações recebidas até que sua confiabilidade e credibilidade possam ser estabelecidas. Em sala de aula, os professores podem introduzir a leitura lateral como uma estratégia para validar as informações que os alunos recebem. Esta atividade concentra-se em componentes como a fonte de informação, as evidências e se outras fontes confiáveis concordam com as alegações sob escrutínio.

Precisamos de estratégias para lidar com o negacionismo científico e as *fake news*. O negacionismo não se reduz a um conjunto de afirmações que negam a ciência. Ele se manifesta ativa e socialmente através de instituições, *slogans* e discursos estratégicos que buscam desinformar e minar consensos científicos. Um exemplo é o do “design inteligente”, principal movimento negacionista contra a evolução. Os professores e professoras precisam estar preparados para lidar com as consequências do negacionismo.

Referências

GOULD, S.J. *Pilares do tempo: ciência e religião na plenitude da vida*. Rio de Janeiro: Rocco, 2002.

NUSSENZWEIG, P. *Leitura lateral é arma essencial na guerra contra fake news*. Coluna Ciência e Cientistas: Rádio USP, 2021. Disponível em: <https://jornal.usp.br/radio-usp/leitura-lateral-e-arma-essencial-na-guerra-contra-fake-news/>. Acesso em 11 Jun. 2021.

Para saber mais

ABRANTES, P.; ALMEIDA, F.P.L.D. Criacionismo e darwinismo confrontam-se nos tribunais... da razão e do direito. *Episteme*, v. 11, n. 24, p. 357-402, 2006.

FREDERIK, M.S.; EL-HANI, C.N. Criacionismos, naturalismos e a prática da ciência. *Filosofia e História da Biologia*, v. 8, n. 2, p. 223-252, 2013.

HENTGES, C.R.; ARAÚJO, A.M. Uma abordagem histórico-crítica do Design Inteligente e sua chegada ao Brasil. *Filosofia e História da Biologia*, v. 15, n. 1, p. 1-19, 2020.



O pensamento evolutivo antes de Darwin



Ricardo Campos-da-Paz¹, Mário de Pinna²

¹ Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Biociências, Departamento de Ecologia e Recursos Marinhos, Rio de Janeiro, RJ

² Universidade de São Paulo, Museu de Zoologia, Seção de Peixes, São Paulo, SP

Autor para correspondência – rcpaz@unirio.br; pinna@ib.usp.br

Palavras-chave: Charles Darwin, Darwinismo, Evolucionismo, história da biologia, teoria evolutiva, transmutacionismo

O apanhado geral de ideias evolutivas, ou proto-evolutivas, pré-Darwinianas fornecido no presente artigo visa informar e esclarecer sobre o papel de alguns dos principais nomes que contribuíram com tentativas de explicações sobre a história da vida e a organização da biodiversidade, e que, em alguns casos, ajudaram a formar o substrato sobre o qual se estruturaram a teoria Darwinista e a teoria evolutiva moderna. Nossa seleção não pretende ser completa ou exaustiva, mas busca oferecer um vislumbre dos esforços e da riqueza de explicações transmutacionistas das formas de vida, ao longo de cerca de 2.500 anos de construção do pensamento naturalista e científico. Saber sobre esses predecessores de Darwin não apenas esclarece acerca dos processos históricos da construção do conhecimento, mas também ajuda a contextualizar o entendimento evolutivo com objetivos pedagógicos. Sempre que surgiram, onde quer que tenham surgido, e mesmo em versões primitivas, modelos evolutivos ou transmutacionistas podem ser considerados como as melhores explicações naturais para os fenômenos da vida.

Todas as ideias têm precedentes, e a história das ciências e das artes não foge à regra. A inovação absoluta é um evento muito raro ou inexistente na saga do pensamento humano. Quando um episódio criativo representa um salto significativo no progresso das ideias dizemos que seus autores são gênios, pois mesmo os pensadores mais revolucionários têm antecessores. Aristóteles (384-322 a.C.), Galileu Galilei (1564-1642), Isaac Newton (1643-1727), Gregor Mendel (1822-1884), Marie Curie (1867-1934), Albert Einstein (1879-1955), todos elaboraram seus pensamentos a partir de um arcabouço prévio. Sejam aliadas ou antípodas, novas ideias são sempre construídas com base em outras anteriores. Não poderia ser diferente com o naturalista inglês Charles Robert Darwin (1809-1882), considerado o criador da teoria evolutiva.

É comum ver a ideia de evolução apresentada como o produto do esforço de um único homem: Darwin. Esta versão pode ser narrativamente interessante, pois coloca Darwin como um pensador isolado e monumental, que sozinho erigiu o campo da biologia evolutiva; um fenômeno inexplicável na história da Ciência. Darwin, sem dúvida, tem um papel imenso no desenvolvimento da teoria evolutiva, sua obra é um verdadeiro divisor de águas na Ciência, na compreensão da história da vida e do nosso lugar na natureza. Contudo, é certo que ele não tirou suas ideias do nada. Charles Darwin, o pesquisador, chegou ao seu entendimento a partir de uma profunda linhagem de predecessores que se debruçaram sobre os mesmos problemas ao longo de uma extensa história.

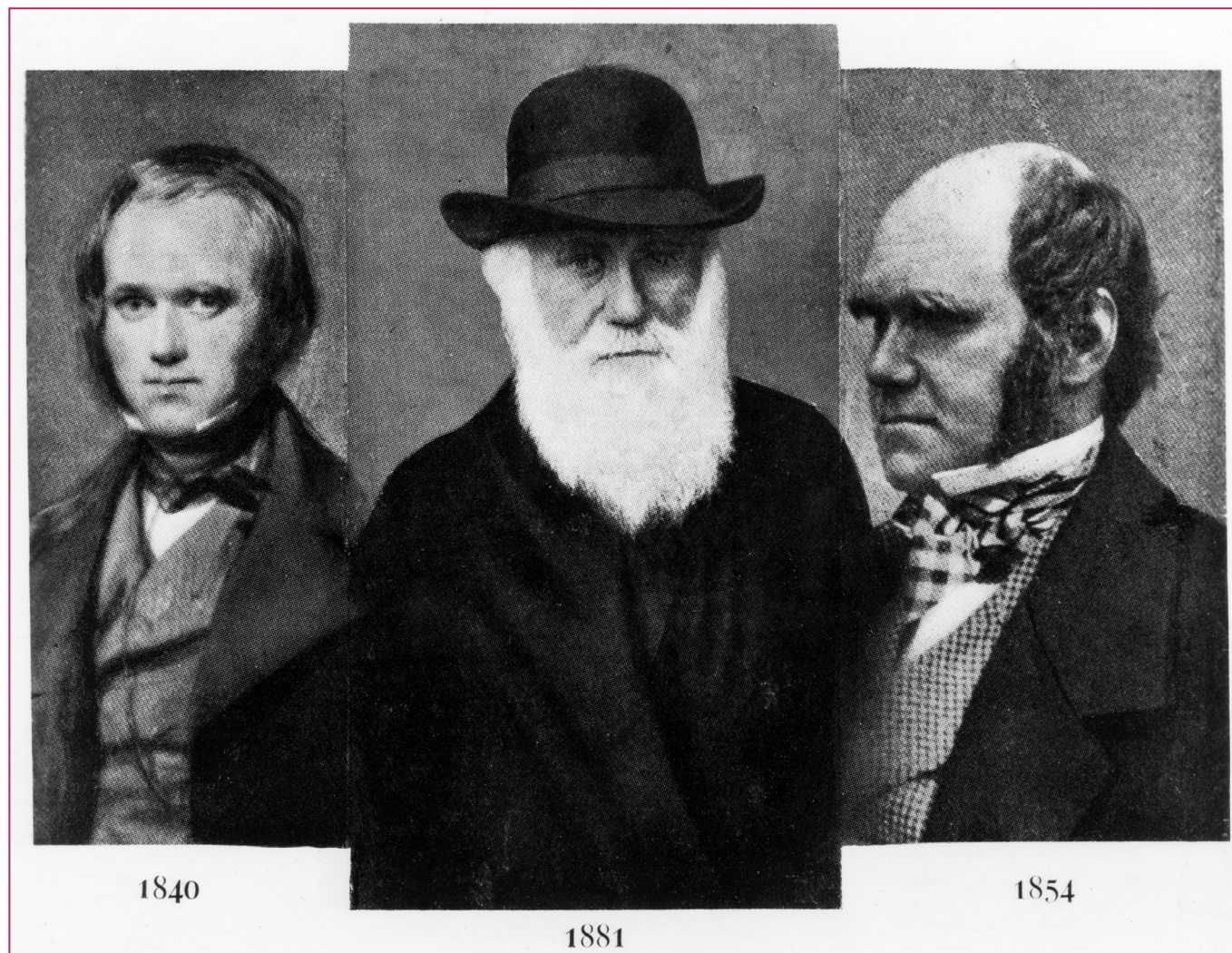


Figura 1. Charles Darwin aos 31 (esq.), 72 (centro) e 45 (dir.) anos de idade, respectivamente.

Nosso objetivo aqui é fornecer um breve apanhado sobre ideias evolucionistas vislumbradas antes da teoria proposta por Darwin. Este é um assunto rico, com uma surpreendente diversidade de tentativas de explicações naturais para os mesmos fenômenos. Algumas são bastante distantes do que hoje interpretamos como correto, outras mais próximas, mas todas buscaram explicar a diversidade dos seres vivos através de algum tipo de mecanismo de formação, uma descrição de mudança. Esta multiplicidade de tentativas nos mostra que a teoria da evolução, apesar de hoje parecer-nos muito intuitiva e natural, resulta de um longo e complexo processo: seu desenvolvimento levou mais tempo que o desenvolvimento de toda a Física clássica. Alguns antecessores de Darwin propuseram noções, ou versões, da ideia geral de transmutação de espécies, enquanto outros esbarraram no conceito de seleção natural ou, ainda, na percepção da evolução como um fenômeno populacional (e não individual). Naturalmente, nenhum deles explorou tais ideias com a profundidade que depois o fez Darwin. Independente disso, seu estudo é instrutivo sobre os mecanismos que regem o desenvolvimento científico. Na nossa experiência, a consciência desta história é eficaz no ensino e divulgação da evolução biológica. A contextualização fornecida por esse conhecimento evidencia as motivações que geraram as perguntas que, finalmente, levaram às respostas que hoje temos.

Nossa exposição segue uma ordem cronológica reversa. Começamos com a visão do próprio Darwin sobre alguns pensadores evolutivos que o precederam. Afinal, ele e suas ideias são mais familiares para todos os leitores, sendo um ponto de partida adequado. A partir daí, abordamos autores e tradições progressivamente mais antigas, lembrando nomes talvez um tanto obscuros na história da Biologia, além de ideias e interpretações que poderão parecer bizarras aos olhos de um estudante ou cientista moderno.

Os predecessores de Darwin, por Darwin

Charles Darwin iniciou uma longa jornada intelectual (ansiosamente, porém sem qualquer pressa) a partir do momento em que se convenceu do fato mais básico da evolução biológica: a possibilidade do surgimento de novos grupos de organismos a partir da modificação de outros antecessores. Até meados do século XIX, a expressão primariamente utilizada para este processo era *transmutação de espécies*. O termo *evolução*, curiosamente, costumava ser usado para se referir ao desenvolvimento embriológico e ontogenético.

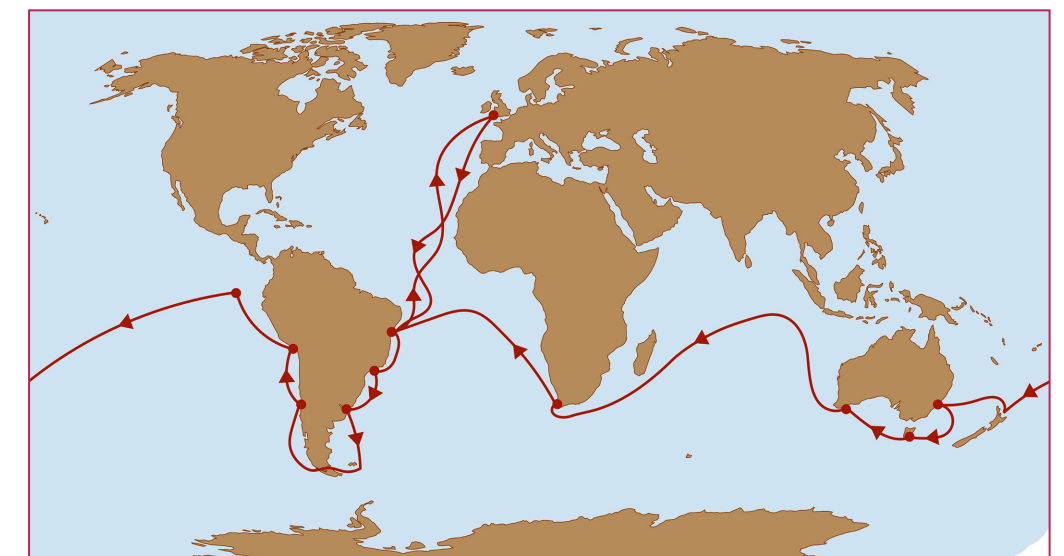


Figura 2. Trajeto da viagem de Darwin a bordo do HMS Beagle, entre dezembro de 1831 e outubro de 1836.

Após retornar à Inglaterra de sua viagem de quase cinco anos ao redor do mundo, Darwin rendeu-se a evidências de que animais e plantas, bem como o meio em que vivem, mudam *gradualmente* através do tempo. Também refletiu sobre como a eventual fragmentação de espécies ancestrais aumentaria o número de novas formas e agrupamentos, e sobre a inevitável extinção de incontáveis organismos durante a história da vida (sugerindo que o processo de mudança, qualquer que fosse sua causa, não teria como resultado a produção de formas perfeitas). Essas ideias fervilhavam à medida em que ele organizava arduamente suas anotações e o vasto material biológico e geológico (incluindo fósseis) que coletou

mundo afora, com o auxílio crucial de alguns renomados zoólogos e taxonomistas.

O trabalho minucioso de Darwin sobre suas coleções, bem como observações feitas por seus colaboradores, lançou-o em uma busca quase obsessiva por eventuais explicações naturais para o fenômeno da transmutação. Chegou efetivamente, em outubro de 1838, após ter tido contato com o estudo do economista e demógrafo inglês Thomas Malthus (1766-1843) (*Um ensaio sobre o princípio da população*, de 1798), a uma hipótese inicial sobre a lógica básica de funcionamento do mecanismo de seleção natural como processo criativo. A partir daí, construiu pacientemente sua teoria durante as duas décadas seguintes.

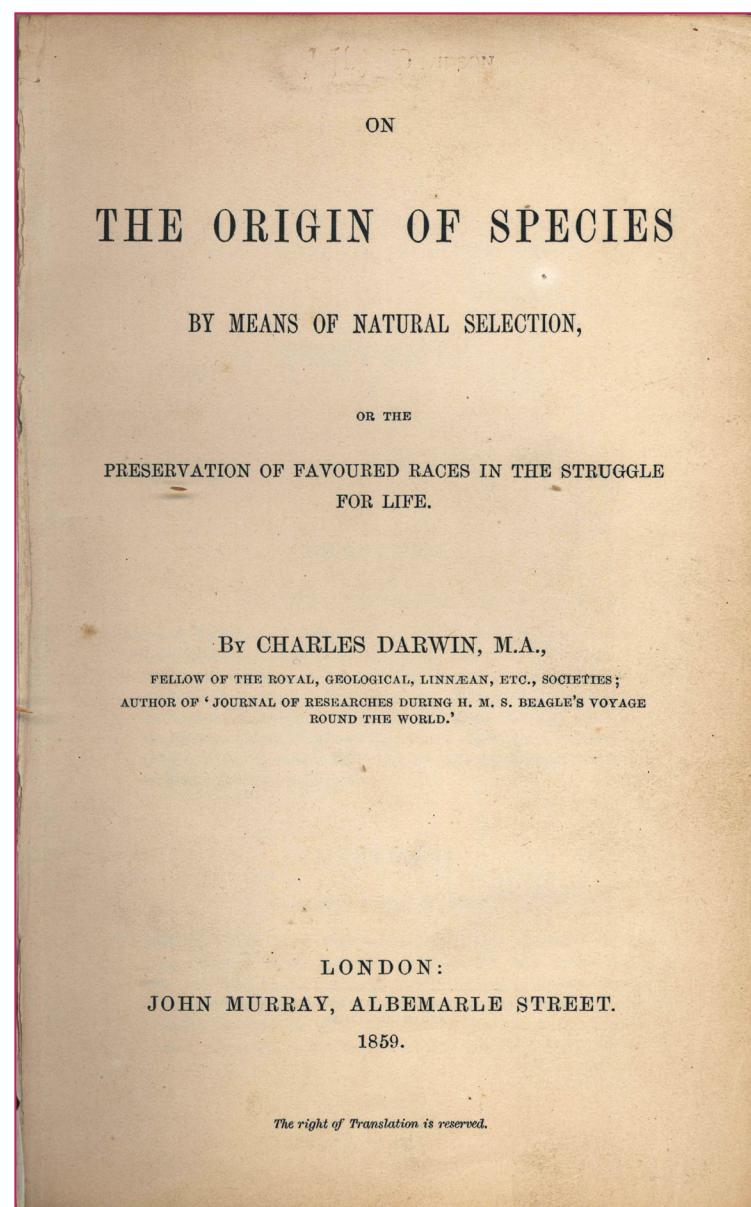


Figura 3. Primeira edição de *A origem das espécies* (1859) (John Murray, Publisher, Domínio público, via Wikimedia Commons).

O livro *A origem das espécies* (cujo título original completo é *Sobre a origem das espécies por meio da seleção natural, ou a preservação das raças favorecidas na luta pela vida*) teve sua primeira edição publicada em novembro de 1859, e a partir desta seguiram-se outras cinco até fevereiro de 1872. É a obra mais importante escrita por Darwin, reconhecida amplamente como uma das contribuições acadêmicas mais influentes da história da Humanidade. A ideia de evolução por seleção natural, isto é, o sistema básico proposto por Darwin no livro como o principal (mas não o único) na construção de novas espécies, tem sido considerada por cientistas, filósofos e historiadores como “a melhor ideia jamais pensada”, por conta de sua simplicidade, poder explicativo e impacto.

O Darwinismo, ou seja, a proposta geral de processo evolutivo concebida por Darwin, não deve ser confundido com, ou reduzido à mera noção de seleção natural. Segundo Ernst Mayr (1904-2005), ele pode ser distinguido de formulações alternativas de outros autores e pensadores evolucionistas (prévios ou posteriores) por representar uma composição única de cinco teorias, ou subteorias, sendo a seleção natural apenas uma delas. As demais são as seguintes: a *evolução* (aqui no simples sentido de transformação constante do mundo e dos organismos ao longo do tempo); a *ancestralidade*, ou *descendência comum*; a *multiplicação de espécies* (especiação); e, finalmente, o *gradualismo* (em oposição ao surgimento instantâneo de novas espécies a partir de seus antecessores, o chamado “saltacionismo”). Cada uma dessas teorias tem universos próprios de teste e averiguação, tendo percorrido caminhos independentes de comprovação nas décadas seguintes à publicação do *A origem das espécies*, enquanto se deu o desenvolvimento da Biologia (particularmente da Genética), até a organização e o estabelecimento da *Síntese Evolutiva*, entre os anos 1930 e 1940.

Nas duas primeiras edições de *A origem das espécies* (1859 e fevereiro de 1860), Darwin não organizou um histórico formal tratando dos autores prévios que mencionaram ou se debruçaram sobre ideias evolutivas ou proto-evolutivas. Sua intenção original

era mencioná-los no “prefácio” de uma obra bem mais ampla que sonhava publicar sobre sua teoria, à qual se referia como o seu *Grande livro das espécies* (“*Big species book*”). Esse projeto foi abortado após Darwin receber, em junho de 1858, a notória carta do naturalista Alfred Russel Wallace (1823-1913), enviada da Indonésia e contendo um manuscrito propondo a sua própria ideia (concebida independentemente) de evolução por seleção natural (ver adiante). Tal fato acabou por precipitar, no final do ano seguinte, a publicação do *A origem das espécies* que, apesar de ter mais de 500 páginas, era considerado por Darwin como um mero “resumo” de sua teoria.

Cobrado acerca do assunto por comentaristas e críticos da primeira edição de seu livro, em especial o matemático e clérigo Baden Powell (1796-1860), Darwin viu-se obrigado a trabalhar, durante janeiro e fevereiro de 1860, na produção de uma lista mais organizada e detalhada de nomes de naturalistas que identificou na literatura como predecesores dos principais conceitos associados à ideia de transmutação contida em seu livro. Uma versão preliminar de um histórico foi, assim, incluída já no prefácio das primeiras edições de *A origem das espécies* publicadas nos Estados Unidos e na Alemanha ainda naquele ano.

Na terceira edição do livro publicada na Inglaterra, em 1861, houve, finalmente, o acréscimo de uma curta seção inicial intitulada *Um esboço histórico do progresso da opinião, anterior a esta obra, sobre a origem das espécies* (*An historical sketch of the recent progress of opinion on the origin of species*). Nesta, Darwin comentou, brevemente, as contribuições prévias de Jean Baptiste de Lamarck (1744-1829), Étienne Geoffroy Saint-Hilaire (1772-1844), Robert Edmond Grant (1793-1874), Patrick Matthew (1790-1874), Richard Owen (1804-1892), Baden Powell e Alfred Wallace, além de outros, sobre questões referentes à transmutação das espécies e à seleção natural. Sua exposição focalizou autores a partir do início do século XIX, tendo reconhecido na ocasião seu escasso conhecimento sobre nomes mais longínquos no passado.



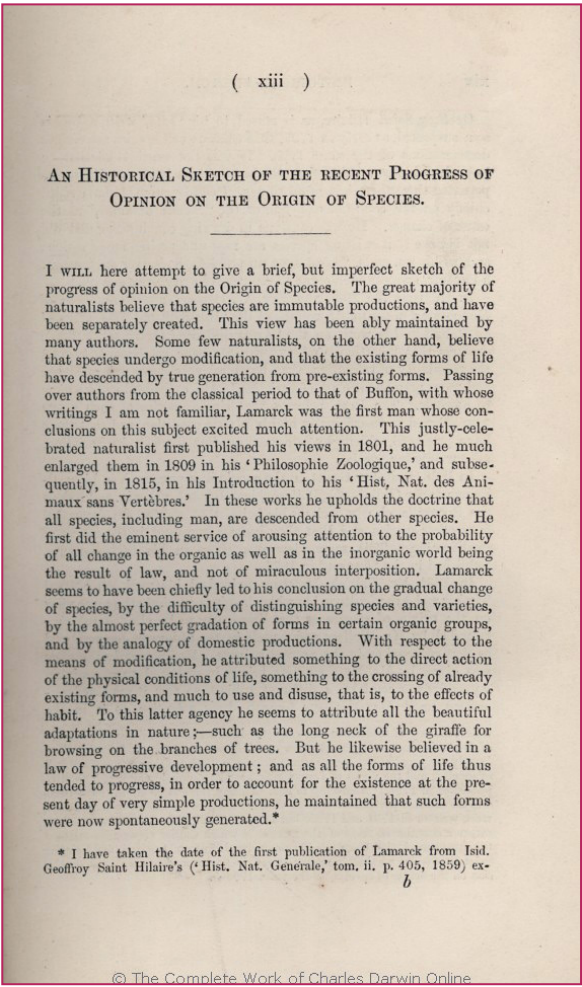


Figura 4. Página inicial da seção sobre o “Esboço histórico”, terceira edição de *A origem das espécies* (1861) (Reproduzida com permissão de John van Wyhe - The Complete Work of Charles Darwin Online [http://darwin-online.org.uk/]).

Na quarta edição de *A origem das espécies* (junho de 1866), dentre os pouco mais de trinta nomes lembrados no seu histórico como eventuais precursores de suas principais ideias, Darwin finalmente referiu-se a um pensador da antiguidade, o filósofo grego Aristóteles. A decisão de, então, incluí-lo como o primeiro nome da sua lista resultou do recebimento de uma carta enviada por um estudante do idioma grego que havia lido seu livro, James Clair Grece. Este havia enviado a Darwin a tradução precária de um texto curto, sugerindo que o mesmo representava a prova de que Aristóteles teria deduzido, em seu *Physicae ascultationes* (*Lições sobre a natureza*, em tradução livre) o conceito de seleção natural (no século IV a.C., ou seja, mais de dois mil anos antes). Aparentemente induzido por essa interpretação apressada de Grece, pela apresentação fora de contexto da passagem e, possivelmente, por sua própria disposição em citar

o filósofo que admirava, Darwin acabou cometendo um equívoco. Acreditando que, de fato, Aristóteles havia esboçado uma ideia primitiva de seleção, adicionou em uma nota de rodapé no livro aquela tradução do texto que imaginou ser de sua autoria. No entanto, o trecho enviado por Grece não havia sido escrito por Aristóteles. Era, na verdade, uma contribuição de outro filósofo grego ainda mais antigo, o pré-socrático Empédocles de Agrigento (ca. 495-430 a.C.), este, sim, flertando com o mecanismo de seleção natural há mais de dois milênios (ver adiante). O correspondente de Darwin havia se confundido quanto à autoria do trecho traduzido. Aristóteles, na realidade, havia citado Empédocles em sua própria obra para, posteriormente, argumentar contrariamente a ela, postulando um mundo orgânico perfeitamente ajustado e imutável, ou seja, exatamente o contrário da ideia de transmutação. É interessante notar

que as anotações de Darwin produzidas quando ele ainda organizava suas primeiras ideias sobre a transmutação de espécies (“Notebook C, 267”; em 1838) revelam sua preocupação explícita em investigar, já naquele momento, se Aristóteles teria vislumbrado qualquer um desses conceitos em sua época (“ler Aristóteles e ver se alguma das minhas ideias é muito antiga”, em tradução livre).

Chama a atenção o fato de que a seção histórica incluída a partir da quarta edição do *A origem das espécies* apresenta um enorme salto no tempo após a problemática menção a Aristóteles (na verdade, sobre Empédocles, como visto acima), indo diretamente para o naturalista francês Buffon (George-Louis Leclerc, Comte de Buffon, 1707-1788), o qual praticamente nem é comentado (ver adiante). O que teria acontecido nesse intervalo de mais de dois mil anos? Seria possível que nenhum outro pensador ou naturalista do passado tivesse sido capaz, mesmo que superficialmente, de perceber algum (ou alguns dos) componente(s) da teoria estruturada por Darwin em 1859? Ou esses estudiosos teriam sido mal compreendidos ou simplesmente esquecidos? Poderiam as ideias cultivadas por Darwin terem sido consideradas perigosas ao longo desse hiato temporal e, assim sendo, permanecido ocultas, fora do alcance do público?

Nossa exposição tem seu ponto de partida em contribuições de alguns compatriotas de Darwin e outros importantes pensadores britânicos, a partir da Revolução Científica do século XVII e durante a Era Vitoriana. Após discorrer sobre o botânico sueco Carl Linnaeus (1707-1778), abordamos naturalistas franceses que propuseram interessantes ideias evolucionistas durante o Iluminismo e chegamos até Lamarck. São mencionados também pensadores islâmicos, relevantes, mas pouco conhecidos do público em geral. Por fim, vamos até a longínqua Grécia da antiguidade, onde os primeiros filósofos naturalistas, ao darem início à história do pensamento racional ocidental, também plantaram as sementes de conceitos evolucionistas fundamentais.

Pensadores britânicos

John Ray (1627-1705) foi um importante naturalista inglês, conhecido por seus esforços para compreender padrões de organização da natureza como resultado de um planejamento divino. Um de seus trabalhos mais conhecidos, intitulado *A sabedoria de Deus manifestada nos trabalhos da criação* (*The wisdom of God manifested in the works of creation*, 1691), sustentou a influente linha de pensamento denominada de Teologia Natural, um fruto da Revolução Científica e do nascimento do protestantismo nos séculos XVI e XVII. Na concepção de Ray e de outros teólogos naturais, o mundo material, os seres vivos e as leis que os regulam poderiam (ou deveriam) ser estudados em detalhe, até o ponto em que esse entendimento permitisse que os intuítos de Deus e sua inteligência superior viessem a ser desvendados.

John Ray foi um dos primeiros naturalistas a tentar definir as espécies de uma maneira objetiva e científica. Sugeriu como critérios determinantes nessa tarefa as capacidades de reprodução e propagação, antecipando assim o denominado “conceito biológico de espécie”. Ao mesmo tempo em que essa percepção influenciou defensores da tese de imutabilidade das espécies (uma vez que sugeria a manutenção da forma ao longo do tempo), também alimentou discussões sobre a questão da ancestralidade comum e da continuidade das linhagens, pilares do pensamento Darwinista. Ray aprofundou-se em investigações de variações intraespecíficas em plantas e argumentou primariamente em favor da fixidez das espécies, contudo, não descartou a possibilidade de instâncias de transmutação em alguns casos especiais, notadamente dentro de grupos restritos. Ele fez observações sobre fósseis, concluindo que na maioria dos casos representavam seres vivos do passado (uma ideia diferente daquela de outros naturalistas em seu tempo) e sugeriu que seu estudo poderia auxiliar na indicação da idade da Terra. Ray era um experimentalista, que também trabalhou com peixes e aves. Instituiu um método de classificação baseado na mor-



fologia comparada, o que impactou outros pesquisadores e revolucionou a prática taxonômica da época. Sua percepção organizada e objetiva dos seres vivos influenciou

o pensamento hierárquico de agrupamentos proposto pelo naturalista sueco Carl Linnaeus poucas décadas depois, e que mais tarde também chegaria a Darwin.

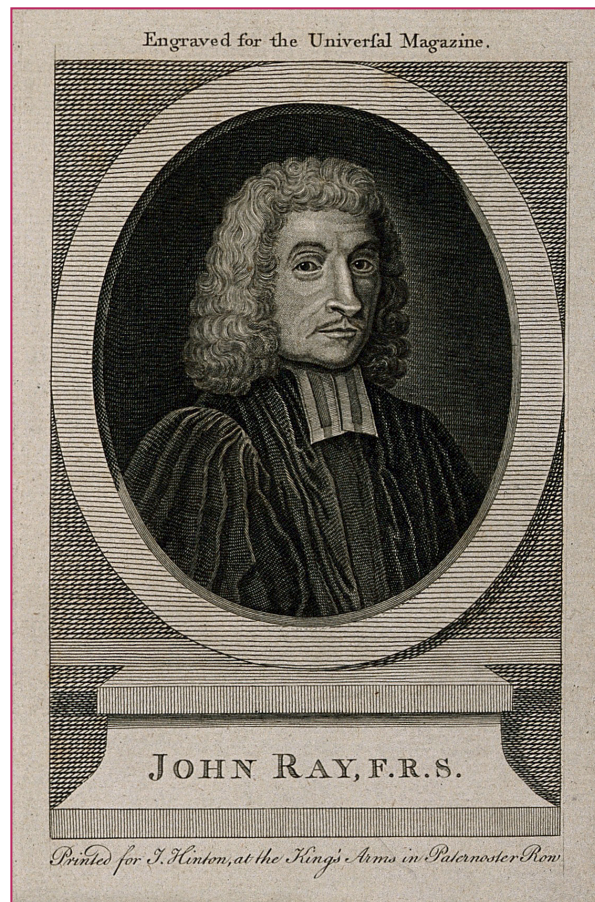


Figura 5. John Ray (gravura a partir de pintura de William Faithorne, Domínio público, wellcomecollection.org).

O avô paterno de Darwin, Erasmus Darwin (1731-1802), teve uma vida interessantíssima, além de uma prole numerosa. Conhecido médico, inventor e escritor inglês, mostrou notáveis interesses em história natural, além de preocupações com questões sociais e educacionais. Atuou ainda com participações e na fundação de sociedades científicas e filosóficas. Deixou muitas contribuições importantes, mas uma destaca-se especialmente pela abordagem assertiva da transmutação das espécies. A obra *Zoonomia: Ou as leis da vida orgânica* (*Zoonomy: Or the laws of organic life*), apresentada por ele em dois volumes entre 1794 e 1796, abrange primariamente patologia e anatomia. Em uma passagem do primeiro volume, na seção “Da Geração” (“Of Generation”), Erasmus Darwin reflete sobre o seguinte cenário: “Meditando sobre a grande similaridade da estrutura dos animais de sangue

quente e ao mesmo tempo nas grandes mudanças que eles sofrem tanto antes como depois de seu nascimento; e considerando a pequena proporção de tempo em que muitas das mudanças nos animais citados acima foram produzidas; seria demais imaginar que em uma grande extensão de tempo, desde que a Terra começou a existir, talvez há milhões de anos... que todos os animais de sangue quente tenham vindo de um único filamento vivente, o qual a Grande Causa Primordial dotou com animalidade... E assim, possuindo a faculdade de refinar-se por meio de sua própria atividade inerente, e de passar adiante tais implementações à sua posteridade...”. Este trecho é apontado por autores subsequentes como um indicativo claro de sua aceitação da ideia de transformação dos seres vivos a partir de formas ancestrais, além de também embutir os conceitos de ancestralidade comum e de multiplicação de espécies.



Figura 6. Erasmus Darwin por volta dos 40 anos de idade (retrato de Joseph Wright of Derby, ca. 1770, Domínio público, via Wikimedia Commons).

Algumas outras colocações naquele mesmo trabalho apontam na direção da crença de Erasmus Darwin em mecanismos de mudança que lembram conceitos de uso e desuso e herança de caracteres adquiridos, frequentemente associados ao Lamarckismo, mas que na verdade têm origem mais antiga. Há discussões na literatura sobre a eventual influência das ideias do avô nas concepções evolutivas de Charles Darwin, e é certo que houve em alguma medida. Em sua autobiografia, o naturalista menciona ter lido a obra de Erasmus Darwin em diferentes estágios da vida. Com a leitura, reconheceu o transmutacionismo e o “pré-Lamarckismo”, mostrou admiração, mas também se queixou, em leituras mais tardias, do caráter especulativo das ideias expostas no *Zoonomia*.

Médico e pesquisador britânico, William Charles Wells (1757-1817), é considerado o primeiro autor a propor, de maneira explícita e objetiva, uma versão do mecanismo de seleção como um processo capaz de promover diversidade em populações (e não como

mero eliminador de variações, como na interpretação usual de outros naturalistas durante a primeira metade do século XIX; ver abaixo). Sua contribuição partiu de um trabalho apresentado por ele perante a Royal Society (Londres), em 1813, e que tratava da condição da pele (manchada) de uma mulher branca. Foi posteriormente elaborado e publicado no ano seguinte à sua morte, com o curioso e longo título: *Uma consideração sobre uma mulher da raça branca humana, com parte da pele lembrando a de um negro; com algumas observações sobre as causas das diferenças em cor e forma entre as raças branca e negra dos homens* (*An account of a female of the white race of mankind, part of whose skin resembles that of a negro; with some observations on the causes of the differences in colour and form between the white and negro races of men*). Por conta do seu ofício, Wells percebeu que diferentes grupos humanos respondem a certas doenças e ao meio externo de diferentes maneiras, tendo associado esses aspectos ao estudo das causas da coloração

da pele. Ao iniciar sua explanação no artigo, Wells utilizou-se da mesma estratégia argumentativa oferecida por Darwin no *A origem das espécies*. Ele comparou as conhecidas e eficientes práticas de seleção artificial usadas por criadores de animais com o processo que ocorre na natureza. Em suas palavras: “Das variedades acidentais do Homem, que ocorreriam dentre os dispersos primeiros habitantes, alguns estariam melhor adaptados do que outros para suportar doenças locais. Tal raça se multiplicaria, enquanto as outras declinariam, e como os mais escuros estariam melhor adaptados para o clima [africano], com

o tempo se tornariam mais prevalentes, se não a única raça” (tradução livre). Seu trabalho teve pouquíssima repercussão, mesmo em sua área de atuação. Discute-se se Wells pretendia, de fato, explicar a questão da diversidade além do âmbito das raças humanas, e mesmo se ele realmente compreendeu a dimensão evolutiva do seu breve argumento. Embora Darwin não estivesse ciente da relevante contribuição de Wells até as primeiras edições de seu livro, ele apresentou um breve reconhecimento ao pioneirismo de Wells na seção histórica da quarta edição do *A origem das espécies*.

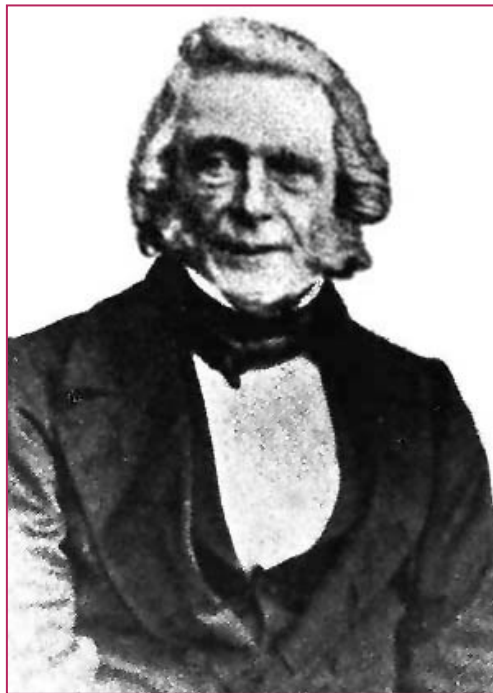


Figura 7. Patrick Matthew (reprodução a partir de fotografia da família, sem data, Domínio público, via Wikimedia Commons).

Um outro autor que também se antecipou a Darwin e claramente deduziu uma versão do mecanismo de seleção natural, ainda durante a primeira metade do século XIX, foi o escocês Patrick Matthew (1790-1874). Assim como William Wells, ele também, individualmente e em certa medida, compreendeu o papel do processo de seleção natural como produtor e organizador de diversidade. Matthew não era um cientista. Foi proprietário de terras, trabalhou com produções agrícolas e escreveu livros e artigos sobre o tema. Seus esforços para conhecer e implementar melhorias nas técnicas de cultivo levaram-no a reflexões

sobre as eventuais alterações resultantes nas populações domesticadas e naturais, estudadas ao longo do tempo. Em 1831, ele publicou um livro intitulado *Sobre madeira naval e arboricultura* (*On naval timber and arboriculture*), no qual descreveu, na seção de “Apêndice” (*Appendix – Note B*), o mecanismo de seleção. Expôs a lógica do processo e apresentou conceitos fundamentais, como a observação de variação em populações naturais, escassez de recursos e competição entre os indivíduos, sobrevivência e reprodução diferenciais. Matthew descreve assim a sua visão do mecanismo: “Aqueles indivíduos que não possuem o requisito da

força, rapidez, coragem, ou astúcia, caem prematuramente sem se reproduzir – seja como presas de seus devoradores naturais, ou sofrendo com as doenças, geralmente induzidas por falta de nutrição, seus lugares sendo ocupados pelos mais perfeitos de seu próprio tipo, que os pressionam pela subsistência” ... “[A] prole dos mesmos pais, sob grandes diferenças de circunstância, deve, em várias gerações, tornar-se mesmo uma espécie distinta, incapaz de co-reprodução” (tradução livre). É interessante notar que, apesar da grande relevância de sua contribuição, Matthew não a aprofundou e nem trabalhou para difundir suas ideias. Somente após a publicação e repercussão da primeira edição do *A origem das espécies*, em 1859, ele se preocupou em divulgar sua descoberta de quase três décadas antes. Publicou um artigo (em 1860) no qual reivindicou a originalidade sobre a ideia, mas também reconheceu que o naturalista inglês tinha ido muito além. Darwin comentou o fato posteriormente e chegou a pedir desculpas por não ter tido ciência, previamente, do lançamento do conceito distante tanto tempo antes e em uma obra pouquíssimo conhecida. Autores apontam que Matthew, diferente de Darwin, não compreendeu o processo de mudança como um lento acúmulo de variações favoráveis que resultam em adaptação. Além disso, suas colocações sobre seleção, embora mostrem semelhanças com aquelas expostas pelo naturalista, também incluem diferenças importantes. Ele era adepto de uma visão catastrofista do mundo, segundo a qual momentos de transformação súbita da Terra resultavam na eliminação de espécies e abriam espaço para o desenvolvimento de novas formas. Na sua concepção, a seleção era atuante apenas durante os tempos caóticos, deixando de agir como força criativa em períodos de estabilidade. A seleção natural de Darwin, por outro lado, é incansável e trabalha de maneira constante.

Chamamos a atenção para uma questão importante, referente às percepções de William Wells e Patrick Matthew. Entre adeptos da Teologia Natural, durante o século XVIII e início do século XIX, preva-

lecia o conceito de que havia na natureza um “equilíbrio benigno”, ou “perfeito”. Nesse cenário, foram oferecidos argumentos por autores importantes, como zoólogo inglês Edward Blyth (1810-1873), descrevendo a ação de forças seletivas eliminando variações “imperfeitas” surgidas no seio das populações e, assim, mantendo apenas as formas “perfeitas” (criadas por Deus no princípio dos tempos). O resultado final de tal processo seria um mundo em que as espécies são basicamente fixas e imutáveis. Em parte, esse contexto pode explicar a ausência de impacto das ideias de Wells e Matthew.

Outro marco importante na história do pensamento evolutivo inglês foi a publicação, em 1844, do livro *Vestígios da história natural da criação* (*Vestiges of the natural history o creation*), pelo jornalista, editor e escritor escocês Robert Chambers (1802-1871). Ele não era um cientista, mas se interessava por geologia, paleontologia e história natural. A obra foi publicada anonimamente e assim permaneceu durante quarenta anos, até a décima segunda edição (de 1884), quando ele já havia falecido e seu nome foi enfim revelado. O livro discorre sobre a origem do sistema solar, do nosso planeta e de sua organização geológica, bem como acerca do estabelecimento dos grupos de seres vivos (incluindo fósseis). Tudo isso a partir de uma narrativa plenamente baseada em princípios transmutacionistas, isto é, como um extenso encaideamento de formas que se sucedem no tempo a partir de outras anteriores. Estão presentes as ideias de progresso - a partir dos organismos mais simples vão se organizando os mais complexos - e o conceito de gradualismo. Não há nessa contribuição, porém, qualquer proposta explícita ou acabada de um mecanismo natural capaz de explicar a mudança da vida, mas primariamente a indicação de que as leis que supostamente regem os processos de estruturação orgânica haviam sido instituídas inicialmente por um ser superior. Os seres vivos não teriam surgido separadamente, a partir de atos especiais de criação.

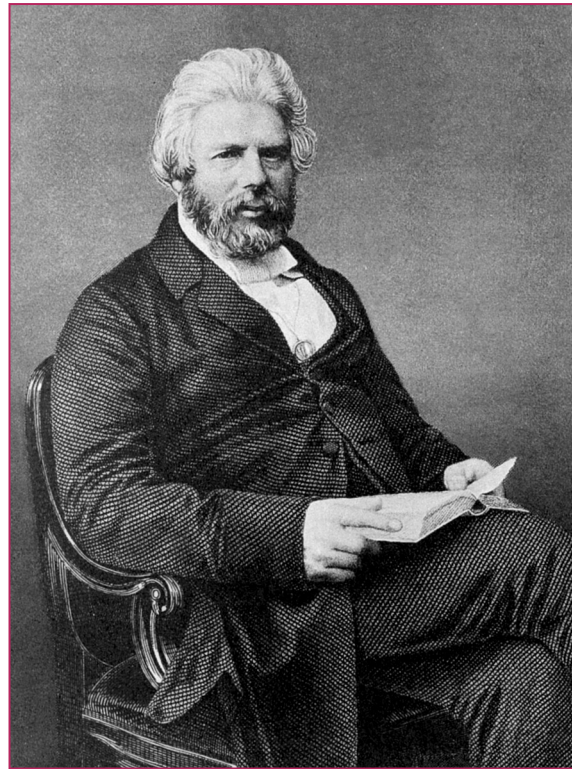


Figura 8. Robert Chambers em 1860 (a partir de gravura de Daniel John Pound, Domínio público, via Wikimedia Commons).

Tanto quanto possível, Chambers buscou explicar a organização do mundo natural com base no conhecimento das leis da natureza aceitas em sua época. Suas convicções sobre a transmutação basearam-se especialmente em evidências relativas ao registro fóssil, mas também na morfologia e na embriologia comparadas, bem como nas influências do meio sobre a estruturação dos organismos. O *Vestígios* teve importante repercussão na época, tanto sobre o público leigo quanto o acadêmico, mas recebeu críticas contundentes por parte deste último segmento (incluindo naturalistas próximos a Darwin). Tal notoriedade mostrou o evidente interesse da sociedade pela questão da transmutação das espécies, e alertou Darwin sobre a importância de que, na ocasião da publicação de seu próprio trabalho, ele deveria apresentar um nível bem superior de embasamento e rigor científico.

Alfred Russel Wallace (1823-1913) foi um renomado naturalista britânico nascido no País de Gales, e é reconhecido, ao lado de Charles Darwin, como criador do conceito fundamental de evolução por seleção natural, em 1858. Ao contrário de Darwin que, lentamente e a duras penas, amadureceu sua aceitação do fato da transmutação das espécies

durante os anos em que esteve viajando ao redor do mundo a bordo do HMS Beagle, e ainda pouco após o seu retorno à Inglaterra, Wallace desde jovem esteve impressionado pelo tema - inclusive a partir de sua leitura do *Vestígios da história natural da criação*. Considerando tal interesse, organizou extensas expedições à Amazônia (entre 1848 e 1852) e à Indonésia (entre 1854 e 1862), adquirindo vasta experiência e conhecimento sobre grupos de animais e plantas, e trabalhou de maneira intensa no estudo de padrões biogeográficos. O conhecido entomólogo inglês Henry Walter Bates (1825-1892), seu colaborador durante aquele primeiro período na América do Sul, relatou, posteriormente, que um dos objetivos de Wallace na viagem ao Brasil seria o de “resolver o problema da origem das espécies”.

Enquanto estava em Sarawak (Indonésia), escreveu um artigo importante intitulado *Sobre a lei que tem regulado a introdução de novas espécies* (*On the law which has regulated the introduction of new species*, de 1855) o qual, embora não ofereça nenhuma discussão sobre mecanismos evolutivos, apresentou reflexões importantes ligadas à área da biogeografia. Sua dedução do processo de seleção natural como produtor e organiza-

dor de novas formas ocorreu durante a estadia em uma localidade no sudeste asiático chamada Ternate no início de 1858, pouco depois de contrair malária, o que o obrigou a ficar em repouso ali por dias (ou na ilha de Gilolo, segundo um de seus biógrafos; atualmente, Halmahera, Indonésia). Curiosamente, da mesma maneira que se passou com Darwin, Wallace reconheceu posteriormente que seu raciocínio foi, em parte, baseado no contato prévio que teve com a obra de Thomas Malthus sobre demografia. Ele prontamente escreveu um manuscrito sobre sua descoberta e o enviou a Darwin, pois sabia (através da troca de correspondências que já havia entre ambos) do seu grande interesse no tema da transmutação. Darwin foi completamente pego de surpresa pela carta de Wallace e ficou momentaneamente abalado, sabendo que a originalidade do trabalho no qual vinha trabalhando

há duas décadas estava ameaçada. Enfim, após um breve arranjo coordenado pelo influente geólogo escocês e amigo de Darwin, Charles Lyell (1797-1875), o trabalho de Wallace e uma contribuição organizada às pressas pelo naturalista inglês sobre o papel da seleção foram lidas publicamente perante a Linnean Society, importante instituição científica londrina, em 1o de julho de 1858 (nem Darwin, nem Wallace estavam presentes). Pouco tempo depois, em 20 de agosto do mesmo ano, um artigo conjunto foi publicado pela sociedade, tornando essas datas marcos da história natural. A repercussão imediata, porém, foi mínima, com a sessão de 1o de julho sendo quase burocrática e a subsequente publicação, inconsequente. O verdadeiro debate sobre a questão da transmutação das espécies somente foi deflagrado após o lançamento do *A origem das espécies* no final do ano seguinte.

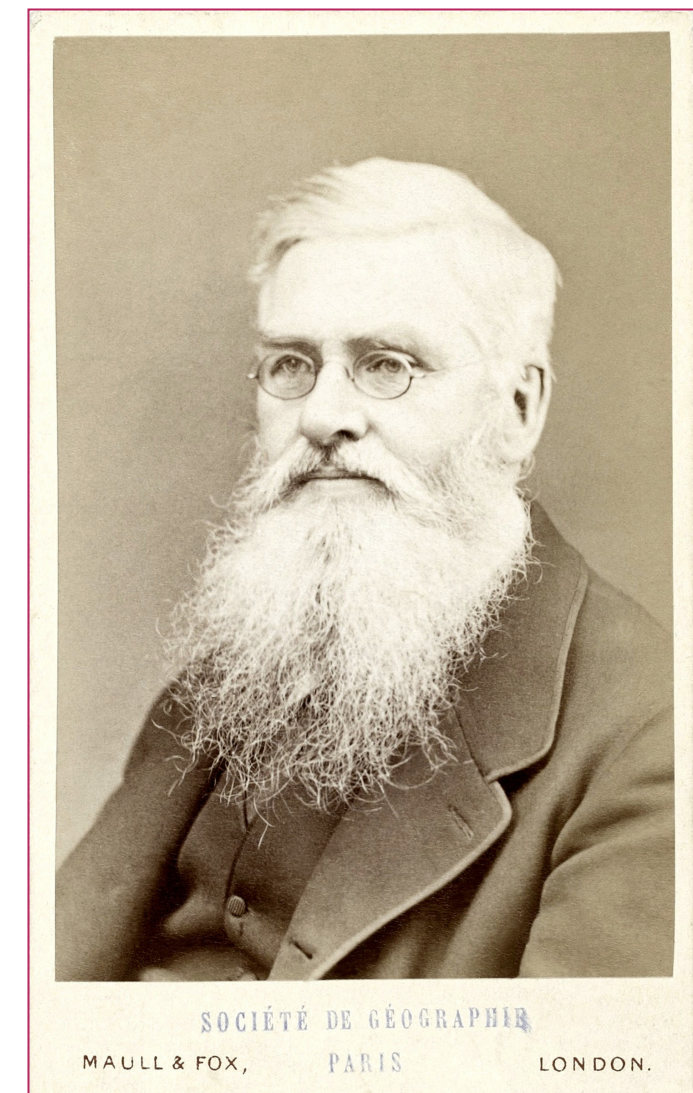


Figura 9. Alfred Russel Wallace com 55 anos (fotografia de Maull & Fox, 1878, Londres, Domínio público, via Wikimedia Commons).

Darwin e Wallace são frequentemente apresentados como cofundadores da ideia de evolução por seleção natural, ou como seus coautores formais. A história e os fatos mostram que ambos chegaram às suas conclusões trabalhando independentemente e em épocas distintas. Além disso, embora seja basicamente correto dizer que eles trataram do mesmo fenômeno geral, há diferenças em detalhes sobre como individualmente compreenderam e interpretaram nuances do processo evolutivo, e que têm, ainda hoje, importância em debates sobre essas questões (por exemplo, quanto à percepção de equivalência entre os conceitos de seleção artificial e seleção natural; o nível de atuação das forças seletivas; o fato da competição dos indivíduos acontecer no ambiente em que vivem, ou entre eles próprios; ou, ainda, o papel da seleção sexual na formatação de novas espécies). Mais ainda, com o passar do tempo, Wallace (que se tornou adepto da doutrina espírita) deixou claro que não considerava a seleção natural suficiente para explicar a origem e a organização da mente humana (faculdades mentais, características morais). Para tal, segundo ele, seria necessário recorrer à ação de um poder superior inteligente. Em correspondência trocada entre ambos, em 1869, Darwin mostrou-se preocupado com essa visão: “*Espero que você não tenha assassinado completamente o seu próprio filho e também o meu*” (isto é, em relação à ideia de evolução por seleção natural). A recepção do manuscrito de Wallace por Darwin e a subsequente publicação do trabalho de ambos, em meados de 1858, funcionou como um catalisador da publicação do *A origem das espécies* em 1859, visto que não havia mais razões para ele postergar a exposição de suas ideias para o público em geral.

Linnaeus

Carl Nilsson Linnaeus (nome latinizado: Carolus Linnaeus; 1707-1778) foi um naturalista sueco com predileção pela botânica. Considerado o fundador da nomenclatura biológica moderna, seu sistema ainda hoje é em parte usado na classificação das plantas e animais. Por exemplo, a utilização de nomes

científicos compostos por duas palavras, gênero e espécie (chamado de sistema binominal), é oriunda de Linnaeus. Além de seu talento como cientista, o pai da taxonomia foi excelente marqueteiro. O sistema Linneano de classificação sexual das plantas usa de linguagem explícita ao extremo, praticamente pornográfica. Por exemplo, flores com nove pistilos e um estame eram descritas como “*nove homens na mesma cama nupcial com uma única mulher*”. As descrições de partes de flores eram comparadas com detalhes da anatomia genital humana. E assim por diante. O erotismo das publicações originais deste sistema causou escândalo e naturalmente elas foram *best sellers* populares que o deixaram quase rico.

Linnaeus também é autor do *Systema Naturae*, cuja décima edição de 1758 é considerada o marco zero da nomenclatura zoológica. Aquela obra teve o ambicioso objetivo de classificar todo o universo conhecido na Terra: mineral, vegetal e animal. Normalmente, Linnaeus é visto como o fixista por excelência, devoto inquebrantável da ideia de que as espécies surgiram como hoje são, permanecendo imutáveis desde sua criação até o fim dos tempos. Um criacionista convicto. De fato, ele é autor da famosa frase “*Espécies são tão diversas quanto as formas diferentes criadas no início pelo Ser infinito*” (*Species tot sunt diversae quot diversas formas ab initio creavit infinitum Ens*). O conhecimento pioneiro alcançado por Linnaeus sobre os mecanismos reprodutivos das plantas foi, em certa medida, usado até como contrapartida a visões transmutacionistas anteriores. Sendo assim, por que incluir Linnaeus dentre os precursores do pensamento evolutivo?

Em primeiro lugar, o entendimento de Linnaeus sobre o assunto não foi monolítico e mudou ao longo de sua vida. Segundo, o sistema de classificação de Linnaeus tinha a vantagem da objetividade, sendo estritamente metodológico e aplicado de forma rígida. Dessa forma, as similaridades entre os macacos e os humanos, por exemplo, foram percebidas e incorporadas ao sistema, sem atenuantes. Pela aplicação do método igualmente a todos os animais, Linnaeus



Figura 10.

Carl Linnaeus em traje tradicional lapão (a partir de litogravura de Henry Kingsbury, 1805, Domínio público, via Wikimedia Commons).

concluiu que não havia dúvidas de que humanos deveriam ser classificados entre os símios. Na verdade, humanos eram um tipo de símio. O nome “*Primatas*” (*Primates*), proposto na décima edição do *Systema Naturae* para se referir ao grupo incluindo humanos e outros macacos, vem de Linnaeus (nas edições anteriores, o nome usado por ele era “*Anthropomorpha*”). O impacto desta referência foi enorme. Pela primeira vez, o homem era retirado de seu pedestal, criado à imagem de Deus, e posto em seu devido lugar, como mais uma criatura numa grande galeria de seres vivos organizados em grupos dentro de grupos. Isto trouxe grandes críticas a Linnaeus, uma vez que a posição especial dos humanos na criação era um dos dogmas centrais da cultura cristã. Ele,

entretanto, não cedeu um milímetro em sua convicção. Em uma correspondência enviada já em 1747 ao naturalista alemão Johann Friedrich Gmelin (1748 - 1804), Linnaeus desabafava: “*Não me agrada que deva colocar os humanos entre os primatas, mas o homem está intimamente familiarizado consigo mesmo. Não vamos discutir sobre palavras. Será o mesmo para mim qualquer nome que for aplicado. Mas eu aguardo ansiosamente de você, e de todo o mundo, uma diferença geral entre homens e símios oriunda dos princípios da História Natural. Certamente não conheço nenhuma. Se alguém pudesse me dizer uma! Caso eu chamasse o homem de símio ou vice-versa, reuniria todos os teólogos contra mim. Talvez eu deva fazer isso, em obediência às leis de nossa disciplina*” (tradução livre).

Além disso, cartas trocadas entre Linnaeus e naturalistas de sua época mostram que seu fixismo estrito foi gradualmente se dissolvendo ao longo da vida, pela observação de que certas espécies de plantas pareciam ter se originado após a criação, por um processo natural que ele caracterizava como hibridização. A primeira fratura séria em sua convicção na imutabilidade ocorreu com uma forma floral anômala da planta *Linaria vulgaris*. Para ele, a forma aberrante (chamada *Peloria*, que hoje sabemos ser uma versão mutante espontânea daquela espécie) era resultado de hibridização entre a versão normal de *L. vulgaris* e alguma outra espécie não determinada. Como a forma *Peloria* era capaz de se propagar por sua própria semente, representava, portanto, uma nova espécie botânica, surgida após a criação. Gradualmente, a quantidade de espécies presumivelmente originadas pós-criação, na interpretação de Linnaeus, cresceu a tal ponto que ele por fim concluiu que Deus havia criado somente alguns poucos tipos iniciais (três, na versão mais extrema) e todo o restante das espécies botânicas surgiu por hibridização. Resta pouca dúvida de que Linnaeus, com base em uma familiaridade profunda da diversidade e dos processos biológicos conhecidos em seu tempo, chegou à conclusão de que a melhor explicação para os fenômenos da vida era que espécies mudavam e surgiam com o passar do tempo.

Franceses do iluminismo e Lamarck

Benoît De Maillet (1656-1738) foi um dos personagens mais interessantes de sua época. Trabalhou como cônsul francês no Egito e suas extensas viagens foram aproveitadas para desenvolver interesses sobre história natural, em particular a geologia. Seu período de vida precede mesmo as obras principais de Carl Linnaeus, portanto numa época já bastante remota relativamente ao nosso entendimento atual do mundo. A originalidade e o valor de suas reflexões devem ser entendidos naquele contexto. Como tantos outros, Darwin inclusive, a concepção evolutiva de

De Maillet interagiu com uma percepção do dinamismo histórico da superfície da Terra. De Maillet percebeu que as características da geologia terrestre simplesmente não encaixavam com um cenário de criação instantânea e imutável do mundo. Muitas das características da superfície terrestre eram evidentemente resultantes de processos graduais de sedimentação e erosão ao longo de um tempo muito extenso, e não poderiam ter sido criadas instantaneamente. As descobertas e interpretações de De Maillet contradiziam as versões bíblicas, o que na época representava um perigo muito real para seu bem estar e mesmo sua sobrevivência. Assim, ele evitou publicar em vida suas ideias mais revolucionárias.

Sua obra mais importante, *Telliamed*, é póstuma, e instruções para sua edição e publicação foram deixadas a cargo de um amigo, o clérigo Jean Baptiste de Mascrier (1697-1760). O título completo daquele livro é *Telliamed, ou conversas de um filósofo indiano com um missionário francês acerca da diminuição do mar, a formação da terra, a origem do Homem etc.* (*Telliamed, ou entretiens d'un philosophe indien avec un missionnaire français, sur la diminution de la Mer, la formation de la Terre, l'origine de l'Homme, etc.*), e foi organizado a partir de escritos prévios, produzidos entre as décadas de 1720 e 1730. Obviamente, o “filósofo indiano” não é outro senão o próprio De Maillet em um disfarce nada convincente, sendo “*Telliamed*” seu próprio nome escrito em reverso. A primeira edição foi publicada na Holanda em 1748 (Mascrier sabia que não seria permitida na França) e, ainda assim, fortemente truncada, com sucessivas versões gradualmente menos censuradas. A edição completa somente foi apresentada em 1968, com base no manuscrito original.

De Maillet foi aparentemente o primeiro na história a vislumbrar a imensa antiguidade da Terra. Numa época em que a idade do mundo era calculada em poucos milhares de anos, a estimativa de De Maillet foi absolutamente excepcional. Ao vislumbrar uma taxa de retração do mar de três polegadas por século e multiplicando esse valor pela montanha mais alta por ele conhecida, chegou à conclusão de

que a idade da Terra seria, na verdade, 2,4 bilhões de anos. Este valor aproxima o número à realidade de hoje em nada menos que cinco ordens de grandeza, um verdadeiro prodígio de presciência. Uma idade de tal ordem não seria novamente cogitada até o primeiro terço do século XX. De Maillet adotou o raciocínio científico, baseado em evidências materiais, para suas conclusões. A observação da presença de fósseis de animais marinhos no alto de montanhas o convenceu de que o nível do mar passava por enormes, po-

rém lentas, mudanças ao longo do tempo. Ele postulou que a Terra, em sua formação, era inteiramente coberta de água, que gradualmente retrocedeu e expôs mais e mais terra seca. Naturalmente, suas premissas são hoje sabidamente errôneas: a Terra não foi toda coberta de água em sua formação, o mar não se retrai continuamente e montanhas podem ser erguidas. Ainda assim, é notável o salto quantitativo apresentado. Mais importante, a dedução é realizada por extrapolações baseadas em observações do mundo real.



Figura 11. Benoît De Maillet (gravura de J. G. de la Croix, 1737, Domínio público, via Wikimedia Commons).

Com relação à evolução biológica, De Maillet apresentou ideias fortemente embasadas no historicismo evolutivo, em consonância com suas conclusões geológicas. De grande importância foram suas observações de que extratos mais profundos dos sedimentos continham seres vivos muito diferentes dos atuais, por vezes tão diferentes que não podiam ser alinhados com grupos vivos.

Isso o levou a intuir que a vida na Terra sofria grandes mudanças ao longo do tempo. Para ele, a vida originou-se no mar, ao redor das primeiras montanhas, e se diferenciou em organismos terrestres posteriormente, à medida em que os continentes foram estruturados. Mas, sua concepção era altamente polifilética, já que, segundo ele, grupos terrestres teriam se originado várias vezes,

independentemente, a partir de outros marinhos. Um detalhe interessante de especial importância é que De Maillet acreditava ser possível que filhotes de orangotangos nascidos e criados no seio da civilização pudessem adquirir a linguagem verbal após algumas gerações. Outra curiosidade é que o paleontólogo inglês Richard Owen, antievolucionista raivoso, em uma resenha do *A*

origem das espécies, caracterizou Darwin e De Maillet como um “par de tolos equivalentes”. Por fim, nota-se que o nome de De Maillet (grafado como “Demaillet”) é apenas citado por Darwin na parte histórica dos prefácios das primeiras edições do *A origem das espécies* publicadas nos Estados Unidos e na Alemanha, e não nas edições inglesas do livro.



Figura 12. Pierre Maupertuis (retrato de Robert Tournières, 1740, Domínio público, via Wikimedia Commons).

Dotado de grande talento e inteligência, Pierre Louis Moreau de Maupertius (1698-1759) escreveu incansavelmente sobre muitos assuntos, todos com grande intensidade e originalidade. Lotado na corte do rei da Prússia, Frederico II (1712-1786), foi rival e inimigo do filósofo, historiador e escritor Voltaire (François-Marie Arouet; 1694-1778). Suas obras incluem contribuições importantes em geofísica e matemática, e na biologia refletiu longamente sobre a hereditariedade. Seus argumentos eram baseados em observações, principalmente de casos incomuns, refutan-

do antigas teorias e resolvendo questões até então controversas. Maupertius foi defensor (mas não criador) da ideia de pangênese, que dominou a noção de hereditariedade por muito tempo, sendo inclusive aceita e refinada posteriormente por Darwin (em uma contribuição sobre animais e plantas domesticados, de 1868). Da maior importância foi sua percepção de que a herança seguia regras bastante rígidas, e ao mesmo tempo era sujeita a erros ocasionais de cópia, algo que ele identificou como variações fortuitas e que hoje equivaleria ao que reconhecemos como mutações.

Um vislumbre de seleção natural é exposto em seu *Ensaio de Cosmologia* (*Essai de Cosmologie*), de 1751: “o acaso, podemos dizer, produziu uma incontável multiplicidade de indivíduos; um pequeno número deles se viu construído de tal forma que as partes do animal eram capazes de satisfazer suas necessidades; em um outro número infinitamente maior, não houve nem viabilidade nem ordem: todos estes últimos pereceram. Animais sem boca não podiam viver; outros privados dos órgãos reprodutivos não podiam se perpetuar; os únicos que permaneceram foram aqueles nos quais se encontraram a ordem e a viabilidade; e estas espécies que vemos hoje são somente a mais minúscula parte do que o destino cego produziu” (tradução livre). Esta versão de seleção é essencialmente negativa (ou eliminativa), como visto anteriormente, já que sua ação resulta no descarte de indivíduos cujas combinações de características sejam inviáveis ou incompatíveis com a vida e/ou a reprodução. A nós parece que Maupertius compreendeu plenamente a relevância de mecanismos seletivos no processo evolutivo.

Maupertius vai além em sua obra *Ensaio sobre a formação dos corpos organizados* (*Essai sur la formation des corps organisés*), publicada em 1754, e elabora o que é, essencialmente, uma teoria de evolução orgânica. Diz ele, em uma famosa passagem: “Como de dois únicos indivíduos pôde surgir a multiplicidade das espécies as mais diferentes? Elas deveram sua primeira origem a algumas produções fortuitas, nas quais as partes elementares não haviam retido a ordem que mantinham nos animais pai e mãe; cada grau de erro teria feito uma nova espécie: e por força de sucessivos desvios se constituiria a diversidade infinita dos animais que hoje vemos; e que talvez crescerá mais com o tempo, mas a que a sequência dos séculos não trará senão adições imperceptíveis” (tradução livre). O que vemos aí é indubitavelmente uma concepção transmutacionista da história da vida, com ecos de descendência com modificação, mudança gradual e escalas de tempo longas, tudo inteiramente compatível com o entendimento evolutivo moderno, embora em forma rudimentar. Maupertius era opositor das explicações teológicas do mundo, concluindo que simples observações sobre os fatos da vida refutavam a ideia de um criador bene-

volente. Sua perspectiva com relação aos fenômenos naturais era, portanto, fortemente materialista. Em combinação com sua teoria de origem das variações fortuitas (mutações) e de seleção natural, o conjunto resultante aponta Maupertius como o primeiro na história a construir uma teoria coerente de evolução biológica.

George-Louis Leclerc, Comte de Buffon (1707-1788), foi um renomado naturalista e matemático francês, cuja obra extensa influenciou grandemente pesquisadores subsequentes importantes, como seu compatriota Lamarck. Sua contribuição mais conhecida é o monumental *História Natural, geral e particular* (*Histoire Naturelle, générale et particulière*), com trinta e seis volumes organizados durante seu período de vida (publicados entre 1749 e 1789), e oito preparados pelo seu compatriota naturalista La Cépède, entre 1788 e 1804 (Bernard-Germain-Étienne de La Ville-sur-Ilлон, Comte de Lacépède, ele próprio um transmutacionista; 1756-1825). Já nas primeiras publicações, Buffon conjecturou acerca de processos naturais responsáveis pela formação da Terra, rejeitando explicações teológicas. Realizou experimentos que o fizeram concluir que o planeta era mais antigo do que o geralmente aceito na época (segundo seus cálculos, cerca de 75.000 anos, ao invés de aproximadamente 6.000), o que o levou a ser confrontado por acadêmicos conservadores franceses. Buffon também trabalhou com o reconhecimento de espécies baseando-se primariamente no critério de coesão reprodutiva, sugeriu a existência de forças internas que “moldariam” o padrão geral de organização dos indivíduos, e mostrou-se adepto da tradicional ideia de pangênese.

No *Esboço histórico* inicial do *A origem das espécies*, a partir da quarta e até a sexta e última edição inglesa do livro, Darwin repete que “o primeiro autor que, nos tempos modernos, tratou [da evolução] com espírito científico foi Buffon. Mas suas opiniões flutuam grandemente em diferentes períodos, e como ele não entra nas causas ou meios de transformação das espécies, eu não preciso aqui entrar em detalhes” (tradução livre). De fato, segundo alguns autores, as convicções de Buffon mu-



daram de um início mais fixista até a adoção, posteriormente, de uma visão moderada sobre possibilidades de modificação dos organismos. Seus estudos comparativos fizeram com que ele tivesse a compreensão de que havia uma clara continuidade de forma entre os seres vivos. Isso contrariava a filosofia dos então recém-lançados métodos de classificação de Linnaeus (bem aceitos pela

comunidade acadêmica), que tinham como proposta um arranjo geral da vida em classes descontínuas (estas, na opinião de Buffon, arbitrárias e artificiais). Suas observações indicavam que *dentro* de certos grupos de plantas e animais poderia haver notável variação, o que permitiu que ele explorasse, em um grau moderado (porém impactante), a ideia de transmutação.

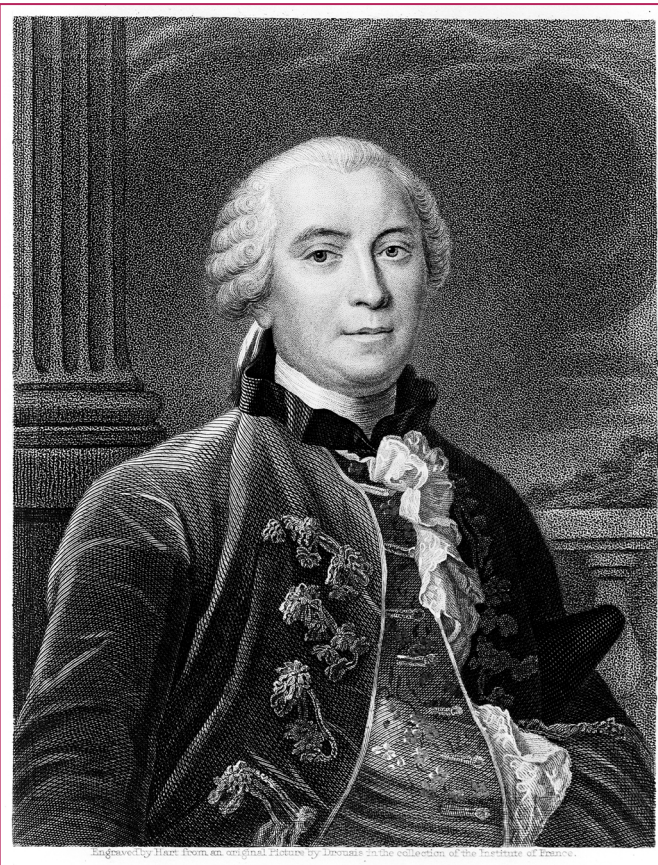


Figura 13.

Georges Louis Leclerc, Comte de Buffon (gravura de Robert Hart a partir de pintura de François-Hubert Drouais, de 1761, Domínio público, wellcomecollection.org).

Buffon propôs um modelo de pensamento segundo o qual a modificação (limitada) das formas aconteceria lentamente através de um processo de *degeneração*. Isto é, a partir de uma matriz, ou arquétipo original comum surgido no passado (uma concepção essencialista; ver adiante), novas formas poderiam estruturar-se ao longo do tempo, na medida em que se tornavam progressiva e gradualmente mais adaptadas às condições do meio que habitavam. O processo inverso também seria possível, com as variantes podendo retornar ao estado original de organização se as condições fossem favoráveis nesse sentido. Ao exercitar esse argumento e testar seus limites, Buffon escreveu a seguinte passagem no quarto volume do *História Natural*,

de 1753 (em uma seção intitulada *O asno [L'âne]*, enquanto discorria sobre animais domesticados): “Se alguém uma vez admite que pode haver famílias entre as plantas e entre os animais, que o asno possa ser da família do cavalo e que difere do cavalo apenas por ter-se degenerado, alguém poderia dizer igualmente que o macaco é da família do homem, que ele é um homem degenerado, que o homem e o macaco têm uma origem comum, assim como o cavalo e o asno; que cada família, igualmente entre os animais como entre os vegetais, teve apenas um único estoque; e mesmo que todos os animais tenham saído de apenas um único animal que, ao longo do tempo, tem produzido, ao aperfeiçoar-se e através da degeneração, todas as outras raças de animais” (tradução livre).

Alguns autores interpretam esse trecho em particular (sem, no entanto, levar em consideração outras partes do texto geral) como indicativo de um provável entendimento, por parte de Buffon, da possibilidade de existência de relações evolutivas entre os seres vivos, enfatizando-se aí sua menção à espécie humana. É preciso notar que, como observado por Darwin, Buffon nunca propôs explicitamente um mecanismo efetivo de mudança. Contudo, sua ideia geral de transformação gradual dos organismos, como resultado de um processo de adaptação ao meio, teve grande impacto e influência em sua época e também posteriormente.

Jean-Baptiste Pierre Antoine de Monet, Chevalier de Lamarck (1744-1829), é o nome popularmente mais associado à ideia de evolução, depois de Darwin. Infelizmente, tais referências têm conotação negativa, colocando Lamarck como um tipo de antagonista ao naturalista inglês. Também é comum, em livros didáticos inclusive, ver La-

marck ser indevidamente apresentado como criador e propagador das ideias errôneas de uso e desuso e herança de caracteres adquiridos. Tal versão ignora que esses conceitos eram amplamente reconhecidos desde épocas muito anteriores a Lamarck, tendo sido, depois, incorporados nas visões do próprio Darwin. “Uso e desuso” e “herança de caracteres adquiridos” são conceitos enfatizados na famosa publicação de Lamarck intitulada *Filosofia zoológica* (*Philosophie zoologique*, de 1809) e geralmente referidas como “primeira e segunda leis de Lamarck”, respectivamente. É pouco difundido, no entanto, que, em uma importante e extensa obra posterior, *História natural dos animais sem vértebras* (*Histoire naturelle des animal sans vertebres*; sete volumes lançados entre 1815 e 1822), ele descreve, além daquelas acima, outras duas leis e as acrescenta à sua percepção geral da transformação dos organismos: a tendência para o aumento do volume e extensão do corpo; e o surgimento de órgãos em função de necessidades do indivíduo.



Figura 14.

Jean-Baptiste Pierre Antoine de Monet, Chevalier de Lamarck (retrato de Charles Thévenin, de 1802-1803, Domínio público, via Wikimedia Commons).

À parte não terem sido comprovados posteriormente, esses supostos fenômenos como reais motores evolutivos, Lamarck foi um dos mais importantes pensadores e um dos maiores zoólogos de sua época. Sua grande contribuição foi concluir e tentar explicar, com base em um conhecimento profundo de diversidade, anatomia e embriologia, que a história da vida envolvia profundas modificações das formas orgânicas ao longo do tempo. Isto o coloca como um dos grandes arquitetos da teoria evolutiva. Mas de que maneira, então, a teoria de Lamarck difere daquela de Darwin? E por que ele não é detentor de prestígio igual? As respostas para isso dizem respeito aos detalhes de como o processo evolutivo era visto por ele. Para Lamarck, a vida originava-se constantemente por geração espontânea (novamente, uma hipótese amplamente aceita e difundida na época). A partir daí, os seres vivos traçavam uma trajetória *pré-determinada* em direção a formas cada vez mais complexas. Assim, seres surgidos há muito tempo eram os que vemos hoje como os mais elaborados, como mamíferos etc, que passaram por longos períodos de evolução. Por outro lado, aqueles surgidos há pouco tempo (mesmo ontem) ainda são simples e primitivos, como os microrganismos. Entre os dois extremos estava todo o restante da diversidade da vida, em graus intermediários de complexidade e estruturação. Como a geração espontânea era um processo contínuo, em ação desde a origem da vida até hoje, isso explicaria a convivência de seres vivos em múltiplos estágios de evolução, desde infusórios até seres humanos.

Com relação ao entendimento Darwinista e moderno, um aspecto dissonante crucial na teoria Lamarckiana é que ela não compreende a natureza ramificativa do processo evolutivo. Apesar de haver descendência com modificação, o processo restringe-se a linhagens individuais, que seguem trilhas independentes e lineares desde a sua origem. Como sabemos hoje, e foi bem entendido por Darwin, a história da vida é uma história de ramificação, em que formas ancestrais fragmentaram-se em duas ou mais linhagens, que por sua vez se dividiram em outras mais e assim sucessivamente, formando uma genealogia com estru-

tura arborescente (daí a metáfora da “árvore da vida”). Isso significa que as espécies atuais podem apresentar-se muito diferentes umas das outras, mas que se voltarmos no tempo veremos que elas se tornam cada vez mais semelhantes, eventualmente se unindo em espécies ancestrais, até que se chega a um início comum. Essas junções de espécies no passado ocorrem em diferentes tempos, de forma que espécies mais similares entre si geralmente se unem em um passado relativamente próximo, enquanto que as muito diferentes somente o fazem no passado profundo. Tal cenário é dependente de uma visão populacional das linhagens e espécies. A teoria Lamarckiana não chegou a tal compreensão e essa é sua diferença fundamental com relação ao entendimento moderno do padrão evolutivo, que Darwin e Wallace deduziram corretamente (paradoxalmente, o modelo evolutivo-ramificativo de Darwin só foi plenamente incorporado à biologia evolutiva na segunda metade do século XX, com a Sistemática Filogenética do entomólogo alemão Willi Hennig [1913-1976]).

Lamarck também acreditava numa propensão inerente da vida à crescente e pré-determinada complexidade (um conceito eventualmente denominado “ortogênese”, que ganhou mais espaço na segunda metade do século XIX nos trabalhos do zoólogo alemão Gustav Heinrich Theodor Eimer; 1843-1898), muito diferente do processo cego e não guiado da evolução Darwiniana.

A ideia de herança de caracteres adquiridos tornou-se tão fortemente associada a Lamarck simplesmente porque ele a desenvolveu de forma mais elaborada que seus predecessores. Ele criou toda uma série de explicações de como o meio ambiente poderia indiretamente influenciar os tecidos germinativos dos animais, geralmente através de interações com o sistema nervoso. Lembremos que Darwin não era crítico dessas hipóteses, aceitando algum tipo de influência do uso e desuso na herança de características (especialmente quando detalhou a sua hipótese de pangênese). De qualquer forma, como mencionado, a mecânica de herança era apenas um dos fatores que controlavam o processo evolutivo, não a essência da teoria de Lamarck.

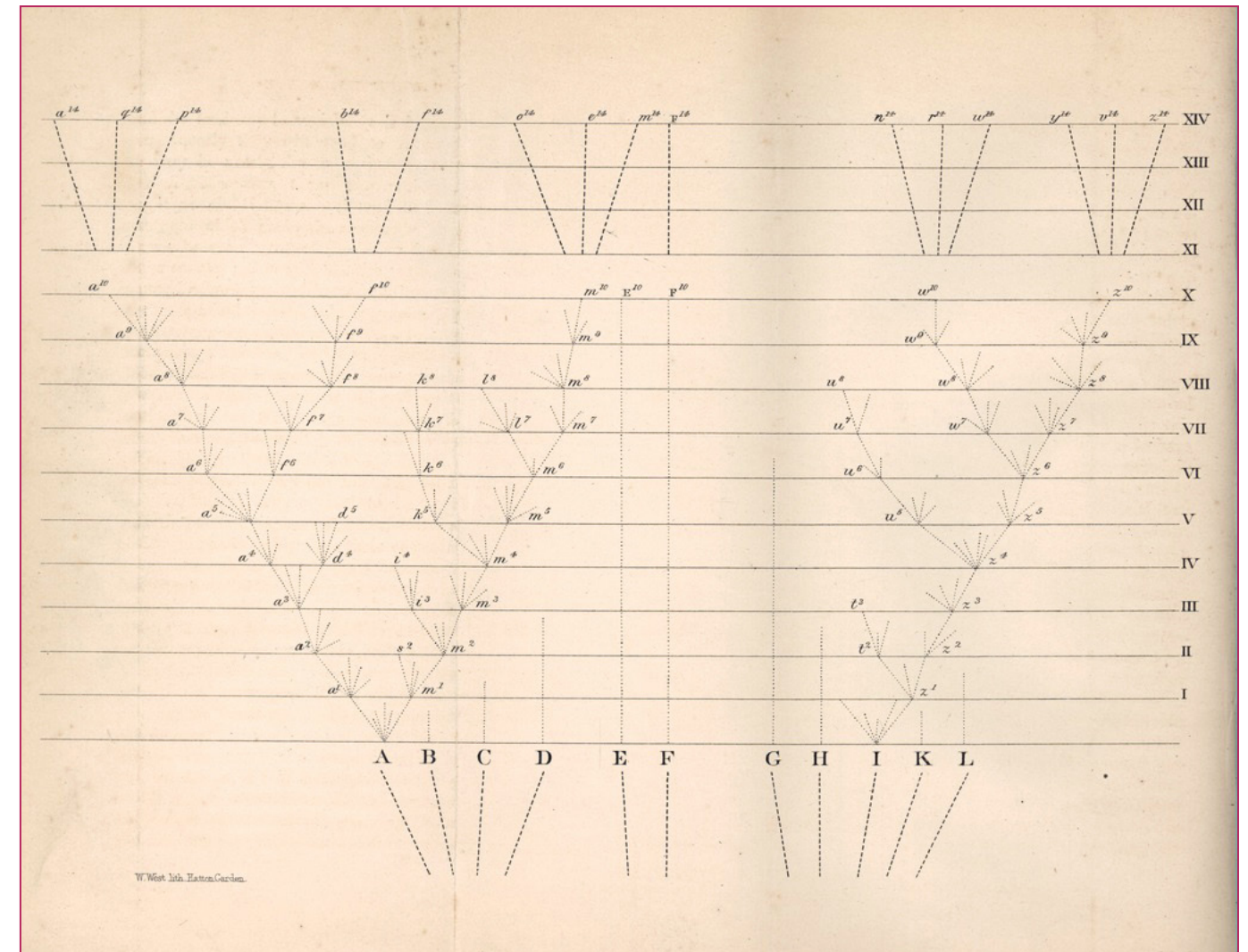


Figura 15.

Diagrama ramificado apresentado por Darwin em *A origem das espécies* (1859), ilustrando o seu “Princípio de Divergência” de caracteres, variedades, espécies e grupos de espécies (entre as páginas 116-117, a única ilustração contida no livro, Domínio público, via Wikimedia Commons).

Pensadores muçulmanos medievais

Os autores islâmicos do período medieval têm sido pouco mencionados, ou mesmo omitidos, nos livros sobre evolução. Tal omissão é lastimável, pois esses autores desenvolveram uma interessantíssima corrente intelectual de temas evolutivos. Muitas de suas ideias antecipam conceitos Darwinianos importantes, como seleção natural, adaptação e extinção. É bem sabido que entre os séculos

VIII e XIII a tradição científica mudou de mãos europeias para muçulmanas, as quais inclusive preservaram importantes textos gregos. Com a queda do Império Romano, por volta do século V, a Europa mergulhou na Idade Média (também referida como Idade das Trevas). Foi um período de pouco, ou praticamente nenhum progresso significativo no campo da história natural no continente. Vários filósofos naturalistas muçulmanos fizeram importantes contribuições sobre conceitos evolucionistas durante aquele período. Por razões de concisão, mencionaremos aqui apenas dois nomes frequentemente listados dentre os mais relevantes desse grupo.



Figura 16. Ilustração de Al-Jahiz (O livro dos Animais, Basra, Século IX, Domínio público, via Wikimedia Commons).

Abu Uthman Amr Bin Bahr Al-Fukaymi Al-Basri (776–868), mais conhecido como Al-Jahiz, foi um filósofo, naturalista e escritor árabe nascido em Basra, no Iraque. Produziu uma obra extensa, estimada por alguns historiadores como compreendendo mais de duas centenas de livros, dos quais cerca de um terço alcançou os nossos dias. Seus escritos influenciaram pensadores subsequentes no mundo árabe e na Europa. Em referência aos seres vivos, demonstrou destacado interesse pela zoologia, o que resultou em uma contribuição de grande importância intitulada *O livro dos animais*, ou *O livro dos seres* (*Kitab al-Hayawan*), provavelmente escrita entre os anos 847 e 867. Al-Jahiz dedicou-se durante anos aos estudos de animais (em especial aves) e foi um adepto de ideias transmutacionistas, sendo considerado o primeiro naturalista árabe a sugerir um mecanismo que se aproxima da seleção natural. Alguns autores especularam que Darwin poderia ter tido contato com a obra de Al-Jahiz para elaborar as suas conclusões sobre processo evolutivo, mas não há qualquer evidência direta disso. As atentas observações de Al-Jahiz levaram-no a reconhecer a im-

portância das interações entre os indivíduos com o meio ambiente, e entre grupos de animais na estruturação de padrões ecológicos e nas adaptações dos próprios seres vivos. Sua concepção evolutiva, no entanto, pressupõe a ação divina no planejamento das mudanças e um direcionamento pré-determinado para que o equilíbrio final da natureza possa ser atingido. O processo geral vislumbrado por Al-Jahiz é eminentemente teleológico, isto é, os resultados obtidos representam objetivos, ou metas que devem ser alcançadas pelos organismos, uma visão que ele provavelmente assimilou de Aristóteles, cujas obras o influenciaram.

O filósofo islâmico Ibn Khaldun (1332-1406; alternativamente, Ibne Caldune em português), nascido no atual território da Tunísia, foi um dos mais influentes pensadores da Idade Média. Suas contribuições à historiografia, sociologia, economia e política são imensas, assim como sua influência sobre muitos intelectuais e políticos subsequentes, até os tempos modernos. Como não podia deixar de ser, Ibn Khaldun registrou reflexões sobre a origem dos animais, princi-

palmente em sua obra *Sobre a História* (*Muqaddimah*, escrita em 1377), na qual postula que os humanos se desenvolveram a partir do “mundo dos macacos”, por um processo através do qual “espécies se tornam mais numerosas”. O autor entendia que o mundo é estruturado por conexões causais, que ao longo do tempo modificam sua aparência. Assim, todas as coisas têm um antecessor e um sucessor, o que é claramente uma compreensão causal do mundo, alinhada com o transmutacionismo do século XIX e a com-

preensão moderna. Os seres vivos são apenas mais uma “coisa” que segue os mesmos princípios eternos. Por exemplo, Khaldun considerava as palmeiras e trepadeiras como os estágios mais avançados das plantas, logo antes dos caracóis e conchas, considerados os mais inferiores dos animais. Notavelmente, o raciocínio não faz exceção aos humanos, com o mesmo processo sendo aplicado aos “macacos, criaturas que combinam inteligência e percepção, em relação ao homem, o ser que tem a habilidade de pensar e refletir”.

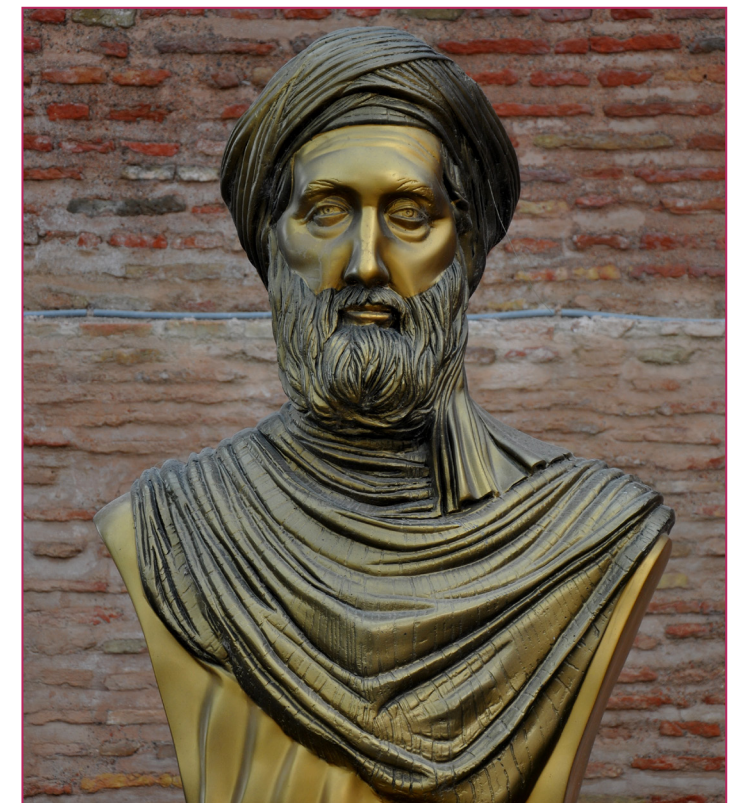


Figura 17. Busto de Ibn Khaldun na entrada da Casbã de Bejaia, Argélia (fotografia de Reda Kerbush).

Os gregos e o início do pensamento racional naturalista

Até onde sabemos, considerando fragmentos de textos e outros registros que chegaram até nós, os primeiros a buscar consistentemente explicações racionais e naturais para os fenômenos do Universo foram os gregos (embora algumas civilizações antigas, como o Egito e a Babilônia, também tenham engatinhado nessa direção). Alguns dos primeiros filóso-

fos gregos naturalistas viviam na Jônia, um território da Grécia Antiga que hoje é parte da Turquia. Eles buscavam respostas sobre a origem das coisas que constituem o mundo real, seu funcionamento, e sobre a possibilidade da existência de um princípio único, formador e organizador de tudo o que vemos e percebemos à nossa volta. Nessa chamada “Escola Jônica”, identificamos os primórdios do pensamento científico. Alguns importantes filósofos jônicos lançaram seu olhar sobre certas questões biológicas e, nesse exercício, plantaram as sementes do pensamento evolutivo.



Dentre esses está Tales de Mileto (*ca.* 626-545 a.C.) que, tradicionalmente, é considerado o primeiro filósofo naturalista. Tales foi, segundo Aristóteles, o primeiro pensador a buscar, de maneira sistemática e racional, soluções para as questões da origem, transformações e permanência de tudo o que existe. Sugeriu que a água seria o princípio material primordial, a partir do qual surgem todas as coisas. Intérpretes de seu pensamento apontam que ele chegou a essa conclusão, possivelmente, após refletir sobre as propriedades desse elemento (por exemplo, suas mudanças de estado), sua predominância na constituição dos seres vivos e a importância nos ciclos da natureza. Para ele, a água seria a causa da existência dos seres vivos (isto é, *a vida teria se originado a partir da água*), de suas transformações (*a vida se modifica*) e conservação (*a vida tem uma organização*). Embora essas possam parecer conclusões simplórias atualmente, as interpretações originais de Tales contêm pelo menos dois elementos fundamentais relacionados às bases do pensamento evolutivo: 1) *os seres vivos têm uma origem que pode ser explicada através de processos naturais*; e 2) *os seres vivos estão sujeitos a transformações ao longo do tempo*. Isso nos faz perceber que as raízes da ideia de evolução estão associadas àquelas do próprio pensamento racional ocidental, já no século VII a.C.

Diferentemente de Tales, seu discípulo Anaximandro de Mileto (*ca.* 610-546 a.C.) não identifica a água como o princípio de tudo, mas um meio abstrato, indeterminado e ilimitado, denominado por ele de *ápeiron*. Ainda segundo o que restou de seus ensinamentos, os primeiros animais teriam surgido na água ou em um ambiente úmido; saindo do meio aquático, teriam se adaptado ao terrestre e, por fim, ao meio aéreo (seres voadores). Os seres humanos precisariam, inicialmente, ter se desenvolvido no interior de criaturas aquáticas (“peixes”; visto que, quando jovens, não têm como se nutrir ou se proteger sozinhos). No pensamento de Anaximandro também é possível identificar, primitivamente, o conceito de transmutação (como vimos, a possibilidade de mudança dos seres vivos ao longo do tempo) e a tentativa de compreensão racional desse fenômeno com base em fatores naturais. Contudo, não há indi-

cações de que sua interpretação de mudança constitua uma visão de processo gradual, mas, de maneira alternativa, um com a possibilidade de surgimento abrupto de novas espécies, já inteiramente formadas, a partir de outras preexistentes (uma visão comum entre pensadores da antiguidade).

Uma percepção geral de gradualismo, por outro lado, está implícita nos ensinamentos de um outro importante filósofo jônico, Heráclito (*ca.* 540-480 a.C.; de Éfeso, cidade da Jônia, próxima a Mileto). Ele é conhecido, dentre outras colocações, por sua notória visão de que “tudo flui” (“*panta rhei*”, em grego). Para Heráclito, o mundo não é estático, não tem uma existência cíclica, e nem é como uma estrutura que se está construindo ao longo do tempo. De outra forma, representa um processo sem fim de transformações, através do qual tudo está em movimento e eterna mudança, mudança necessária para que exista e se mantenha a organização.

Um filósofo naturalista importante que não pertenceu à Escola Jônica, Empédocles (*ca.* 492-430 a.C.; natural da cidade de Agrigento, na Sicília) foi, aparentemente, o primeiro a sugerir um mecanismo de origem da diversidade que pode ser identificado como uma versão primitiva do conceito de seleção natural. Dentre várias ocupações, Empédocles foi médico e é possível que suas investigações e prática nesse campo tenham influenciado suas visões acerca dos seres vivos e da natureza. Para ele, tudo existe a partir das combinações de quatro princípios eternos e imutáveis, ou “raízes” (os elementos água, terra, fogo e ar), os quais se atraem ou se repelem de acordo com as ações de duas forças externas que os põe em movimento, o “amor” e o “ódio”. Segundo Empédocles, a atração e união aleatória de elementos primordiais teria como resultado, num primeiro momento, a formação de partes (separadas, incompletas) de animais e plantas. Essas partes seriam capazes de crescer e, ao se atraírem mutuamente, também se uniriam ao acaso formando figuras diversas e seres monstruosos. Muitos desses estariam fadados ao desaparecimento; alguns outros, no entanto, sendo “mais funcionais” do que os demais, conseguiriam sobreviver e persistir no tempo. Nesse jogo

de competição e sobrevivência diferencial, finalmente, alguns acabariam por constituir corpos capazes de gerar prole. Esse processo, descrito mais de dois mil anos antes da contribuição de Darwin, aproxima-se da lógica, em duas etapas principais, do mecanismo básico da seleção natural: 1) produção aleatória, nas populações, de variação abundante; e 2) filtragem (isto é, *seleção*), dentre os constituintes daquela coleção original de variantes formadas ao acaso, daquilo que é mais estável e funcional (em outras palavras, *melhor adaptado ao meio*). Com essa proposição, Empédocles parece ter sido o primeiro a vislumbrar uma maneira para explicar, com base em um processo mecânico natural, como, a partir do surgimento de estruturas por meio de combinações e recombinações aleatórias, é possível produzir ordem e complexidade.

Tales, Anaximandro, Heráclito e Empédocles, dentre outros importantes nomes não mencionados aqui, nasceram antes de Sócrates (*ca.* 469-399 a.C.; considerado o fundador da filosofia ocidental) e, assim, são referidos como filósofos “pré-socráticos”. Estes e alguns outros pensadores daquele período fizeram propostas que podem ser interpretadas como contendo elementos primordiais de conceitos evolucionistas fundamentais. Foram figuras importantes da antiguidade, cujas contribuições mostram-nos, como notado acima, que juntamente com as bases do pensamento científico e racional nasceram também as sementes da perspectiva evolutiva biológica, mais de seiscentos anos antes de Cristo.

Platão (*ca.* 428-347 a.C.), nascido em Atenas (Grécia), foi discípulo de Sócrates. Ao lado de Aristóteles, foi também um dos filósofos gregos com maior influência no pensamento biológico até meados do século XIX. Fundou a Academia, uma importante instituição da antiguidade, na qual Aristóteles ingressou por volta de 367 a.C., e onde se manteve como seu seguidor por cerca de vinte anos. Os interesses de Platão pela matemática (em especial pela geometria) tiveram um profundo impacto em aspectos do seu pensamento, o qual é denominado de *essencialista* (ou *idealista*). A filosofia essencialista de Platão levou-o a refletir sobre alguns fatos percebidos,

já na sua época, como importantes acerca do mundo biológico. Como compreender a existência de variações individuais dentro de classes mais abrangentes de seres vivos (como as espécies)? Como lidar com a observação das particularidades dos indivíduos, em contraste com as características comuns notadas entre eles (generalidades)? Como é possível chegar ao conhecimento da verdade, se o mundo à nossa volta está repleto de nuances e infundáveis transformações? A solução encontrada por ele considera que o foco das reflexões na busca pelo conhecimento deveria ser sobre as “essências” existentes no “mundo das ideias” (um outro plano de percepção, acessível apenas através do uso da razão), superior ao imperfeito, inconstante e transitório “mundo dos sentidos” (o mundo que habitamos). É necessário abstrair das variações que observamos e focar nas essências imutáveis, sua origem; enfim, desconsiderar o mundo natural perceptível em favor daquele outro, ideal, onde habita a “verdade”.

O essencialismo de Platão teve impacto profundo e um tanto negativo na trajetória do pensamento evolutivo, visto que resultou no desencorajamento de esforços de investigações materiais e detalhadas sobre os fenômenos da vida e os dirigiu para questões abstratas e reflexivas. De fato, isso perdurou por séculos. Nas palavras de Ernst Mayr, “*sem questionar a importância de Platão para a história da Filosofia, devo dizer que para a Biologia ele foi um desastre*” (tradução livre).

A contribuição de Aristóteles (384-322 a.C.) para a Biologia é imensa, assim como sua influência. Nascido em Estagira (antiga Macedônia, hoje Grécia), fundou em Atenas sua própria instituição em 335 a.C., o “Liceu”, e deixou importantes obras, tais como: *A Geração dos Animais* (*De Generatione Animalium*), *História dos Animais* (*Historia Animalium*) e *Partes dos Animais* (*De Partibus Animalium*), além de outras contribuições menores. Estudou tópicos extensos, tais como reprodução, fisiologia, comportamento e morfologia, tendo mostrado particular interesse sobre animais aquáticos. Diferentemente das ênfases primariamente reflexiva e abstrata de Platão, as investigações de Aristóteles baseavam-se em experimentações objetivas do mundo real. Nesse pro-



cesso de busca de conhecimento ele viajou, examinou e dissecou indivíduos de dezenas de grupos de animais e plantas, tendo realizado estudos diretos em seus locais de vida. Suas observações detalhadas resultaram na crucial constatação de que a organização das características dos organismos é hierárquica (Aristóteles constatou que há níveis, ou camadas, de similaridades). Isso o levou à proposição de um sistema de classificação também hierárquico, que constituiu a base da lógica taxonômica utilizada desde então, além de servir como ponto de partida para tentativas de compreensão posteriores sobre processos naturais capazes de explicar tal estrutura intuitiva (incluindo hipóteses evolutivas).

Aristóteles não adotou a ideia de transmutação de espécies que para ele eram entidades fixas e de essência imutável. Na sua compreensão, os seres vivos estavam ordenados em uma sequência gradual, linear, de formas com complexidade crescente, uma grande cadeia natural progressiva, perfeita e eterna. Tal visão geral influenciou pensadores cristãos na formulação do conceito de “Grande Cadeia dos Seres”, ou a “Escada dos Seres” (*Scala Naturae*), uma estruturação do mundo natural que seria o reflexo do planejamento organizado da vida por Deus (que para Aristóteles, evidentemente, era uma entidade diferente daquela das tradições Abraâmicas), tendo a espécie humana como ápice do processo de criação na Terra. Um outro aspecto profundo do pensamento aristotélico é a sua marcada teleologia, com a percepção de que tudo o que existe (estruturas inanimadas, seres vivos e mesmo suas partes constituintes) tem uma finalidade, um objetivo ou propósito prévio para a sua existência. A proposta de processo evolutivo vislumbrada por Darwin foi revolucionária ao ser capaz de desmontar a lógica do pensamento teleológico prevalente durante tantos séculos.

Posteriormente a Aristóteles, Epicuro (341-270 a.C.) foi um importante filósofo que se aproximou das ideias de Empédocles sobre a formação e organização dos seres vivos a partir de um processo puramente mecânico e não-teleológico, que lembra primitivamente a lógica da seleção natural. Nascido na ilha grega de Samos, praticamente nada restou de

seus escritos originais. Sabemos que, assim como Aristóteles, era um empiricista (investigava a natureza através de experimentos e observações diretas) e que sua filosofia, denominada de Epicurismo, foi popular durante os séculos imediatamente seguintes ao seu período de vida.

O pensamento de Epicuro foi especialmente difundido e interpretado na importante obra do filósofo e poeta romano Tito Lucrécio Caro (ca. 94-55 a.C.) *De Rerum Natura* (*Sobre a Natureza das Coisas*), o qual também foi influenciado pelo pensamento de Empédocles, dentre outros (como o atomista grego Demócrito [ca. 460-370 a.C.]). No “Livro V” desse extenso poema, Lucrécio trata da questão do surgimento e preservação de grupos vivos, indicando claramente sua percepção das ações do acaso, da falta de propósito pré-determinado na organização da vida, da importância da funcionalidade das formas geradas, e de sua sobrevivência diferencial. Em uma passagem desse livro, ele discorre: “Pois, decerto, nem por designio os primórdios das coisas se colocaram em ordem pela sagaz providência, nem decidiram quais movimentos perseguiriam, muitos desses primórdios” ... “dessa forma se dá que, ao longo das eras imensas, pela experiência de todo tipo de moto e congresso, finalmente juntam-se: aqueles que, por acaso, ao se encontrarem darão os inícios às mais grandiosas coisas: mares e terras e céus e as espécies viventes”. Lucrécio não deve ser visto, contudo, como adepto de uma visão estrita de gradualismo (assim como muitos de seus antecessores gregos), embora esteja clara a sua aceitação do conceito de sucessão de seres vivos.

Com a queda do Império Romano e a ascensão do cristianismo ao longo da Idade Média na Europa (e, por conseguinte, do poder da Igreja), obras como *De Rerum Natura*, que apresentavam ideias consideradas heréticas e intoleráveis para aquela instituição, foram tiradas do alcance da população, muitas sendo simplesmente destruídas sempre que localizadas. De maneira surpreendente, uma cópia restante do livro de Lucrécio foi encontrada no ano de 1417 pelo estudioso italiano Poggio Bracciolini (1380-1459), guardada em um mosteiro medieval. A partir daquele notável manuscrito, Bracciolini solicitou a

confeção de outros exemplares e, assim, as ideias de Lucrécio (e de alguns daqueles que o influenciaram) puderam ser novamente conhecidas e difundidas. *De Rerum Natura* é reconhecido como tendo posteriormente

impactado profundamente vários filósofos e pensadores importantes desde então, tendo sido o estopim de mudanças que levaram ao Renascimento e à Revolução Científica, e ao Iluminismo dois séculos mais tarde.



Figura 18.

Página de cópia de *De Rerum Natura*, de Lucrécio (1483) (Domínio público, via Wikimedia Commons).

Conclusões

Um fato fica claro a partir da quantidade de ideias transmutacionistas surgidas ao longo da história do pensamento humano: independentemente do momento e onde quer que tenha sido, e mesmo ainda em versões superficiais e inacabadas, o conceito geral de evolução sempre surgiu como a melhor explicação natural para os fenômenos da vida. Na antiguidade, muito pouco era conhecido acerca dos detalhes da biologia. Microrganismos eram inteiramente desconhecidos; a

genética resumia-se à constatação de que “o semelhante gera o semelhante”; os trabalhos com biogeografia eram estritamente locais, já que não se conhecia a fauna e flora de outros continentes; a geração e reprodução de animais e plantas era um mistério total; a anatomia era entendida apenas na forma mais rudimentar. Ainda assim, com todas essas deficiências no conhecimento básico, ficava claro que algum tipo de transformação, ou mudança de longo prazo, deveria estar por trás da diversidade e da organização dos seres vivos.

Tal conclusão baseou-se, inicialmente, na observação da diversidade biológica, suas semelhanças e diferenças, e na estruturação de suas características. Apesar dos seres vivos serem todos muito diversos, alguns eram mais diferentes, ou mais similares entre si do que outros. Além disso, e acima de tudo, suas similaridades e diferenças não pareciam ser arrançadas aleatoriamente, mas sim hierarquicamente organizadas. Havia camadas dentro de camadas de semelhanças. Era evidente, por exemplo, que uma cabra e um porco, apesar de muito distintos, eram mais parecidos entre si do que qualquer um dos dois em relação a um lagarto. E, por sua vez, a cabra, o porco e o lagarto compartilhavam semelhanças que não eram vistas em uma sardinha. Mas, todos esses animais eram mais parecidos entre si do que qualquer um deles com um polvo. Essa organização de grupos dentro de grupos só foi formalmente reconhecida por Aristóteles (que, ironicamente, era um fixista, como apontado anteriormente). Tal arranjo das características biológicas em camadas de similaridades é uma das principais consequências esperadas do processo evolutivo, e até hoje uma das observações mais fortemente associadas à argumentação evolutiva.

Apesar das múltiplas e criativas tentativas de se encontrar uma explicação natural para a organização e a diversidade da vida, ao longo de mais de dois milênios, nenhum pensador chegou a um quadro completo da estrutura da evolução até meados do século XIX. Muitos corretamente concluíram que os seres vivos passaram por grandes modificações ao longo da história, outros intuíram alguma forma de descendência com modificação, ainda outros efetivamente chegaram a ideias primárias de seleção natural, mas nenhum chegou à espetacular síntese de observações, experimentos e conclusões que foram oferecidos por Charles Darwin.

Podemos perguntar: se não tivesse havido Darwin, quanto tempo demoraríamos para alcançar a mesma teoria? Acreditamos que não muito. Talvez alguns poucos anos. Wallace já chegara essencialmente às mesmas conclusões gerais, embora em uma versão muito menos elaborada. Se Darwin não existisse,

Wallace provavelmente se dedicaria mais intensamente ao assunto e poderia chegar a uma síntese de magnitude semelhante. Não lhe faltavam talento e intelecto para tal. Com a obra convincente, porém abreviada, de Wallace, os mesmos que apoiaram Darwin, como os britânicos Thomas Henry Huxley (1825-1895), Charles Lyell e Joseph Dalton Hooker (1817-1911), o teriam igualmente seguido e possivelmente talvez até participado mais ativamente do desenvolvimento da teoria evolutiva. Assim, é concebível pensar que a evolução tivesse se desenvolvido no mesmo ritmo, embora talvez menos concentrada na obra de um único nome. Se Wallace não assumiu protagonismo na teoria da evolução, isso se deve ao fato de que Darwin já estava muito adiante no assunto, tendo acumulado mais de vinte anos de rigorosas observações e reflexões a respeito da origem das espécies antes da publicação do *A origem das espécies*. Na época em que, brilhantemente, chegou ao cerne das mesmas ideias, Wallace era ainda jovem, mas em vista da enorme dianteira do trabalho de Darwin, concluiu que continuar naquela linha de pesquisa seria um esforço redundante de sua parte. O próprio Wallace referia-se à teoria da evolução como “a teoria de Darwin”.

Na ausência de Darwin, sendo todos os outros fatores iguais, é provável, assim, que a teoria da evolução tivesse igualmente se desenvolvido na Inglaterra da segunda metade do século XIX. Mas, enfim, este é só um exercício em especulação. É importante notar, por outro lado, que Wallace era um indivíduo bastante diferente de Darwin, com menos respeitabilidade na área acadêmica, menos recursos financeiros e com um domínio do método científico definitivamente inferior. Wallace era adepto do espiritualismo e bastante propenso a escorregar em direção ao sobrenatural. Como mencionado, achava que certos elementos da vida – a mente e o cérebro humanos, por exemplo – não poderiam ser explicados unicamente por mecanismos naturais seletivos. Além disso, assim como o biólogo alemão August Weismann (1834-1914), Wallace pode ser considerado um “ultrasselecionista”, tendo conferido em sua visão evolucionista um papel exagerado à

seleção natural na formatação dos seres vivos (algo não concebido pelo próprio Darwin). Essas diferenças poderiam, então, ter resultado em um atraso histórico no entendimento da evolução, ou mesmo na montagem de uma teoria evolutiva com ênfases distintas daquela proposta originalmente? Deixamos isso para a imaginação dos leitores.

Há outra questão intrigante na história da evolução pré-Darwiniana: por que o desenvolvimento de uma teoria evolutiva plena demorou tanto tempo? As razões para isso parecem ser primariamente de ordem cultural e contextual. Inevitavelmente, questões sobre a história da vida acabam por envolver a própria história humana. Em todas as civilizações conhecidas, a origem dos seres humanos é objeto crucial de mitologias centrais na cultura dos respectivos povos. Tais mitos são arraigados profundamente na maneira de ver o mundo e na forma da estruturação das relações de poder das sociedades, intimamente ligadas à religião organizada. A civilização ocidental não foge a esse padrão, com o cristianismo, dominante a partir do século V, sendo impermeável a tentativas de se questionar a narrativa bíblica. Apenas com o Renascimento, como visto, em grande parte influenciado pela redescoberta e popularização do *De Rerum Natura* de Lucrécio, foi possível a chegada à Revolução Científica, ao Iluminismo e a uma visão mais objetiva das relações causais do mundo natural, e da origem humana principalmente. Ernst Mayr, ao menos em parte, compartilhou dessa interpretação ao sugerir que a teoria Darwinista desafiou convicções básicas do seu tempo, algumas das quais constituíam pilares do dogma cristão em sua sociedade. Dentre elas, ressaltamos a crença em um mundo constante, basicamente imutável, perfeito, projetado por um criador sábio e bondoso, no qual o curso da existência segue um plano pré-determinado e o Homem ocupa uma posição especial na obra da criação; não era admitida qualquer possibilidade de transição entre formas animais e os seres humanos. Reconhecemos que tais conceitos religiosos foram importantes como obstáculos à aceitação da proposta Darwinista em meados do século XIX, e continuam a ter

papel determinante nesse sentido na maioria das sociedades ocidentais do mundo atual. Darwin e Wallace conseguiram vislumbrar uma ideia de processo evolutivo inovadora e revolucionária porque, uma vez plenamente convencidos da ideia da transmutação, mergulharam profundamente e com entusiasmo na busca de um mecanismo natural plausível que a explicasse. A jornada histórica aqui apresentada é uma amostra de que outros antes deles esbarraram nesse mesmo mecanismo, mas não o reconheceram plenamente, possivelmente porque tinham outros questionamentos e visões de mundo. Que as lições da História possam nos ensinar algo sobre como estamos fazendo, hoje, as nossas próprias perguntas.

Agradecimentos

À Profa. Rosana Tidon pelo convite e incentivo na confecção do trabalho, e aos revisores de versões prévias do manuscrito. Nossa mais sincera gratidão a Dione Seripieri e Vinícius Reis (Museu de Zoologia, Universidade de São Paulo; São Paulo); John van Wyhe (The Complete Work of Charles Darwin Online [http://darwin-online.org.uk/]); e Jon Rollins e William B. Ashworth, Jr. (Linda Hall Library of Science, Engineering & Technology; Kansas City, EUA), por ajudarem na busca, elaboração e com permissões de uso de ilustrações.

Para saber mais

- BOWLER, P. J. *Evolution: the history of an idea*. Berkeley: University of California Press, 2003.
- BROWNE, J. A. *A Origem das espécies de Darwin: uma biografia*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2007.
- CARMO, V. A.; MARTINS, L. A-. C. P. Charles Darwin, Alfred Russel Wallace e a seleção natural: um estudo comparativo. *Filosofia e História da Biologia*, v. 1, p. 335-350, 2006.
- DESMOND, A.; MOORE, D. *Darwin: a vida de um evolucionista atormentado*. São Paulo: Geração Editorial, 2001.
- MAYR, E. *O desenvolvimento do pensamento biológico: diversidade, evolução e herança*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1998.



Seminário em formato *live*: uma abordagem alternativa no ensino-aprendizagem de evolução biológica

Jéssica Prado Silva¹, Roberto Meira Pires Rocha², Luciana Aguilar-Aleixo³

¹ Graduanda do curso de Bacharelado em Ciências Biológicas da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), Vitória da Conquista, BA

² Graduando do curso de Licenciatura em Ciências Biológicas da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), Vitória da Conquista, BA

³ Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), Departamento de Ciências Naturais (DCN), Vitória da Conquista, BA

Autor para correspondência – lucianaaleixo@uesb.edu.br

Palavras-chave: aprendizagem baseada em projeto, biologia evolutiva, ensino de evolução, estratégias de ensino-aprendizagem, metodologia alternativa, metodologia ativa



O ensino de evolução biológica é facilmente distorcido por diversos fatores, como sua fragmentação curricular, a polêmica gerada frente a crenças religiosas e a carência de metodologias que instiguem sua compreensão. Esta pesquisa investiga as contribuições de uma metodologia alternativa no ensino-aprendizagem de evolução biológica por alunos da disciplina de Biologia Evolutiva do curso de Ciências Biológicas. Por meio da preparação e apresentação de um evento *online* aberto ao público geral com o tema “Na trilha da Evolução: de Darwin à Síntese Estendida”, foi sugerido que os alunos-palestrantes respondessem a dois questionários, um prévio e outro após o evento, para que pudéssemos mapear por meio de suas respostas as contribuições e limitações de tal metodologia alternativa. O processo de construção e apresentação do evento teve um retorno positivo de todos os palestrantes que, apesar de relatarem ansiedade e sobrecarga, consideraram o evento uma experiência incrível, que agregou grande amadurecimento pessoal e profissional, além de contribuir para o currículo e futura atuação no ensino e na divulgação científica. Ainda segundo os participantes, o formato *online*, apesar de esfriar as relações humanas características de um evento presencial e contar com a imprevisibilidade da conexão à internet, proporciona também um alcance maior de público e uma experiência inovadora.

Introdução

A evolução é considerada eixo integrador das Ciências Biológicas, por interconectar os conhecimentos explicando a origem de toda a biodiversidade (VIEIRA; ARAÚJO, 2021). Entretanto, a evolução biológica ainda é mal compreendida pela maioria das pessoas. Nobre, Soares e Farias (2017) destacam que os equívocos na interpretação dos processos evolutivos são frequentes e não são cometidos apenas por alunos, mas também por professores, apontando a necessidade de melhor fundamentação do processo evolutivo nos cursos de formação docente.

Para romper essa estrutura compartimentalizada de ensino, Morin e Lisboa (2007) apostam na interdisciplinaridade, pois não basta apresentar os assuntos de maneira fragmentada sem dar significados aos conceitos, deve haver a promoção de um pensamento crítico, contextualizado com outros saberes. Dessa forma, o aluno estará apto a analisar, buscar informações e desenvolver senso crítico, podendo então discernir o conhecimento científico do conhecimento popular (PEGORARO *et al.*, 2016).

Em um trabalho realizado por Palcha e Oliveira (2014) com discentes do ensino superior, foi constatado que estes imaginam um enorme distanciamento entre o conhecimento evolutivo propagado nas universidades e o ensinado na educação básica. Os autores refletem sobre a importância da formação docente nas relações entre universidade e escola. Por vezes o mito positivista de que a ciência é imutável e realizada por gênios é disseminado no ensino de biologia (ARAÚJO, 2021). O docente tem papel fundamental na seleção do material e na mediação da leitura pelos discentes, propiciando a educação científica e auxiliando os estudantes a desenvolver formas de pensar e falar que se aproximem das utilizadas no meio científico (DALAPICCOLA; SILVA; GARCIA, 2015).

O que foi observado por Goedert, Delizoi-cov e Rosa (2003) é que, mesmo nos cursos superiores, há sérias limitações, já que

os conteúdos de Evolução estão centrados em apenas uma disciplina de todo um curso de formação de professores de Biologia e pouco são articulados com outras áreas. Por vezes, também são tratados como verdades absolutas, contribuindo para o pensamento equivocado de que a Ciência é imutável. Esses dados evidenciam que mesmo dentro das universidades, a Biologia Evolutiva sofre com recortes e falta de aprofundamento, o que pode interferir na boa formação dos futuros professores que atuarão na educação básica.

O ensino tradicional, baseado em aulas expositivas e avaliações escritas como únicas ferramentas de ensino-aprendizagem vem sendo criticado, já que ao aluno é atribuído um papel passivo, enquanto o professor é considerado o detentor do conhecimento. As metodologias ativas são estratégias pedagógicas que colocam o foco do processo de ensino-aprendizagem no estudante, em contraste com o ensino tradicional, centrado no docente (VALENTE; ALMEIDA; GERARDINI, 2017). Propor aos alunos uma didática inovadora, que crie um maior canal de comunicação entre eles e seus professores, promove o despertar de habilidades que vão além da sala de aula, estimulando a criação de conexões com o cotidiano (ROLDI; SALIM; PIRES, 2018).

Ao realizar uma revisão das metodologias ativas empregadas no Brasil, Paiva *et al.* (2016) identificaram grande diversidade de metodologias e formas de operacionalização. Romper com o modelo tradicional de ensino foi apresentado como alternativa positiva para o desenvolvimento da autonomia do aluno. Berbel (2011) destaca que várias são as estratégias alternativas com potencialidade de levar os alunos à aprendizagem para a autonomia. A Aprendizagem Baseada em Projetos (ABProj) pode associar ensino, pesquisa e extensão, possibilitando um aprendizado real, significativo, interessante e ativo, concentrado no aprendiz. Desperta a iniciativa, responsabilidade, investigação e criação, levando os discentes a se inserirem conscientemente na vida profissional e social (BERBEL, 2011).

Surpreendidos pela pandemia da COVID-19, as formas tradicionais de se ensinar tiveram de ser adaptadas ao formato *online*. Na imersão de uma proposta diferenciada de ensino-aprendizagem a princípio assustadora, o corpo discente sente-se motivado a buscar novas fontes e se aventurar em debates, trazendo uma energia nova instigadora que não é encontrada nas aulas tradicionais previsíveis. Diante do contexto apresentado, este trabalho tem como objetivo investigar a relevância da metodologia alternativa “Seminário em formato *live*” no ensino-aprendizagem de Evolução Biológica a partir do ponto de vista de alunos da disciplina de Biologia Evolutiva.

Metodologia

Esta pesquisa baseia-se em uma metodologia quali-quantitativa, defendida por Minayo (2009) que, por utilizar abordagens complementares, produz riqueza de informações, aprofundamento e maior fidedignidade interpretativa.

No início da disciplina foi proposto um projeto de extensão no qual os discentes atuariam como palestrantes. Os discentes foram estimulados a se organizarem em trios e a selecionar subtemas dentro da temática proposta, contextualizando o conhecimento desde a origem do pensamento evolutivo até a Síntese Estendida, passando pelos fatores evolutivos estabelecidos durante a Síntese Moderna. Oito grupos prepararam as palestras de aproximadamente 30 minutos sob orientação da professora da disciplina. Esta estratégia se enquadra na proposta de ABProj e inclui elaboração da proposta, construção do produto (palestras), organização e divulgação do evento, inscrição dos participantes, realização do evento, certificação, avaliação e elaboração do relatório final. O evento ocorreu em duas noites, com carga horária total de 7 horas. Cabe destacar que além do desenvolvimento deste

projeto, também foram apresentadas aulas teóricas e realizados debates ao longo do semestre, que foi iniciado de forma presencial e finalizado no ensino remoto emergencial.

Além dos 24 discentes matriculados na disciplina e da professora orientadora, o projeto contou também com a contribuição de oito monitores. Os monitores foram convidados em função do seu desempenho na disciplina nos semestres anteriores e puderam escolher que grupo monitorar de acordo com a afinidade pelos temas.

Focados em compreender o impacto desta ABProj na aprendizagem de Evolução Biológica pela turma, elaboramos dois questionários que foram respondidos pelos alunos-palestrantes. A coleta dos dados foi realizada por meio destes questionários aplicados virtualmente que continham questões discursivas. Os sujeitos da pesquisa foram os alunos da disciplina de Biologia Evolutiva do curso de Ciências Biológicas da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, *campus* de Vitória da Conquista (UESB/VC), que participaram como palestrantes do Evento em formato *live* “Na trilha da Evolução: De Darwin à Síntese Estendida”. Os questionários foram aplicados em dois momentos: um prévio e outro após o evento. Por envolver pesquisadores e pesquisados, Gil (2008) caracteriza esse tipo de pesquisa como participante. Embora estimulados, a participação foi voluntária.

Para preservar a identidade dos alunos, substituiremos seus nomes por P1, P2 e assim por diante. Um termo de consentimento livre e esclarecido foi aplicado e assinado por todos os alunos que se voluntariaram a participar da pesquisa. Para cada questão construímos categorias que reúnem respostas. Fizemos então uma análise qualitativa destas categorias a fim de compreender o impacto da metodologia aplicada na aprendizagem de Evolução pelos alunos da disciplina.



Resultados e discussão

Foram coletados dados de 24 alunos cursantes da disciplina Biologia Evolutiva do período letivo 2019.2 da UESB/VC. Sendo 83% do sexo feminino e 17% do sexo masculino. Devido a greves, este semestre foi iniciado no final de janeiro de 2020, tendo sido interrompido pela pandemia por COVID-19 em meados de março. Por se tratar de uma disciplina com ementa comum entre as duas modalidades, há tanto alunos da licenciatura (91,7%) quanto do bacharelado (8,3%), de vários semestres.

Os participantes puderam escolher um tema da Biologia Evolutiva para apresentação. Com

os conteúdos bastante variados, todos os envolvidos tiveram a chance de conhecer mais não somente do tema de seu grupo, já que nas horas/aula dedicadas à preparação das apresentações, havia bastante socialização entre os grupos. Após a elaboração das palestras, os trios enviaram os slides para a docente, que fez uma revisão inicial e em seguida apresentaram uma prévia para a turma, que pôde opinar e contribuir para a melhoria das palestras, proporcionando a aprendizagem para além do tema de seu grupo. Após a primeira prévia, com participação de toda a turma em sala de aula *online* via *Google Meet*, a docente acompanhou prévias extras. A quantidade de prévias variou de acordo com a necessidade de readequação das palestras preparadas e em função da insegurança de cada trio. A programação do evento é apresentada na tabela 1.

Data da apresentação	Título da Palestra
01/12/2020 1ª Palestra	A origem das espécies e seus predecessores
01/12/2020 2ª Palestra	Evidências da Evolução Biológica
01/12/2020 3ª Palestra	Seleção Natural e adaptação de estruturas complexas
01/12/2020 4ª Palestra	Superbactérias: a evolução das espécies
02/12/2020 5ª Palestra	Evolução das plantas cultivadas: a síndrome da domesticação
02/12/2020 6ª Palestra	Mimetismo e camuflagem: a adaptação como resultado da seleção natural
02/12/2020 7ª Palestra	Seleção Sexual: um contraponto Darwiniano à Seleção Natural
02/12/2020 8ª Palestra	Síntese Estendida: além da síntese evolutiva

Para divulgação do evento foi criada uma logomarca e produzido um *card* com informações gerais do evento. Cada equipe produziu também um *card* específico sobre o tema de sua palestra. Estes *cards* foram divulgados via mídias sociais: *Instagram*, *Facebook* e *WhatsApp*, além da página da universidade e via e-mail enviado pela assessoria de comunicação da UESB. Estes

canais de comunicação alcançaram estudantes e professores da própria instituição e de outras instituições públicas e privadas de ensino superior e médio, bem como ex-alunos que hoje atuam como professores da educação básica, familiares e amigos dos discentes-palestrantes. Esta ampla divulgação assegurou o alcance de um público diversificado.

Tabela 1.
Programação do Seminário: de Darwin à Síntese Estendida.

Durante o evento os ouvintes puderam interagir com os discentes-palestrantes via *chat do Youtube*, quando houve importante participação do público. Após o debate, o público trouxe sua impressão sobre o seminário, demonstrando impacto positivo do conteúdo apresentado, já que dialogar com os palestrantes, esclareceu dúvidas e teceu elogios à equipe executora do evento.

A primeira pergunta do questionário *pré-live* sondou a contribuição do evento para o enriquecimento do aluno e futuro profissional. Todos os participantes reagiram positivamente. Cerca de 45,8% das respostas destacaram a contribuição para a formação profissional, 35,7% apontaram o amadurecimento pessoal e 12,5% elencaram como uma experiência nova. Berbel (2011) destaca que as metodologias ativas mobilizam o potencial intelectual dos estudantes, por estimulá-los a buscar e trabalhar as informações, reelaborando-as. Nesse processo são despertados espírito científico, pensamento crítico e reflexivo, valores éticos e outras conquistas que contribuem para o desenvolvimento de autonomia na formação pessoal e profissional dos discentes.

Muitos alunos demonstraram ansiedade e receio em relação ao evento, o que pode ser evidenciado nas respostas quanto às expectativas, em que 29,16% disseram estar ansiosos, principalmente por possíveis falhas tecnológicas e de conexão. Em um evento presencial realizado na disciplina optativa Citogenética os alunos também demonstraram ansiedade, que segundo eles foi compensada pela satisfação diante dos resultados positivos alcançados (AGUILAR-ALEIXO, 2021). A preocupação dos discentes-palestrantes com falhas de conexão é justificável, já que grande parte dos usuários brasileiros compartilha conexão à internet com domicílios vizinhos, sob constante iminência de perda de conexão (CUNHA; SILVA; SILVA, 2020).

Nobre, Soares e Farias (2017) afirmam em seu estudo que a evolução biológica encontra-se em transformação, buscando adequar-

-se aos desafios que surgem ao tema. Nesse sentido, ao avaliar a alternativa proposta ao invés da tradicional aula expositiva seguida de avaliação escrita, 45,83% consideraram a iniciativa diversificada e inovadora e 29,16% estimulante e acolhedora, enquanto 20,83% a apontaram como preparatória para os desafios da profissão.

Uma forma de favorecer a aprendizagem significativa é centrar as estratégias de ensino-aprendizagem nos alunos, que se tornam mais interessados e motivados (AGUILAR-ALEIXO, 2021). A partir das respostas ao questionamento de como a preparação desta *live* contribuiu para seu entendimento do assunto, foi notável a receptividade dos alunos à proposta. O desenvolvimento do projeto também proporcionou interatividade e colaboração entre os alunos, monitores e professora. Neste caso não houve necessidade de criar categorias, já que a maioria das respostas mesclam os mesmos pontos: maior entendimento dos conteúdos da disciplina e para além dela; busca por mais fontes de pesquisa e mais estudo para a preparação da apresentação; novas descobertas (conteúdos, termos, informações novas). Dentre as respostas podemos citar três que contemplam as demais:

- P4:** “Proporcionou entender melhor os conteúdos através das metodologias utilizadas pela professora e, ao trocar conhecimentos com outros discentes, os temas sobre evolução ficaram mais fáceis para compreender”.
- P23:** “Essa metodologia me fez buscar mais a fundo os conhecimentos acerca dos mecanismos que levam à evolução natural, sem a necessidade daquele aprendizado por memorização e reprodução”.
- P24:** “Revisei e aprofundei sobre o conteúdo. Parece que tudo fez sentido, o conhecimento que adquiri semestres atrás fundamentou depois deste seminário da disciplina de biologia evolutiva”



Proporcionar a participação do aluno no processo de construção da aprendizagem, deixando de lado barreiras impostas pelo tradicional modelo de ensino, em que o professor expõe o conteúdo e aluno ouve, torna o aluno coautor das atividades, capaz de levantar hipóteses, interpretar dados e elaborar explicações com base científica (ROLDI; SALIM; PIRES, 2018). O desenvolvimento de pensamento crítico é uma habilidade essencial que deve ser buscada e apreendida por futuros professores de biologia (JUMRODAH; LILIASARI; ADISENDJAJA, 2019).

Depois de concluído todo o processo de preparação e apresentação do seminário em formato *live*, um segundo questionário foi disponibilizado aos alunos-palestrantes. Os objetivos foram avaliar a contribuição da metodologia na compreensão do conteúdo e sondar os pontos positivos e possíveis dificuldades enfrentadas. Este segundo questionário foi respondido por 15 discentes. Vale ressaltar que as respostas aos questionários não faziam parte da avaliação da disciplina e, portanto, não eram obrigatórias. O segundo questionário foi passado após o fim do evento, que marca também o final da disciplina, motivo pelo qual obteve um número menor de respostas.

Para 77% dos participantes o evento supriu as expectativas. Estes demonstraram em suas respostas total contentamento com o que foi alcançado por meio da apresentação aberta ao público. Outros 16% foram além e disseram que suas expectativas foram superadas. Apenas um participante demonstrou descontentamento com o formato *online*: “Espero por esse evento desde que tive notícias dele, porém a modalidade *online* não me agradou”, relata o participante P3.

A construção de tal evento já é realizada na disciplina de Biologia Evolutiva há alguns semestres, o que causou expectativas nos alunos antes mesmo das atividades serem iniciadas. Entretanto, a pandemia ocasionada pela COVID-19 fez com que a realização do seminário, que era presencial, fosse repensada para um formato virtual. Com a proposta dessa nova modalidade, muitos dos participantes alegaram ter tido grande insegurança, mas que isto não comprometeu a qualidade do evento.

Em outra pergunta sobre os pontos positivos e negativos da realização da *live*, os positivos que mais apareceram nas respostas foram: ganho e socialização de conhecimentos; colaboração e empenho entre os envolvidos (colegas, monitores e professora); perda da timidez. Já entre os pontos negativos, destacam-se o tempo curto para a preparação da *live*; ausência do momento cultural; pouca aproximação em comparação ao que o evento presencial proporciona; pequenas falhas tecnológicas. O período em que o semestre permaneceu interrompido em decorrência da pandemia por COVID-19 ocasionou a redução do prazo de idealização e preparação do evento pela turma, que se demonstrou sobrecarregada por este projeto e pelas demais atividades desenvolvidas no ensino remoto emergencial.

O evento contou com 148 ouvintes certificados e ultrapassou 870 visualizações na primeira noite e 700 visualizações na segunda noite, já que o evento permanece salvo no *Youtube* @evolucaoparatodos, recebendo novas visualizações. O formato *online* gera um esfriamento das relações humanas, entretanto um dos participantes elencou alguns pontos positivos que só foram conquistados devido à modalidade virtual: alcance a um número maior de pessoas; alcance de diferentes públicos (não somente pessoas de dentro da academia); maior comodidade para palestrantes e ouvintes. Alguns participantes ainda defendem que as próximas edições do evento devem permanecer no formato *online*.

Ao utilizar *lives* como ferramentas para a socialização de informações sobre COVID-19 e formas de se evitar a contaminação, Neves *et al.* (2021) perceberam o envolvimento de um público que estava ausente nas ações em educação em saúde presenciais, participando ativamente na produção e na disseminação do conhecimento. A menor timidez no formato *online* relatada por alguns alunos parece, por meio da análise de suas respostas, estar ligada à sensação de conforto em aparecer em público virtualmente, da segurança de suas residências e não encarar o público diretamente, como é temido por muitos em um evento presencial.

Questionados se consideram a *live* mais eficiente que outras metodologias formais de ensino, os participantes dividem-se entre os que a consideram mais eficiente (45%) e aqueles que a consideram tão eficiente quanto outras metodologias (55%). Estes últimos alegam que a *live* foi uma metodologia muito significativa para o aprendizado, mas que outras metodologias, mesmo que tradicionais, desde que bem planejadas e executadas podem também ser valiosas. Já o primeiro grupo defende a *live* como mais eficiente justamente por ela ser uma metodologia bastante

diferenciada das demais. Podemos destacar as seguintes respostas:

- P8:** “Sim. É uma metodologia diferenciada. Auxilia bastante no entendimento do assunto por ser algo coletivo porque todos participam e aprendem”.
- P12:** “Acredito que seja relativo. Ambas, se forem bem planejadas e executadas, podem ser muito ou pouco eficientes”.
- P2:** “Equilibrado. Ambas têm importância como metodologia para aprendizagem.”



Outra questão investigada foi a contribuição da *live* no entendimento dos assuntos de Evolução Biológica. Praticamente todos os participantes disseram ter aprendido muito, já que além de terem pesquisado bastante em livros, artigos e na internet, as discussões em grupo também ajudaram na apropriação dos conteúdos. Para muitos, a vontade de passar um conhecimento claro e confiável para o público fez com que a dedicação fosse redobrada. Isto demonstra o alto grau de comprometimento dos envolvidos com a *live*, ocasionando uma aprendizagem significativa.

Quando solicitamos que os alunos avaliassem a contribuição do evento para sua formação, 50% dos alunos alegam que o evento proporcionou amadurecimento pessoal e profissional. Para exemplificar, destacamos a fala de alguns participantes:

P11: “a preparação e apresentação gerou em mim maturidade. Me sinto capacitada para encarar mais desafios”.

P14: “Me deixou mais preparada para a sala de aula e para eventos a que eu fui convidada”.

P15: “Contribuiu para eu ter uma formação diferenciada”.

Para 27% a *live* foi uma oportunidade de colocar os conhecimentos em prática, como comentou um dos alunos-palestrantes: P1: “esse evento foi uma oportunidade de pôr em prática a exposição de conhecimentos adquiridos.” Apesar de a disciplina estar sendo ofertada para uma turma de Licenciatura, houve a participação de alunos do curso de Bacharelado em Ciências Biológicas, e o participante P1 pontua que “para um bacharel com certeza esse é o melhor pontapé inicial para quem pretende seguir no ramo da divulgação científica”. Para 22% dos participantes, o evento agrega uma experiência nova.

A *live* por si só não é capaz de substituir a aula teórica e todo o saber adquirido ao longo da disciplina, mas pode contribuir de forma substancial para um ensino-aprendizagem mais dinâmico. As mesas-redondas virtuais possuem a vantagem de promover a interação de diferentes públicos de várias localidades, o que seria inviável no formato

presencial, devido aos custos de deslocamento (AGUILAR-ALEIXO; MARISCO, 2020).

No ensino tradicional, a falta de protagonismo dos estudantes favorece a memorização dos conteúdos, que muitas vezes são abordados de forma descontextualizada e desvinculados da realidade e dos aspectos histórico-sociais (ROSSASI; POLINARSKI, 2011). Ao desenvolver um projeto de extensão juntamente a um professor orientador que o acompanhe em todas as etapas a fim de sanar possíveis dúvidas e equívocos, o discente é despertado para indagações acerca do saber teórico versus aplicação prática (ARAÚJO; PAESI, 2017; OLIVEIRA; NETO, 2018). A utilização das mídias digitais tornou-se uma grande aliada dos discentes e docentes no processo de divulgação dos conteúdos produzidos na universidade para a sociedade (OLIVEIRA; NETO, 2018). Quando vinculadas de forma acessível, as mídias constituem-se num forte elo entre o público e a Ciência (FRAGA; ROSA, 2015).

Ferreira, Branchi e Sugahara (2020) apontam que tanto docentes como discentes têm se mostrado empenhados nos novos desafios lançados a partir do ensino remoto e que os depoimentos de alunos formam o *feedback* para a constatação da contribuição para o processo de ensino-aprendizagem necessário. Deixam ainda como reflexão que muitas das inovações deverão ser levadas para o ensino presencial a fim de promover novos saberes, principalmente no que diz respeito à introdução das tecnologias digitais.

Considerações finais

Diante da alternativa de ensino-aprendizagem proporcionada aos alunos, foi notável a grande aceitação dos mesmos quando disseram a quão significativa foi a metodologia para a trajetória curricular e pessoal. Sobre o formato *online*, o alcance de um público maior e uma experiência diferenciada, foram os pontos positivos mais recorrentes entre as respostas, enquanto o esfriamento das relações humanas e a imprevisibilidade de conexão foram desta-

cados como aspectos negativos. Vale ressaltar que os métodos tradicionais de ensino têm sua importância e não devem ser abolidos, uma vez que metodologias alternativas não devem substituir, mas se somar e contribuir com a pluralidade, estimulando e despertando nos alunos um olhar mais crítico-reflexivo do conhecimento científico.

Referências bibliográficas

AGUILAR-ALEIXO, L. Cromossomos, segredos e mistérios: metodologia alternativa no ensino de Citogenética. *Revista Extensão & Cidadania*, v. 9, n. 15, p.110-118, 2021.

AGUILAR-ALEIXO, L.; MARISCO, G. O diálogo universidade-sociedade promovido por projetos de extensão em Evolução, Saúde e Biodiversidade utilizando TDICs. *Revista Extensão & Cidadania*, v. 8, n. 14, p. 447-459, 2020.

ARAÚJO, L. A. L. Aspectos históricos e filosóficos do pensamento evolutivo no contexto de ensino. In: VIEIRA, G. C.; ARAÚJO, L. A. L. *Ensino de Biologia: uma perspectiva evolutiva*. Volume I: Interdisciplinaridade & Evolução. – Porto Alegre: Instituto de Biociências da UFRGS, 2021.

ARAÚJO, L. A. L.; PAESI, R. A. Discutindo Evolução Biológica no Ensino Fundamental: uma estratégia didática sobre o corpo humano. *Experiências em Ensino de Ciências*, v. 12, n. 7, p. 36-47, 2017.

BERBEL, N. A. N. As metodologias ativas e a promoção de autonomia dos estudantes. *Semina: Ciências Sociais e Humanas*. V. 32(1). 2011. p. 25-40.

CUNHA, L. F. F.; SILVA, A. S.; SILVA, A. P. O ensino remoto no Brasil em tempos de pandemia: diálogos acerca da qualidade e do direito e acesso à educação. *Revista Com Censo* v. 7, n. 3, p. 27-37, 2020.

DALAPICCOLLA, J.; SILVA, V. A.; GARCIA, J. F. M. Evolução biológica como eixo integrador da biologia em livros didáticos do ensino médio. *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 17, p. 150-173, 2015.

FERREIRA, D. H. L.; BRANCHI, B. A.; SUGAHARA, C. R. Processo de ensino e aprendizagem no contexto das aulas e atividades remotas no Ensino Superior em tempo da pandemia Covid-19. *Revista Praxis*, v. 12, n. 1 (sup), 2020.

FRAGA, F. B. F. F.; ROSA, R. T. D. Microbiologia na revista Ciência Hoje das Crianças: análise de textos de divulgação científica. *Ciência & Educação [online]*. 2015, vol.21, n.1, p.199-218.

GIL, A. C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6. ed. São Paulo: Editora Atlas SA, 2008.

GOEDERT, L.; DELIZOICOV, N. C.; ROSA, V. L. A formação de professores de Biologia e a prática docente: o ensino de evolução. *Atas do IV Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências (ENPEC)*. Bauru-SP: ABRAPEC, 2003.

JUMRODAH, J.; LILIASARI, S.; ADISENDJAJA, Y. H. Profile of pre-service biology teachers critical thinking skills based on learning project toward sustainable development. *Journal of Physics: Conference Series*, 1157, p. 1-6, 2019.

MINAYO, M. C. S. (Org.). *Pesquisa Social*. Teoria, método e criatividade. 18 ed. Petrópolis: Vozes, 2009.

MORIN, E. LISBOA, E. *Introdução ao pensamento complexo*. Porto Alegre: Sulina, 2007.

NEVES, V. N. S. et al. Utilização de lives como ferramenta de educação em saúde durante a pandemia pela COVID-19. *Educação & Sociedade*, v. 42, p. 1-17, 2021.

NOBRE, S. B.; SOARES, N. A.; FARIAS, M. E. Campos de interação entre o Ensino de Biologia Evolutiva e o Pensamento Complexo. *Acta Scientiae*, v. 19, n. 3, 2017.

DE OLIVEIRA, N. A. A.; NETO, J. A. M. Folhetim Lorenianas: aprendizagem baseada em projetos, pesquisa e inovação responsáveis na educação. *Revista e-Curriculum*, v. 16, n. 2, p. 341-363, 2018.

PAIVA, M. R. F. et al. Metodologias ativas de ensino-aprendizagem: revisão integrativa. *SANARE*, v. 15, n. 02, p. 145-153, 2016.

PALCHA, L. S.; OLIVEIRA, O. B. Discursos sobre leitura e Ensino de Evolução na Formação de Professores de Ciências. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 14, n. 1, p. 125-149, 2014.

PEGORARO, A. et al. A importância do ensino de evolução para o pensamento crítico e científico. *Revista interdisciplinar de ciência aplicada*, v. 1, n. 2, p. 10-15, 2016.

ROLDI, M. M. C.; SALIM, C. R.; PIRES, C. R. C. Ensino de evolução humana na educação básica: uma intervenção participativa para aproximar aspectos biológicos e aspectos socioculturais. *Experiências em Ensino de Ciências*, v. 13, n. 4, p. 339-356, 2018.

ROSSASI, L. B.; POLINARSKI, C. A. *Reflexões sobre metodologias para o ensino de biologia: uma perspectiva a partir da prática docente*. Porto Alegre: Lume UFRGS, 25p. 2011.

VALENTE, J. A.; ALMEIDA, M. E. B.; GERALDINI, A. F. S. Metodologias ativas: das concepções às práticas em distintos níveis de ensino. *Revista Diálogo Educacional*, v. 17, n. 52, p. 455-478, 2017.

VIEIRA, G. C.; ARAÚJO, L. A. L. *Ensino de Biologia: uma perspectiva evolutiva*. Volume I: Interdisciplinaridade & Evolução. Porto Alegre: Instituto de Biociências da UFRGS, 2021.



Panorama das pesquisas em ensino de evolução biológica publicadas na revista Genética na Escola no período de 2006 a 2020

Luciana Aguilar-Aleixo², Fagner Teles Almeida Leite¹

¹ Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), Departamento de Ciências Naturais (DCN), Campus de Vitória da Conquista, Vitória da Conquista, BA

² Licenciado em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), campus de Vitória da Conquista, BA

Autor para correspondência - lucianaaleixo@uesb.edu.br

Palavras-chave: aprendizagem significativa, atividades lúdicas, estado da arte, estado do conhecimento, jogos didáticos, metodologias alternativas

Este trabalho analisa o estado da arte dos estudos realizados em Evolução que foram publicados na revista *Genética na Escola* ao longo de seus 15 anos, de 2006 a 2020. Os objetivos foram identificar o número de trabalhos sobre esse campo disciplinar, comparativamente à Genética Molecular e Genética Clássica, também do escopo da revista e analisar o perfil dos trabalhos publicados nesta área. Como recurso metodológico para a categorização e agrupamento dos trabalhos, seguiu-se a análise de conteúdos proposta por Bardin (2011). Os resultados mostram que, de um total de 321 trabalhos publicados, a maioria foi voltada para a área de Biologia Molecular (33,6%), seguida de artigos em Genética Clássica (30,5%) e Evolução (17,1%). Dentre os 73 trabalhos de Evolução, a maioria foi categorizada como *Artigos conceituais* (26,0%), seguidos de *Roteiros de Atividades* (21,9%), *Jogos Didáticos* (19,2%), *Estudos de Caso* (12,3%), *Resenhas* (11,0%), *Relatos de Experiência* (6,8%) e *Encenações* (2,7%). A maioria dos 14 *Jogos Didáticos* focados em Evolução Biológica integram conceitos de Genética Clássica e Genética Molecular à Evolução, facilitando a compreensão dos conceitos apresentados. O fator evolutivo mais abordado nestes jogos didáticos foi a seleção natural, mecanismo evolutivo apresentado por Darwin e Wallace como o principal responsável pela adaptação dos seres vivos.

Introdução

Apesar de seu papel unificador, a Evolução Biológica não recebe a devida atenção nos currículos do ensino médio em todo o Brasil. Ao contrário, vem sendo trabalhada no final do terceiro ano do ensino médio, de forma descontextualizada e sem a devida integração com os demais conteúdos de Biologia (TIDON; LEWONTIN, 2004; ARAÚJO; VIEIRA, 2021). A Biologia Evolutiva é um tema que muitas vezes é pouco explorado na educação básica, seja devido a crenças religiosas, seja em função da simplificação da teoria. Diante disso, a busca de estratégias didático-pedagógicas que contribuam para a compreensão da Evolução Biológica deve ser incentivada.

Dentre as principais dificuldades encontradas por professores para abordagem da Evolução estão a falta de material didático e os conflitos religiosos (ALMEIDA; CHAVES 2014). Trindade et al. (2018) detectaram dificuldades de compreensão da teoria evolutiva que são comuns a estudantes brasileiros e portugueses e apontaram a falta de contato com o meio científico como fator limitante ao entendimento deste importante assunto. Visando facilitar a compreensão da Evolução Biológica, alguns conceitos fundamentais precisam ser elucidados, com destaque para “evolução” e “adaptação”, que apresentam significado distinto em outros contextos, o que pode dificultar sua compreensão (COUTINHO; SANTOS; MARTINS, 2012).

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para o ensino médio, na segunda competência específica de Ciências da Natureza e suas tecnologias, aborda que ao serem reconhecidos processos de transformação e evolução ocorrendo no ambiente desde as moléculas até as estrelas em diferentes complexidades, os estudantes teriam a oportunidade de refletir e situar a humanidade e o planeta Terra na história do Universo (BRASIL, 2018).

A BNCC propõe a seleção e aplicação de metodologias e propostas didático-pedagógicas diversificadas, adequadas ao perfil dos alunos nos seus diferentes contextos sociais (BRASIL, 2018). Por proporcionarem prá-

ticas educacionais atrativas e inovadoras, em que o aluno tem a chance de aprender de forma mais ativa, dinâmica e motivadora, os jogos educacionais podem se tornar ferramentas importantes no processo de ensino e aprendizagem (SAVI; ULBRICHT, 2008). A integração de atividades lúdicas com o conteúdo abordado, proporciona interesse e motivação, aumentando o envolvimento dos alunos e propiciando a aprendizagem significativa. Ao utilizarem jogos no ensino de Genética e Evolução para discentes de um curso de formação de professores, Campos, Menezes e Araújo (2018) verificaram que a dinâmica interativa dos jogos favorece a discussão, facilitando a construção do conhecimento pelos discentes. Para a maioria dos participantes os jogos propiciaram o entendimento de temas que a princípio consideravam de difícil compreensão.

O objetivo deste trabalho é avaliar a abordagem do Ensino de Evolução Biológica na Revista de publicação semestral *Genética na Escola*, desde o ano de sua criação, em 2006, até o ano de 2020. Para tanto, buscamos identificar e catalogar todos os artigos publicados ao longo da história da revista, analisando o perfil dos trabalhos voltados para o Ensino de Evolução Biológica e fornecendo informações úteis a pesquisadores que pretendam se dedicar a esta área.

Procedimento metodológico

Este trabalho pode ser caracterizado como estudo do “estado da arte” ou “estado do conhecimento” do tema “Evolução” na revista *Genética na Escola* desde o volume I, número 1, de 2006, até o volume XV, número 2, de 2020. A categorização e agrupamento dos artigos foram realizados segundo a análise de conteúdo de Bardin (2011). Após a leitura dos resumos e introduções de todos os artigos publicados, eles foram organizados de acordo com o foco temático, nas categorias Genética Clássica, Genética Molecular, Evolução e Áreas afins. Os artigos voltados para a Evolução Biológica foram agrupados também de acordo com o tipo de estudo em categorias delineadas *a posteriori*, com vistas a

compreender o enfoque dado pelos diversos autores e se a ludicidade é o foco principal dos estudos voltados para o Ensino de Evolução no país. Quanto ao tipo de estudo, foram criadas as categorias: *Artigo Conceitual, Encenação, Estudo de Caso, Jogo Didático, Relato de Experiência, Resenha* e *Roteiro de Atividade*. Dentro da categoria *Jogo Didático*, era verificada se a proposta apresentada foi ou não aplicada e avaliada. Tomaram-se os artigos que abordam Evolução para a presente análise. Procurou-se então identificar quais as tendências desses trabalhos, em que região do país foram realizados, quais os conceitos evolutivos diretamente abordados e, quando fosse o caso, quais as características dos jogos propostos.

Resultados e discussão

Foram contabilizados 321 trabalhos na revista *Genética na Escola* desde o seu primeiro volume em 2006 até 2020. Ao longo de seus 15 anos de existência, a revista publicou 15 volumes e 31 fascículos ou números, já que cada volume apresenta dois fascículos e no ano de 2016 houve uma publicação suplementar em comemoração aos 150 da publicação do artigo “*Versuche über Pflanzen-Hybriden* (Experimentos com plantas híbridas)”, de Gregor Johann Mendel.

Os resultados obtidos mostram que a revista vem abordando assuntos das diversas áreas de Genética, como Genética Clássica, Genética Molecular, e Evolução. Também houve a publicação de trabalhos de áreas afins. Do total de 321 trabalhos, 154 abordam a Genética Molecular. Dentre estes, 108 estão voltados apenas para a Genética Molecular, 34 versam sobre Genética Clássica e Molecular conjuntamente, 9 agregam Genética Molecular e Evolução e 3 apresentam uma abordagem ainda mais integrativa, unindo Genética Clássica, Genética Molecular e Evolução. É razoável inferir que a maioria das publicações dedica-se a essa área devido ao grande desenvolvimento da pesquisa em Genética Molecular no Brasil, refletido no elevado número de programas de pós-graduação, profissional e acadêmica. Segundo dados da CAPES, no

Brasil há 67 programas de pós-graduação em Biotecnologia, 177 programas somando-se as áreas de Ciências Biológicas I, II e III e 143 programas em Biodiversidade (BRASIL, 2021).

O desenvolvimento de técnicas para estudo de processos relativos à área molecular tem permitido o isolamento, análise e manipulação dos ácidos nucleicos e o mapeamento completo de diversos genomas tem permitido intenso desenvolvimento de diversas áreas das Ciências Biológicas, como biotecnologia, mapeamento genômico, medicina molecular e terapia gênica (RAPLEY; HUPERT, 2015). As técnicas moleculares têm sido empregadas nas mais diversas áreas, incluindo as Ciências Agrônomicas, que contam no Brasil com 218 programas de pós-graduação e a supracitada Medicina, que abrange 272 programas avaliados pela CAPES (BRASIL, 2021). Esse desenvolvimento institucional, por sua vez, parece corresponder ao volume de conhecimentos produzidos, no Brasil e no exterior, como, por exemplo, a crescente descoberta de genes, com o advento de técnicas cada vez mais refinadas e acessíveis.

Desde o segundo fascículo de 2012 a revista *Genética na Escola* passou a ser dividida em seções, que organizam os trabalhos de acordo com sua natureza. Há sete seções, denominadas: *Genética e Sociedade, Conceitos em Genética, Investigações em Ensino de Genética, Na Sala de Aula, Materiais didáticos, Resenhas* e *Um gene*. A seção *Um gene* tem como objetivo a divulgação científica focada na natureza e funcionamento de genes, bem como em sua importância. Desde então esta seção está presente em 17 dos 18 fascículos publicados, perfazendo um total de 27 trabalhos. Há artigos voltados para a Genética Molecular em todas as seções da revista, em consonância com a diversidade de abordagens deste tema.

Outros 141 trabalhos discorrem sobre Genética Clássica, disciplina e área de pesquisa que emergiu no início do século XX, com a chamada “redescoberta” da publicação de Mendel, de 1866. A Genética Clássica é ponto de partida para a compreensão dos mais diversos conteúdos de Genética, alvo da maior parte do conteúdo desta área trabalha-



do no ensino médio. Dentre estes trabalhos, 98 abordam exclusivamente a Genética Clássica, seis englobam Genética Clássica e Evolução e como supracitado, 34 associam Genética Clássica e Molecular e três integram Genética Clássica, Molecular e Evolução.

Apesar de sua relevância, os conteúdos de Genética geralmente são abordados superficialmente no ensino médio, devido a dificuldades tanto dos docentes quanto dos discentes. Muitas vezes este conteúdo não foi abordado adequadamente na formação docente, e seu caráter abstrato dificulta a compreensão (SILVA; CABRAL; CASTRO, 2019). A revista *Genética na Escola* dedica-se ao professor de Genética, buscando difundir experiências educativas na área. Visando contribuir com a transposição do conhecimento científico para o contexto da sala de aula, os artigos são redigidos em linguagem simples e com profundidade adequada a não especialistas.

Um total de 73 trabalhos enfocam a Evolução Biológica, o que corresponde a 22,7 % do

total. Dentre estes, sete trazem conceitos da Genética da Conservação, 49 abordam exclusivamente Evolução e os demais realizam uma abordagem integrada com Genética Clássica e/ou Molecular.

Um artigo trouxe a Genética do Desenvolvimento Animal associada à Embriologia, e um outro apresentou o desenvolvimento embrionário da mosca de chifre, este último incluído em “Áreas Afins”, já que não abordou conteúdos de Genética. Dentro desta categoria foram incluídos também dois trabalhos relacionados à Biologia Celular, um sobre comportamento humano e dois voltados para a Histologia Animal e Anatomia Vegetal. Todos os sete trabalhos incluídos na categoria “Áreas Afins”, como o próprio nome já diz, apresentam relação com a Genética e com a alfabetização científica sem, no entanto, abordar diretamente conteúdos de Genética. A Figura 1 apresenta as diferentes disciplinas contempladas pela revista ao longo de seus 15 anos.

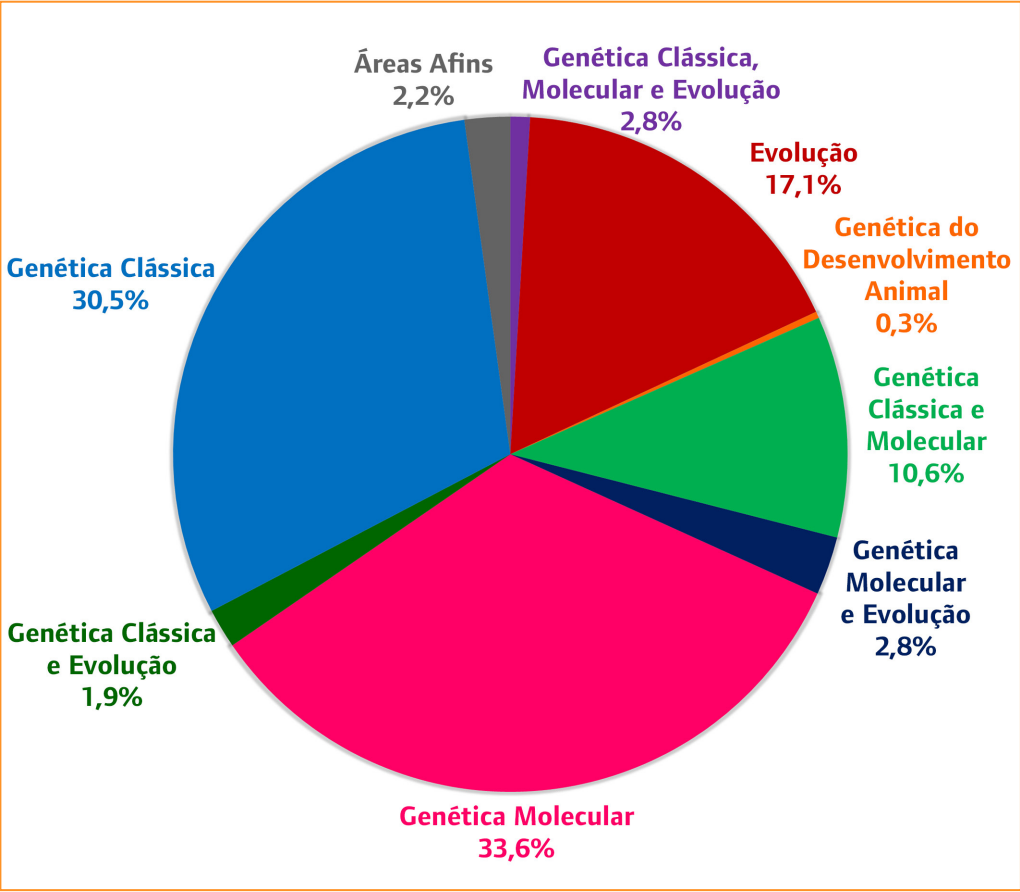


Figura 1. Temas abordados pela Revista *Genética na Escola* no período de 2006 a 2020 agrupados por categoria.

A maioria dos 73 trabalhos abordando Evolução foram categorizados como *Artigos Conceituais*, correspondendo a 26,0% destas publicações, seguidos de *Roteiros de Atividade*

de (21,9%), *Jogos Didáticos* (19,2%), *Estudos de Caso* (12,3%), *Resenhas* (11,0%), *Relatos de Experiência* (6,8%) e *Encenações* (2,7%), como apresentado na Figura 2.

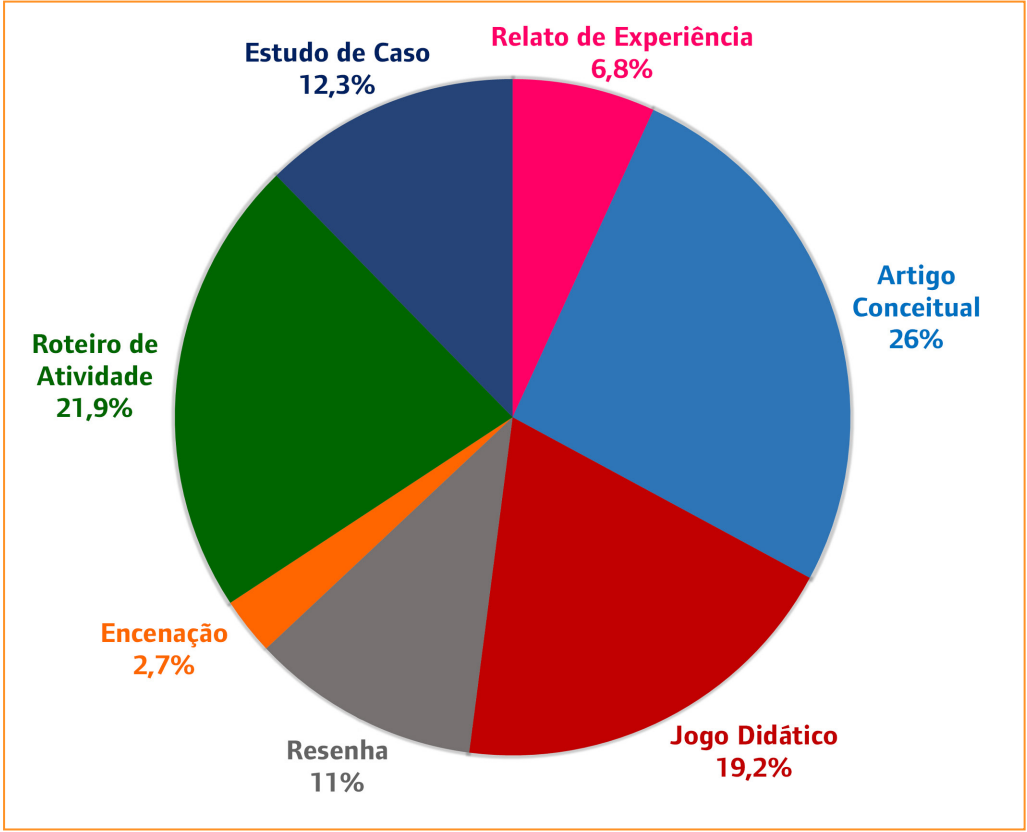


Figura 2. Categorização dos artigos em Evolução publicados na revista *Genética na Escola* no período de 2006 a 2020.

A categoria *Artigos Conceituais* inclui os trabalhos que apresentam conceitos evolutivos importantes, ou aspectos da história e filosofia da ciência, numa abordagem teórica que contribui para a construção do conhecimento biológico, indo além do livro didático. Geralmente tratam-se de aspectos pouco explorados ou polêmicos. Inclui uma variedade de temas, como gene, organismo e ambiente, a teoria evolutiva de Lamarck, vida e obra de Wallace, a hipótese darwiniana da pangênese, a contribuição da Genética para a teoria evolutiva, o teorema de Hardy-Weinberg, deriva genética, convergência ou paralelismo, poliploidia, dentre outros.

Muitos livros didáticos brasileiros abordam a teoria evolutiva como concluída, carecendo de contextualização histórica, essencial para

que os alunos compreendam sua construção ao longo do tempo. É comum a dicotomia entre Lamarck e Darwin, transmitindo a visão equivocada de que Lamarck defendia hipóteses mal formuladas e infundadas, ao passo que Darwin teria esclarecido a teoria evolutiva por seleção natural, correta e comprovada (ALMEIDA; FALCÃO, 2005). Evidenciar o importante papel de Lamarck e apresentar a ciência como uma construção coletiva e inacabada é fundamental. Os equívocos conceituais e históricos propagados nos livros didáticos contribuem para a dificuldade de compreensão da evolução pelos estudantes (CORRÊA et al., 2010). Uma alternativa promissora é a inserção da história e filosofia da ciência no ensino, favorecendo uma aprendizagem contextualizada.



Na maioria dos livros didáticos Wallace é pouco citado, sendo geralmente apresentado como o cientista que escreveu a *Darwin* em um acesso de febre, sem esclarecer o percurso que o levou independentemente à formulação da Evolução por seleção natural e sua real importância para a ciência. Conhecer a história de Wallace permite não só uma reparação sobre sua figura, destacando suas contribuições acadêmicas, como também ressaltar a importância do papel ativo do aprendiz na construção de seu conhecimento (VARELLA; CORSO, 2017).

Diante disso, trabalhos abordando a vida e obra de importantes naturalistas e suas contribuições à construção do conhecimento biológico, bem como aqueles que abordam conceitos fundamentais à compreensão da teoria evolutiva são importante fonte de informação, contribuindo para que os docentes do ensino básico superem certas limitações dos livros didáticos.

As publicações voltadas para a Evolução categorizadas como *Roteiros de Atividades* totalizaram 16 trabalhos. Por meio de histórias em quadrinhos, cenas de filmes, roteiros de aula em campo e de aula teórica, apresentam propostas criativas para a compreensão dos conceitos abstratos da Evolução Biológica. São encontrados nas seções *Na sala de aula* e *Materiais Didáticos*. Nelas os artigos não seguem a padronização tradicional, e apresentam subtítulos didáticos e esclarecedores que garantam ao texto maior fluidez. Além disso, os materiais didáticos estão anexados ao texto. Um dos propósitos da seção *Na sala de aula* é a socialização de iniciativas bem sucedidas entre professores dos diferentes níveis de ensino.

As nove publicações categorizadas como *Estudo de Caso* trazem uma situação problema que sob a supervisão do professor deve ser solucionada com base no conhecimento adquirido pelo aluno. Estes trabalhos são trazidos nas seções *Materiais Didáticos* e *Genética e Sociedade*. O estudo de caso leva o aluno à análise de um problema e à tomada de decisões. Assim como outras metodologias ativas, coloca o aluno diante de desafios que mobilizam seu potencial intelectual (BERBEL, 2011).

Os cinco trabalhos categorizados como *Relato de Experiência* trazem em sua abordagem vivências de projetos, experiências e reflexões sobre o ensino de Evolução. O artigo *Darwin: da universidade às escolas públicas da Paraíba*, apresenta a experiência de um projeto que articula ações de prática de ensino, extensão e pesquisa, visando a divulgação da teoria evolutiva em escolas públicas da Paraíba no ano do bicentenário de Darwin (FARIAS et al. 2009).

O trabalho *E se a Seleção Natural não existisse? Reflexões sobre o ensino da Seleção Natural e Deriva Genética* explora estes dois fatores evolutivos e seus respectivos potenciais, numa reflexão instigante que leva os estudantes à análise crítica. Esta proposta inovadora estimula o ensino de Evolução de forma interdisciplinar ao longo de toda a graduação, de forma que, ao cursarem o com-

ponente curricular Biologia Evolutiva, a Evolução já faça todo o sentido para os discentes (SIMON, 2017).

Foram identificadas oito *Resenhas*, incluindo a indicação de um livro, um filme, dois vídeos curtos, dois *websites*, um *software* e um jogo didático virtual. Em poucas palavras, as resenhas apresentam recursos que podem ser explorados em sala de aula, proporcionando o ensino e aprendizagem mais dinâmicos. Também podem ser úteis para a atualização de professores.

Dois trabalhos foram categorizados como *Encenações*. *A janela da vida: uma representação teatral sobre a Evolução Biológica*, propõe a abordagem de conceitos evolutivos básicos, como extinção, espécie e especiação, utilizando-se fantoches (PEREIRA et al. 2008). O *julgamento da Mutaçao* propõe um júri si-

mulado no qual a mutação é julgada, tendo a seleção natural como advogada de defesa e testemunha (SILVA et al. 2013). Essa prática auxilia no processo de ensino e aprendizagem, pois a mutação é um importante fator evolutivo e sua compreensão é essencial.

Foram catalogados 14 *Jogos Didáticos*, sendo que seis deles foram testados. A maioria dos trabalhos traz materiais para confecção de jogos, acompanhados das regras para sua aplicação, visando orientar alunos e professores. Informam também a duração, finalidade, conceitos abordados e sugerem público-alvo. Há jogos de tabuleiro, jogos de cartas, jogos online e atividades lúdicas. Em geral, esses artigos são trazidos pela revista na seção de *Materiais Didáticos*.

A maioria desses jogos não tratam apenas de Evolução. Muitos deles trazem conceitos de Genética Clássica e Molecular, que são integrados para dar embasamento aos discentes quanto aos mecanismos evolutivos. Atividades que apresentem a associação da Evolução com outras áreas do conhecimento são importantes, por favorecer sua compreensão como eixo norteador do conhecimento biológico. A Evolução tem papel central na Biologia, já que oferece uma perspectiva dos seres vivos que supera a descrição de suas características, atuando como organizadora do pensamento biológico (ARAÚJO; VIEIRA, 2021).

A maioria das publicações de jogos didáticos são oriundas do Sudeste do Brasil, região em que está concentrada a maioria das universidades dos programas de pós-graduação. Segundo dados disponibilizados pela CAPES, dos 266 programas de pós-graduação *Stricto Sensu* em Ciências Biológicas brasileiros, 101 concentram-se na região sudeste, o que corresponde a 38% do total (BRASIL, 2021).

O conceito mais abordado nos jogos foi a seleção natural, fator evolutivo determinístico responsável pela adaptação dos seres vivos e pela evolução de estruturas complexas (FUTUYMA, 2009). A seleção natural é a base intelectual de toda a carreira de Darwin, unificando sob a mesma base teórica vários fenômenos até então explicados desarticuladamente (ARAÚJO, 2021).



A maioria dos *Jogos Didáticos* é direcionada para os ensinos Médio e Superior como público-alvo. Muitos trabalhos indicam que o público dependerá do nível de profundidade estabelecido pelo professor. De acordo com Tidon e Lewontin (2004) e Araújo e Vieira (2021) a Evolução Biológica é abordada no terceiro ano do Ensino Médio. Este pode ser o motivo de se constatar maior quantidade de publicações voltadas para este público-alvo. Segundo Carneiro (2004) são destinadas poucas aulas ao conteúdo de Evolução, consideradas insuficientes para sua abordagem adequada. Uma outra problemática destacada por Tidon e Lewontin (2004) é a falta de material didático no Ensino Médio destinado ao tema. Esta lacuna seria uma outra justificativa para a quantidade de jogos didáticos encontrados na revista *Genética na Escola* para esta modalidade, numa tentativa dos pesquisadores de minorar esta deficiência.

Em um estudo comparativo, estudantes italianos demonstraram-se mais bem informados que os brasileiros. Provavelmente essa discrepância se deve a diferenças curriculares, já que discussões acerca da teoria evolutiva são inseridas na Itália desde as séries iniciais, ao passo que no Brasil os estudantes têm pouco contato com esta teoria no Ensino Fundamental (OLIVEIRA; BIZZO; PELLEGRINI, 2016).

Visando a melhoria no processo de ensino e aprendizagem, o jogo educativo é oferecido como um objeto que organiza e inter-relaciona conhecimentos específicos, exercitando a criatividade e o senso crítico (LEGEY et al. 2012). Transferir a atenção que os jovens dão aos jogos para atividades educacionais não é uma tarefa simples. Por esse motivo, tem aumentado o número de pesquisas que tentam encontrar formas de unir ensino e diversão com o desenvolvimento de jogos educacionais. Por proporcionarem práticas educacionais atrativas e inovadoras, nas quais o aluno tem chance de aprender de forma mais ativa, dinâmica e motivadora, os jogos educacionais podem se tornar auxiliares importantes do processo de ensino e aprendizagem (SAVI; ULBRICHT, 2008).

Considerações finais

Neste estudo foram levantados 321 trabalhos da Revista *Genética na Escola* durante seus 15 anos. Por meio da categorização desse universo amostral, encontrou-se que a Evolução foi tema de 73 artigos distribuídos em 25 dos 31 fascículos da revista. Apesar de seu papel integrador nas Ciências Biológicas, apenas nove trabalhos associaram a Biologia Evolutiva à Genética Molecular, seis agregaram Evolução e Genética Clássica, e somente três uniram estas três áreas em uma abordagem integrada.

A Genética Molecular foi foco de 33,6% das publicações, em consonância com sua aplicação nas mais diversas áreas como biotecnologia, biodiversidade, medicina e agropecuária. A Genética Clássica, tema da maioria das aulas de Genética na educação básica, foi alvo de 30,5% das publicações, ao passo que a Evolução foi tema de 17,1% dos trabalhos publicados na revista.

Os 73 trabalhos abordando a Evolução Biológica foram categorizados *a posteriori*. Dentre estes, 26% foram classificados como *Artigos Conceituais*, 21,9% como *Roteiros de Atividades*, 19,2% como *Jogos Didáticos*, 12,3% como *Estudos de Caso*, 11% como *Resenhas*, 6,8% como *Relatos de Experiência* e 2,7% como *Encenações*.

O 14 *Jogos Didáticos* abordando Evolução Biológica correspondem a jogos de cartas, jogos de tabuleiro, jogos online e outras atividades lúdicas, em sua maioria associando conceitos de Genética Clássica e Genética Molecular à Evolução, facilitando assim a compreensão de conceitos complexos. A seleção natural foi o fator evolutivo mais explorado nesses jogos, possivelmente por seu importante papel evolutivo na adaptação e surgimento de estruturas complexas.

Por seu papel integrador do conhecimento biológico, é importante que estratégias alternativas, que favoreçam a aprendizagem significativa de forma lúdica e contextualizada, a exemplo dos jogos didáticos, continuem sendo foco de estudos e atividades voltadas para a educação básica e superior.

Referências

ALMEIDA, E. R.; CHAVES, A. C. L. O ensino de Biologia Evolutiva: as dificuldades de abordagem sobre evolução no Ensino Médio em escolas públicas de Rondônia. *IV Simpósio Nacional de Ciência e Tecnologia*. Ponta Grossa, 2014. p. 1 – 12.

ALMEIDA, A. V., FALCÃO, J. T. R. A estrutura histórico-conceitual dos programas de pesquisa de Darwin e Lamarck e sua transposição para o ambiente escolar. *Ciência & Educação*, v. 11, n. 01, p. 17-32, 2005.

ARAÚJO, L. A. L. Aspectos históricos e filosóficos do pensamento evolutivo no contexto de ensino. In: ARAÚJO, L. A. L.; VIEIRA, G. C. (Orgs.) *Ensino de Biologia: uma perspectiva evolutiva*. Volume I: Interdisciplinaridade & Evolução. Porto Alegre: Instituto de Biociências da UFRGS, 2021. 324p.

ARAÚJO, L. A. L.; VIEIRA, G. C. A Evolução Biológica como eixo integrador do ensino de Biologia. In: ARAÚJO, L. A. L.; VIEIRA, G. C. (Orgs.) *Ensino de Biologia: uma perspectiva evolutiva*. Volume I: Interdisciplinaridade & Evolução. Porto Alegre: Instituto de Biociências da UFRGS, 2021. 324p.

BARDIN, L. *Análise de conteúdo*. Edições 70. Lisboa. Portugal, 2011. 229p.

BERBEL, N. A. N. As metodologias ativas e a promoção de autonomia dos estudantes. *Semina: Ciências Sociais e Humanas*. v. 32, n. 01, p. 25-40, 2011.

BRASIL. Ministério da Educação. *Base Nacional Comum Curricular. Ciência da Natureza e suas tecnologias*. Brasília, 2018.

BRASIL. Ministério da Educação. *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior (CAPES). Cursos Avaliados e Reconhecidos*. Brasília, 2021.

CAMPOS, R.; MENEZES, M. C. V.; ARAÚJO, M. Ensinar Genética e Evolução por meio de jogos didáticos: superando concepções alternativas de professores de ciências em formação. *Revista Genética na Escola*. v. 13, n. 01, p. 24–37, 2018.

CARNEIRO, A. P. N. *A evolução biológica aos olhos de professores não-licenciados*. 2004. Dissertação de (Mestrado em Educação Científica e Tecnologia). - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, p. 137, 2004.

CORRÊA, A. L. et al. História e Filosofia da Biologia como ferramenta no Ensino de Evolução na formação inicial de professores de Biologia. *Filosofia e História da Biologia*, v. 05, n. 2, p. 217-237, 2010.

COUTINHO, F. Â.; SANTOS, F. R.; MARTINS, R. P. As dificuldades na compreensão do sistema

de teorias evolutivas. *Ciência em Tela*. v. 05, n. 01, p. 1-8, 2012.

FARIAS, A. A. et. al. Darwin: “Da universidade às escolas públicas da Paraíba”. *Revista Genética na Escola*. v. 04, n. 02. p. 5-8, 2009.

FUTUYMA, D. J. *Biologia Evolutiva*, 3 ed, FUNPEC, 2009. 830p.

LEGEY, A. P; MOL, A.C.A; BARBOSA, J. V; COUTINHO, C. M. L. M. Desenvolvimento de Jogos Educativos Como Ferramenta Didática: um olhar voltado à formação de futuros docentes de ciências. *Alexandria Revista de Educação em Ciência e Tecnologia*, v. 05, n.3, p. 49– 82, 2012.

OLIVEIRA, G. S.; BIZZO, N.; PELLEGRINI, G. Evolução biológica e os estudantes: um estudo comparativo Brasil e Itália. *Ciência & Educação*, v. 22, n. 03, p. 689– 05, 2016.

PEREIRA, T. N. A. et al. A janela da Vida: uma representação teatral sobre a Evolução Biológica. *Revista Genética na Escola*. v. 03, n. 01, p.36-42, 2008.

RAPLEY, R.; HUPERT, N. Molecular Biology techniques and Bioinformatics. In: RAPLEY, R.; WHITEHOUSE, D. (Orgs.) *Molecular Biology and Biotechnology*. 6th Edition. Cambridge: The Royal Society of Chemistry. 2015. p. 1-39.

SAVI, R.; ULBRICHT, V. R. Jogos Digitais Educacionais: Benefícios e Desafios. *Revista Novas Tecnologias em Educação*, v. 06, n. 01, p. 1–10, 2008.

SILVA, C. C.; CABRAL, H. M. M.; CASTRO, P. M. Investigando os obstáculos da aprendizagem de Genética básica em alunos do Ensino Médio. *Educação Temática Digital*, v.21, n. 03, p.718–737, 2019.

SILVA, G. K. et al. O julgamento da Mutações. *Revista Genética na Escola*, V. 08, n. 01, p. 42-57, 2013.

SIMON, S. S. E se a Seleção Natural não existisse? Reflexões sobre o ensino da Seleção Natural e Deriva Genética. *Revista Genética na Escola*, v. 12, n. 01, p. 20-25, 2017.

TIDON, R; LEWONTIN, R.C. Teaching evolutionary biology. *Genetics and Molecular Biology*, v. 27, n. 1, p. 124–131, 2004.

TRINDADE, W. C. F. et al. Percepção da teoria da evolução por alunos de Biologia de uma universidade portuguesa e de uma universidade brasileira: uma análise comparativa. *Revista Brasileira de Genética*, v. 13, n. 02, p. 112–123, 2018.

VARELLA, M. A. C.; CORSO, J. A importância do tributo a Alfred Wallace no ensino de Ciências. In: ARAÚJO, L. A. L. (Org.) *Evolução Biológica: da pesquisa ao ensino*. Porto Alegre: Editora Fi, 2017. 519p.



Ensino de Evolução: o que dizem as pesquisas?

No artigo são discutidas algumas das principais contribuições das pesquisas sobre ensino de evolução. Apresenta-se um esboço dos primeiros estudos dos anos 1970, seguido de um balanço preliminar das movimentações intelectuais nas pesquisas em diversos países, inclusive no Brasil. Por fim, discute-se mais especificamente sobre a questão da rejeição da teoria evolutiva com base em crenças religiosas, tema muito focalizado por diversos pesquisadores e ainda controverso. A aceitação de evolução parece depender de vários fatores, principalmente a compreensão da natureza da ciência, a religiosidade e conhecimentos conceituais da evolução biológica. Diferentes pesquisas indicam que os fatores que envolvem a aceitação de evolução são múltiplos e não podem ser analisados isoladamente. É preciso considerar as crenças religiosas relacionadas com a teoria evolutiva de modo articulado com fatores cognitivos e socioculturais dos estudantes.



Nelio Bizzo¹, Leonardo Augusto Luvison Araújo²

¹ Universidade de São Paulo, Faculdade de Educação, São Paulo, SP
e Universidade Federal de São Paulo, campus Diadema, SP

² Universidade de São Paulo, Faculdade de Educação, São Paulo, SP

Autor para correspondência – bizzo@usp.br

Palavras-chave: evolução, criacionismo, darwinismo, evolucionismo, lamarckismo, educação

Introdução: a formação do campo de pesquisa

A biologia evolutiva tem uma importância única nas mais diversas áreas da ciência. Essa compreensão amplia-se mais ainda quando consideramos a vida no *tempo profundo*, ou seja, nos períodos de tempo que abrangem a história da Terra com a sua infinidade de espécies, formas de funcionamento biológicos e distintos ambientes. Quando as considerações evolutivas referem-se à nossa espécie, acrescentamos à complexidade da evolução biológica as questões de ordem cultural e existencial que permeiam a condição humana.

Apesar da reconhecida importância do conhecimento evolutivo, diversas pesquisas têm mostrado que a compreensão e a aceitação de evolução biológica ainda enfrentam muitos desafios e eles não estão restritos aos alunos da educação básica ou ao cenário brasileiro. Em outros países, a evolução biológica é uma das principais temáticas em que são detectadas dificuldades de compreensão conceitual (GREGORY, 2009). Tais dificuldades têm sido apontadas em pesquisas nas últimas décadas, as quais constataram a presença de concepções que conflitam com a ciência por parte de alunos e mesmo de professores no momento de resolver problemas e interpretar fenômenos biológicos em termos evolutivos (DEADMAN, KELLY, 1978; CLOUGH, WOOD-ROBINSON, 1985; BISHOP, ANDERSON, 1990; BIZZO, 1994).

As pesquisas pioneiras sobre ensino de evolução remontam à década de 1970. A importância de levantamentos das concepções prévias dos estudantes, ao iniciar uma sequência didática, ainda não fazia parte da prática comum de sala de aula naquela época, como viriam a apontar as recomendações de pesquisadores logo depois, em especial a partir dos anos 1990. Talvez um dos primeiros trabalhos acadêmicos lidando com o assunto tenha sido o trabalho de doutorado de John Deadman, apresentado ao *Chelsea College (University of London)*, em 1976. Ele

entrevistou 52 alunos que não haviam passado por aprendizado formal sobre Genética e Evolução em uma *Grammar School* perto de Londres (Hertfordshire), onde o professor Deadman trabalhava como professor de ciências. Os alunos pertenciam ao nível equivalente ao que antecede o ensino médio brasileiro, sendo apenas meninos, com idades entre 11-15. Um ano depois, após um período de ensino formal, quase todos os alunos ($n = 49$) foram entrevistados novamente, com foco em dois aspectos: as causas/motivos da evolução e os processos de mudança biológica (DEADMAN, 1976; DEADMAN, KELLY, 1978).

As descobertas deste trabalho seminal incluíram a categorização de padrões básicos de concepções relacionadas com os processos evolutivos. Alguns alunos descreveram a evolução como algo que aconteceu no passado, como parte de um acontecimento episódico. Outro grupo de alunos pôde perceber alguma continuidade entre o tempo passado e o presente. Os alunos mais jovens tendiam a estar no primeiro grupo, enquanto os mais velhos concentravam-se no último grupo, que era o maior, com 34 de 49 alunos (DEADMAN, 1976, p. 51).

Em relação à questão dos motivos/causas da evolução, a maioria dos alunos tendia a explicar o processo de modificação orgânica como resultado de algum processo que respondesse a necessidades do organismo, excluindo qualquer possibilidade de causas aleatórias. A “necessidade” desempenharia um papel importante, pois os organismos mudariam para “obter uma vida melhor”. Alguns alunos também tendiam a apontar as diferentes formas em que as mudanças ambientais moldavam os organismos. Por exemplo, a “Idade do Gelo” foi mencionada como responsável pelo desenvolvimento de pelos longos em alguns animais. Curiosamente, os exemplos dados por alunos incluíram apenas vertebrados.

Em relação à questão dos mecanismos de mudança evolutiva, um número considerável de alunos ($n = 19/49$) explicava a evolução de forma que foi chamada de “Lamarckista”, com uso ou desuso de algumas partes, que passam a ser herdadas. Algumas frases foram emblemáticas, como, por exemplo: “quando

os peixes saíram da água, eles tiveram que se livrar das guelras”. Quase todos os alunos poderiam explicar a evolução em termos de ações que atuaram no passado e ainda estão agindo hoje (DEADMAN, 1976, p. 62).

É notável que não houvesse referências à questão da religião (criação/evolução), ainda mais pelo fato de que os estudantes ingleses frequentam escolas que incluem aulas regulares de religião, em um Estado que não é laico. Esse fato ressaltava uma distinção marcante entre os ambientes educacionais britânicos e americanos da época. Por exemplo, Skoog (1984) estudou livros didáticos de biologia utilizados nos Estados Unidos e notou influências marcantes do movimento criacionista. Quatro em cada cinco livros didáticos de ciências lançados pouco antes da época da pesquisa traziam uma sessão sobre a criação especial, ao contrário do que acontecia com os livros antigos, que dificilmente traziam qualquer referência à Bíblia. Na verdade, em um estudo anterior, livros americanos de ciências publicados no período de 1900-1977 foram pesquisados em busca de sessões sobre criacionismo, seguindo diferentes edições e reimpressões. O resultado foi positivo para apenas três dos 93

livros incluídos na amostra; mesmo assim, dois desses livros trouxeram uma abordagem crítica ao criacionismo (SKOOG, 1979). A conclusão alertou para os danos que o crescimento do movimento criacionista poderia trazer para o ensino de biologia nos Estados Unidos (SKOOG, 1984). Com o período conservador que se seguiu com a era Reagan-Bush, essa tendência exacerbou-se, sendo exportada para outros países, com reflexos muito fortes no Brasil nos anos Trump (OLIVEIRA, COOK, 2019).

Outro estudo muito citado na literatura envolveu 110 alunos universitários, que passariam por período de ensino formal sobre evolução biológica, em uma disciplina optativa. O mesmo modelo experimental foi adotado, mas utilizando pré e pós-testes, acompanhados de entrevistas de voluntários. O material didático utilizado na disciplina foi especialmente produzido para contemplar os dados do pré-teste. Isso levava a crer que as mudanças seriam notáveis, pelo menos na compreensão da teoria evolutiva. No entanto, os resultados desapontaram os pesquisadores, que não constataram mudanças significativas na compreensão e na aceitação da teoria evolutiva (BISHOP, ANDERSON, 1990).



Os resultados desse estudo trouxeram impacto muito grande no contexto estadunidense, uma vez que ficou claro que não era apenas a questão religiosa que impedia a compreensão da teoria evolutiva. Assim, foi planejado um congresso científico para dis-

cutir especificamente o ensino de evolução (*Evolution Education Research Conference*), que acabou por ocorrer em dezembro de 1992, na Universidade da Louisiana, financiada pela *National Science Foundation* (NSF) (Figura 1).

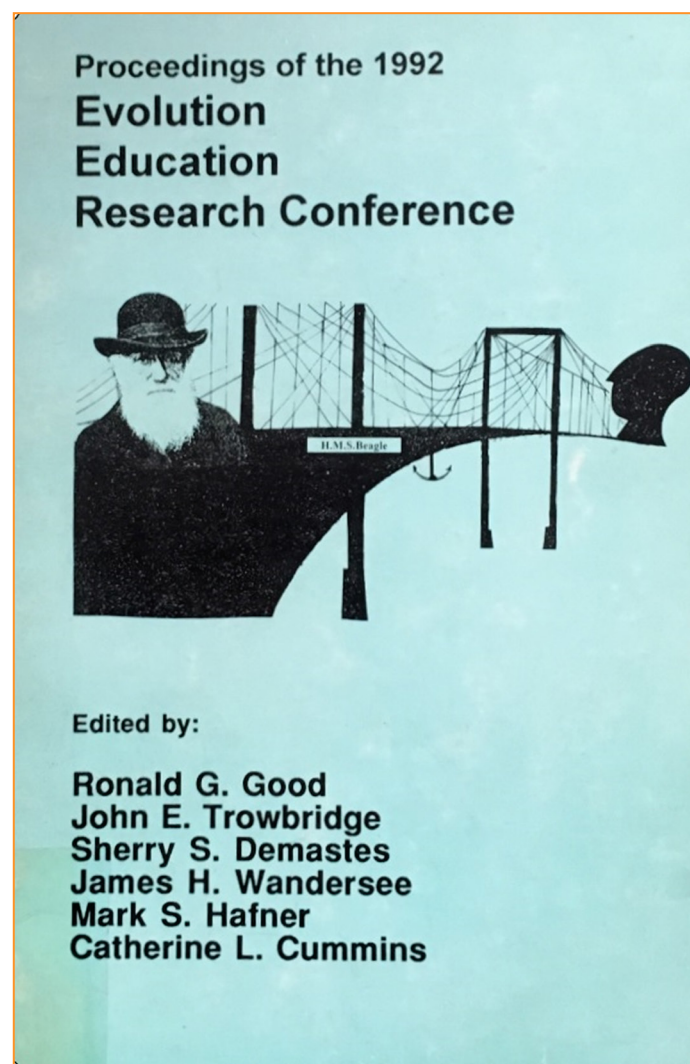


Figura 1. Coletânea da Conferência de pesquisa em Educação e Evolução, realizada em dezembro de 1992 na Universidade da Louisiana.

A conferência explicitamente não incluiu debates sobre criacionismo em nenhuma de suas versões. O encontro contou com 46 participantes, agrupando cientistas da área biológica, pesquisadores em ensino de ciências e professores de ciências atuando em sala de aula. Foram formados grupos de trabalho e, ao final de dois dias, uma plenária reuniu todos para uma síntese, com recomendações. Elas incluíam questões sobre ensino e incentivo à pesquisa, apontando seis áreas prioritárias: habilidades cognitivas, concepções alternativas, ecologias conceituais, dimensão afetiva e natureza da ciência, métodos e técnicas de ensino e questões de currículo.

Três dos organizadores da conferência apresentaram uma proposta de número especial sobre ensino de evolução para a *National Science Teaching Association* (NSTA). Da proposta resultou uma chamada internacional de artigos no ano seguinte (1993), publicados em um número temático da revista científica da associação, o já então muito conceituado *Journal of Research in Science Teaching* (JRST). O número 5 do volume 31, de maio de 1994, constituiu uma referência central para pesquisa sobre o ensino de evolução em todo o mundo, com dez artigos muito citados ainda hoje.

Outro edital de âmbito mundial fez uma chamada para submissão de trabalhos sobre ensino-aprendizagem de evolução biológica, em 2007, pelo *Journal of Biological Education*, da *Royal Society of Biology* de Londres. As pesquisas selecionadas ocuparam um número específico sobre o tema (vol 43, n. 3, 2009), alusivo ao bicentenário do nascimento de Charles Darwin e ao sesquicentenário da publicação de *Origem das Espécies*.

A formação do campo de pesquisa no Brasil

De certa forma, muitas das questões mencionadas anteriormente já vinham sendo estudadas no Brasil desde o final da década de 1980 (BIZZO, 2019), inclusive recorrendo a fontes primárias de informação depositadas em instituições britânicas, sem focalizar especificamente a questão do criacionismo. A bibliografia da época com enfoque no criacionismo era quase exclusivamente norte-americana.

A publicação das primeiras pesquisas acadêmicas brasileiras centradas no ensino-aprendizagem de concepções evolutivas ocorreu logo no início da década de 1990. Cicillini (1991) defendeu a dissertação de mestrado intitulada “Evolução enquanto um componente metodológico para o Ensino de Biologia do 2º Grau: análise da concepção de evolução em livros didáticos” na Faculdade de Educação da Universidade Estadual de Campinas. O trabalho foi concentrado na análise de alguns livros didáticos do então segundo grau. No mesmo ano, e de maneira independente, Bizzo (1991) defendeu a tese “Ensino de Evolução e História do Darwinismo”, pela Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo. Neste caso, a pesquisa envolveu o estudo do desenvolvimento da teoria evolutiva, diretamente nos manuscritos da primeira edição de *Origin of Species* depositados na Universidade de Cambridge, na *British Library* (Londres) e em *Down House* (Downe).

Quatro linhas historiográficas de análise do darwinismo foram examinadas, introduzindo dois historiadores estrangeiros pouco conhecidos no Brasil, o tcheco Emanuel

Radl (1873-1842) e Robert Maxwell Young (1935-2019), norte-americano radicado na Inglaterra. 192 estudantes de diversos credos religiosos foram testados com um novo instrumento baseado no trabalho de Bishop e Anderson (1990), onze deles entrevistados, e analisado o livro didático que utilizavam. Obras de divulgação científica foram escrutinadas, da mesma forma que propostas curriculares de dezoito estados e Distrito Federal (BIZZO, 1991).

Um estudo da produção acadêmica sobre ensino de evolução no Brasil no período 1990-2009 revelou 80 trabalhos, com boa parte de artigos em revistas com seletiva política editorial, sendo 33 dissertações de mestrado, cinco de doutorado e uma de livre-docência no respectivo período. Embora o ritmo de produção seja crescente no período estudado, o estudo revelou que o tema ainda é pouco pesquisado entre nós (OLIVEIRA et al., 2013).

Estudos no contexto brasileiro também têm sido elaborados de modo comparativo com outros países. Oliveira, Bizzo e Pellegrini (2016) analisaram algumas relações dos jovens brasileiros e italianos com a teoria evolutiva, caracterizando as principais similaridades e divergências identificadas nas respostas a um questionário com amostragem com representatividade nacional. O estudo apontou diferentes fatores socioculturais que parecem associados ao conhecimento e aceitação da teoria evolutiva entre os estudantes brasileiros.

Pesquisas têm discutido também a formação em biologia evolutiva de professores, bem como os múltiplos desafios de ensino-aprendizagem da teoria evolutiva (TIDON, LEWONTIN, 2004; ARAÚJO, 2020). Além de apontar a falta de domínio conceitual como um problema, os licenciandos e professores demandam também o enfrentamento de questões filosóficas, éticas, ideológicas, religiosas e políticas, os quais não se sentem preparados para tratar com os estudantes de educação básica (SEPULVEDA, EL-HANI, 2009). Investigações em história e filosofia da ciência têm abordado os processos de construção do conhecimento científico, amparando pesquisas acerca da compreensão

de modelos explicativos darwinistas e suas implicações no contexto pedagógico. Destaca-se o papel da revista "Filosofia e História da Biologia" da Associação Brasileira de Filosofia e História da Biologia (ABFHiB), a qual publicou inúmeras pesquisas originais na interface entre ensino de biologia, história e filosofia da teoria evolutiva.

Um edital recente de chamamento para submeter resultados de pesquisas sobre ensino-aprendizagem de evolução biológica no Brasil foi amplamente divulgado por sociedades científicas e pela *web*, resultando em livro publicado nos Estados Unidos. Os editores selecionaram dez artigos para o livro, que evidencia o crescimento do movimento criacionista no Brasil (OLIVEIRA; COOK, 2019).

Aceitação de evolução: o que dizem os estudos empíricos recentes?

A rejeição da teoria evolutiva tem sido um tópico central nos estudos sobre ensino de evolução. Uma suposição tornou-se comum em muitos escritos acadêmicos nos últimos anos: os principais fatores para a rejeição da teoria evolutiva seriam a afiliação religiosa e a religiosidade - o grau em que as pessoas expressam quanto a religião é importante em suas vidas (COYNE, 2012; TEIXEIRA, 2019).

O raciocínio geral é o de que a afiliação religiosa e o grau em que os indivíduos participam de práticas religiosas afetam a aceitação da evolução como uma teoria válida. De fato, as crenças religiosas estão entre os fatores que mais contribuem para a baixa aceitação da evolução em diversos estudos, principalmente com estudantes nos Estados Unidos (BARNES et al., 2020; DUNK et al., 2019). Uma maior rejeição por parte de fundamentalistas também foi pesquisada entre muçulmanos, embora o debate entre religião e evolução seja mais tipicamente abordado em contextos cristãos (MILLER, SCOTT, OKAMOTO, 2006). No entan-

to, modelos multifatoriais apontam que, uma vez analisada a religiosidade em conjunto com outras variáveis, sua importância na aceitação da evolução é muito reduzida (DUNK et al., 2017). No estudo de Dunk e colaboradores (2017), a compreensão da natureza da ciência foi o fator mais importante associado à aceitação da evolução, possuindo um peso maior que religiosidade e quatro vezes mais do que as medidas de conhecimento evolutivo.

Vários fatores podem atuar como obstáculos para a aceitação da evolução, como a compreensão da natureza da ciência, a qual desempenha um papel relevante no próprio entendimento da teoria evolutiva. Em resumo, os estudos empíricos têm demonstrado uma associação importante entre aceitação de evolução e três fatores: compreensão da evolução, religiosidade e compreensão da natureza da ciência. No entanto, a depender do estudo, o peso de cada um destes fatores para a aceitação de evolução acaba variando, principalmente se considerarmos modelos multifatoriais e diferentes realidades culturais (DUNK et al., 2019).

Embora os dados empíricos sejam compatíveis com mais de uma conclusão, muitas vezes é assumido que a resistência à evolução é um subproduto da formação religiosa dos indivíduos (COYNE, 2012; TEIXEIRA, 2019). Como a aceitação de evolução biológica parece ser um tema complexo, é preciso olhar com mais detalhes para a natureza da relação entre evolução e religião; e, de modo mais geral, para a própria relação ciência e religião.

Jensen e colaboradores (2019) abordam detalhadamente os efeitos específicos da afiliação religiosa e da religiosidade na aceitação da evolução. Indivíduos de religiões diferentes aceitam a evolução e seus componentes principais em variados graus, com base em suas respectivas doutrinas religiosas e culturais. E, mesmo dentro de um grupo, pode haver uma grande variação. Por exemplo, entre os cristãos há um amplo espectro de aceitação da evolução, variando de 58% dos católicos a apenas 8% das Testemunhas de Jeová nos EUA (MILLER, SCOTT, OKAMOTO, 2006).

Além disso, foram encontrados resultados complexos entre indivíduos da mesma afiliação religiosa em diferentes países (CLÉMENT, 2015; YOK et al., 2015, OLIVEIRA et al., 2019). Clément (2005) comparou professores muçulmanos e cristãos em países francófonos, mostrando que geralmente não há diferença na aceitação das concepções evolucionistas entre estes grupos. Por outro lado, professores no Líbano e em Burkina Faso demonstraram diferenças em direções opostas: professores muçulmanos são mais criacionistas do que professores cristãos no Líbano, enquanto em Burkina Faso os professores muçulmanos são mais evolucionistas do que seus colegas protestantes. O autor conclui que o contexto cultural é mais importante do que uma influência direta e específica da religião muçulmana (CLÉMENT, 2015). Em estudos comparativos com amostras brasileiras de representação nacional, resultados complexos também foram encontrados. Por exemplo, a aceitação da evolução em jovens de Galápagos foi surpreendentemente similar à da amostra de representação nacional do Brasil e substancialmente inferior à dos jovens italianos (OLIVEIRA, 2015; OLIVEIRA et al., 2016; BIZZO et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2019).

Outro ponto que permanece ainda em grande medida controverso é o modo como a aceitação da evolução relaciona-se com a compreensão da teoria evolutiva. Por um lado, o grau de aceitação da evolução não está correlacionado à capacidade dos alunos de aprender conceitos evolutivos, como seleção natural (BARNES et al., 2017). Pesquisas recentes também sugerem que uma maior compreensão da evolução não garante um aumento na aceitação da teoria evolutiva, no caso em que o pensamento evolutivo está em conflito com a identidade cultural do aluno (DUNK et al., 2019; LEWANDOWSKY, OBERAUER, 2016). Portanto, maior conhecimento do processo evolutivo não garante maior aceitação, e vice-versa.

Isso não significa que a compreensão do conhecimento evolutivo não seja relevante para a aceitação, mesmo porque sua compreensão continua problemática, inclusive em relação a estudantes universitários e pós-graduan-

dos da biologia (ARAÚJO, 2020; ARAÚJO, PAESI, PAES-NETO, 2019). Weisberg e colaboradores (2018) investigaram a possível associação entre desempenho acadêmico e aceitação de evolução na população em geral nos Estados Unidos. Eles concluíram que o nível de aceitação não é apenas resultado de níveis de religiosidade e aspectos ideológicos. O conhecimento evolutivo também desempenha um papel relevante, mesmo quando se leva em consideração a religiosidade e o conservadorismo político dos participantes. Os autores encontraram uma relação significativa entre o aumento do conhecimento e a aceitação de evolução em todos os níveis de religiosidade (WEISBERG et al., 2018).

Por isso, um cenário interpretativo mais realista considera que a aceitação da evolução biológica depende de muitos fatores, como religiosidade, valores políticos, fatores socio-culturais, conhecimento da evolução e compreensão da natureza da ciência. Em suma, deve-se tomar cuidado para não assumir uma causalidade direta entre religiosidade/aceitação da evolução.

Para além do conflito epistemológico

Como vimos, há uma suposição comum de que religião e evolução necessariamente estão em conflito. Não se pode negar que na seara dessa suposição estejam os movimentos criacionistas que são marcadamente antievolucionistas. Iniciativas para incluir o criacionismo nas escolas têm ocorrido em vários países da América Latina (SILVA et al., 2021). No caso brasileiro, os movimentos antievolucionistas podem tomar uma força ainda maior, considerando a ascensão de um novo cenário político conservador, especialmente no já conturbado contexto brasileiro (WIARDA 2019).

Mas é preciso ter em mente que religião e evolução não são mutuamente exclusivas: não podem ser confundidas as atividades antievolucionistas de determinados movimentos criacionistas e as crenças pessoais de



indivíduos religiosos. Não se pode assumir que um grau elevado de religiosidade leve à uma adesão imediata às teses dos movimentos criacionistas ou então a um necessário conflito com o conhecimento evolutivo.

Para Evans e Evans (2008), assumir que religião e ciência são inerentemente incompatíveis e que um crescimento da religiosidade leva necessariamente ao declínio da ciência tem limitado nossa compreensão desta relação complexa. Os autores chamam a atenção para a necessidade de focar em características culturais locais em vez de categorias analíticas globais, ou seja, não podemos nos referir à relação entre religião e ciência como algo único, independente dos indivíduos e dos contextos culturais específicos. É mais útil pensar nas religiões e nas ciências como multifárias, locais e contingentes, em vez de universais e dotadas de uma essência imutável.

Estudos principalmente no campo antropológico têm indicado uma variedade de pontos de vista na relação entre ciência e religião, em vez de um simples *continuum* de compatibilidade e conflito (EVANS, EVANS, 2008). Da mesma forma, presumir que a compreensão dos conceitos envolvidos na teoria evolutiva acaba levando a uma aceitação do pensamento evolutivo tem sido problematizado há muito tempo (COBERN, 1994; SMITH, 1994).

As complexas relações entre aceitação de evolução, compreensão da natureza da ciência, conhecimento evolutivo e religiosidade dos estudantes, não podem ser tomadas como categorias universais e de modo independente do contexto cultural. É preciso considerar as crenças relacionadas com a teoria evolutiva de modo congruente com a ampla identidade cultural dos indivíduos (COBERN, 1994).

Nesse contexto complexo, os professores têm enfrentado um grande desafio para lidar com fatores que podem ser obstáculos para a aceitação de evolução entre os estudantes. Como Eugenie C. Scott (p. xi, 2012) argumenta: “problemas multifatoriais requerem soluções multifatoriais. Não existe uma solução única para este problema complexo e incômodo”.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq (proc. 308899/2011-3, 308877/2015-2) e FAPESP (proc. 2016/05843-4 e 2020/07961-0).

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, L.A.L. Concepções equivocadas sobre evolução biológica: um estudo comparativo entre graduandos em ciências biológicas e pós-graduandos. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 25, n. 2, p. 332-346, 2020.

ARAÚJO, L.A.L.; PAESI, R.; PAES-NETO, V.D. Challenges of Understanding Macroevolution among Brazilian Biology Students and Continuing Education Efforts. In: OLIVEIRA, A.; COOK, K. (Eds.). *Evolution Education and the Rise of the Creationist Movement in Brazil*. New York & London: Lexington Books, 2019. p. 149-170.

BARNES, M.E. et al. Teleological reasoning, not acceptance of evolution, impacts students’ ability to learn natural selection. *Evolution: Education and Outreach*, v. 10, n. 1, p. 1-12, 2017.

BARNES, M.E. et al. “Accepting evolution means you can’t believe in god”: atheistic perceptions of evolution among college biology students. *CBE—Life Sciences Education*, v. 19, n. 2, p. ar21, 2020.

BISHOP, B.A.; ANDERSON, C.W. Student conceptions of natural selection and its role in evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 27, p. 415-427, 1990.

BIZZO, N. M. V. *Ensino de Evolução e História do Darwinismo*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Faculdade de Educação, São Paulo, 1991.

_____. From Down House landlord to Brazilian high school students: what has happened to evolutionary knowledge on the way? *Journal of Research in Science Teaching*, v. 31, n. 5, p. 537-556, 1994.

_____. What is the role of evidence in evolution education? A research program following students’ narratives in Brazil and elsewhere. In: OLIVEIRA, A.; COOK, K. (Eds.). *Evolution Education and the Rise of the Creationist Movement in Brazil*. New York & London: Lexington Books, 2019. p. 171-190.

BIZZO, N.; PELLEGRINI, G.; CUVI, N.; OLIVEIRA, G.S.; SORIA, A. Opiniones de los estudiantes sobre evolución biológica: muestras nacionales de Italia y Brasil, y comparación con Galápagos. In: VALLEGO, G. et al. (Orgs.). *Darwin y el Darwinismo desde el Sur del Sur*. Madrid: Doce Calles, 2018. p. 419-429.

CICILLINI, G.A. *Evolução Enquanto um Componente Metodológico para o Ensino de Biologia do 2º Grau: análise da concepção de evolução em livros didáticos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Educação, Campinas - SP, 1991.

CLÉMENT, P. Muslim teachers’ conceptions of evolution in several countries. *Public Understanding of Science*, v. 24, n. 4, p. 400-421, 2015.

CLOUGH, E.E.; WOOD-ROBINSON, C. How secondary students interpret instances of biological adaptation. *Journal of Biological Education*, v. 19, p. 304-310, 1985.

COBERN, W.W. Comments and criticism. Point: Belief, understanding, and the teaching of evolution. *Journal of research in science teaching*, v. 31, n. 5, p. 583-590, 1994.

COYNE, J.A. Science, religion, and society: the problem of evolution in America. *Evolution: International Journal of Organic Evolution*, v. 66, n. 8, p. 2654-2663, 2012.

DEADMAN, J.A. *The structure and development of concepts associated with the topic of evolution in secondary school boys*. PhD thesis, University of London, 1976.

DEADMAN, J.A.; KELLY, P.T. What do secondary school boys understand about evolution and heredity before they are taught the topics? *Journal of Biological Education*, v. 12, n. 1, p. 7-15, 1978.

DUNK, R.D.P. et al. A multifactorial analysis of acceptance of evolution. *Evolution: Education and Outreach*, v. 10, n. 1, p. 1-8, 2017.

DUNK, R.D.P. et al. Evolution education is a complex landscape. *Nature ecology & evolution*, v. 3, n. 3, p. 327-329, 2019.

EVANS, J.H.; EVANS, M.S. Religion and science: Beyond the epistemological conflict narrative. *Annual Review of Sociology*, v. 34, p. 87-105, 2008.

GREGORY, T.R. Understanding natural selection: essential concepts and common misconceptions. *Evolution: Education and outreach*, v. 2, n. 2, 2009.

JENSEN, J.L. et al. Religious affiliation and religiosity and their impact on scientific beliefs in the United States. *BioScience*, v. 69, n. 4, p. 292-304, 2019.

LEWANDOWSKY, S.; OBERAUER, K. Motivated rejection of science. *Current Directions in Psychological Science*, v. 25, n. 4, p. 217-222, 2016.

MILLER, J.D.; SCOTT, E.C.; OKAMOTO, S. Public acceptance of evolution. *Science*, v. 313, n. 5788, 2006.

OLIVEIRA, A.W.; COOK, K.L. (Eds.). *Evolution Education and the Rise of the Creationist Movement in Brazil*. New York and London: Lexington Books, 2019.

OLIVEIRA, G.S. *Estudantes e evolução biológica: conhecimento e aceitação no Brasil e Itália*. Tese de doutorado. Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, 2015.

OLIVEIRA, G.S.; BIZZO, N.; PELLEGRINI, G. Evolução biológica e os estudantes: um estudo comparativo Brasil e Itália. *Ciência & Educação*, v. 22, n. 3, p. 689-705, 2016.

OLIVEIRA, G.S.; BIZZO, N.; RIOS, H.M. Ensino-Aprendizagem de Evolução Biológicas nas Pesquisas Acadêmicas Brasileiras. In: BIZZO, N.; PELLEGRINI, G. *Os jovens e a ciência*. Curitiba: Ed. CRV, 2013. p. 83-112.

OLIVEIRA, G.S.; MOTA, H.S.; GOUW, A.M.S.; BIZZO, N. Comparative Studies of Students’ Beliefs and Understandings in Brazil, Italy and Galapagos Islands. In: OLIVEIRA, A.; COOK, K. (Eds.). *Evolution Education and the Rise of the Creationist Movement in Brazil*. New York & London: Lexington Books, 2019. p. 191-208.

SEPULVEDA, C; EL-HANI, C. N. Ensino de Evolução: uma experiência na formação inicial de professores de biologia. In: TEIXEIRA, P.M.M; RAZERA, J.C.C. (Orgs.). *Ensino de Ciências: pesquisas e pontos em discussão*. 1. ed. Campinas: Komed, 2009.

SCOTT, E.C. Foreword. In: ROSENGREN, K.S. et al. (Eds.). *Evolution challenges: Integrating research and practice in teaching and learning about evolution*. Oxford University Press, 2012. p. ix-xiii.

SILVA, H.M. et al. Biology teachers’ conceptions of Humankind Origin across secular and religious countries: an international comparison. *Evolution: Education and Outreach*, v. 14, n. 1, p. 1-12, 2021.

SMITH, M.U. Counterpoint: Belief, understanding, and the teaching of evolution. *Journal of research in science teaching*, v. 31, n. 5, p. 591-597, 1994.

SKOOG, G. Topic of evolution in secondary school biology textbooks: 1900-1977. *Science Education*, v. 63, n. 5, p. 621-640, 1979.

SKOOG, G. The coverage of evolution in high school biology textbooks published in the 1980s. *Science Education*, v. 68, n. 2, p. 117-28, 1984.

TEIXEIRA, P. Acceptance of the theory of evolution by high school students in Rio de Janeiro, Brazil: scientific aspects of evolution and the biblical narrative. *International Journal of Science Education*, v. 41, n. 4, p. 546-566, 2019.

TIDON, R.; LEWONTIN, R.C. Teaching evolutionary biology. *Genetics and Molecular Biology*, v. 27, p. 124-131, 2004.

WEISBERG, D.S. et al. No missing link: knowledge predicts acceptance of evolution in the United States. *BioScience*, v. 68, n. 3, p. 212-222, 2018.

WIARDA, H.J. *Politics and social change in Latin America: still a distinct tradition?* Routledge, 2019.

YOK, M.C.K. et al. Preliminary results on Malaysian teachers’ conception of evolution. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, v. 167, p. 250-255, 2015.



Pandemia da COVID-19: a evolução sob nossos olhos



Luís Bizzo

Universidade do Vale do Itajaí e Centro Universitário – Católica de Santa Catarina em Joinville, Itajaí, SC

Autor para correspondência - bizzo@univali.br; luisbizzo@yahoo.com.br

Palavras-chave: ensino de evolução, coronavírus, genética de populações, contextualização, ensino de genética, fatores evolutivos

A compreensão da evolução biológica implica reconhecer que as populações estão continuamente em mudança e que existem diferentes forças atuando sobre elas. Este ensaio discute como a atual pandemia de COVID-19 e as constantes descobertas sobre o vírus SARS-CoV-2 possibilitam ao professor apresentar conceitos da biologia evolutiva de maneira interessante e contextualizada no cotidiano dos estudantes.

Algumas questões sobre o ensino de evolução

A evolução é reconhecida como um eixo integrador no desenvolvimento do pensamento biológico. Apesar disso, tem sido trabalhada com nossos estudantes de maneira pontual, restrita a um pequeno espaço do calendário escolar, geralmente ao final do terceiro ano do Ensino Médio. Essa fragmentação de conteúdos diminui as oportunidades para que os estudantes reconheçam e estabeleçam relações entre os processos evolutivos presentes em todas as subáreas da Biologia.

Além disso, ao estudar os conteúdos de evolução é comum que os estudantes sejam apresentados apenas aos exemplos clássicos e bem documentados, descritos em organismos modelo e presentes nos livros didáticos. Alguns exemplos são: a variação dos bicos dos tentilhões de Galápagos, o mimetismo das borboletas monarca e a seleção de alelos para anemia falciforme, geralmente apresentados sem a discussão dos vários fatores evolutivos atuantes em cada caso. É uma pena que muitas vezes exames em larga escala, como o ENEM e os vestibulares, limitem-se a esses mesmos exemplos na elaboração de questões de evolução que se reduzem à simples memorização de uma história, sem necessariamente envolver a compreensão do processo evolutivo.

Desta forma, também a problematização e a contextualização dos processos evolutivos são prejudicadas, pois ficam restritas à apresentação de exemplos em organismos modelo. Este tipo de abordagem não abre portas a questionamentos, e pouco contribui para o desenvolvimento do pensamento científico.

Este ensaio é fruto da reflexão sobre os questionamentos apresentados por estudantes do quinto semestre de Ciências Biológicas durante o segundo semestre de 2020. Apesar de ter sido baseada em experiência no ensino superior, a atividade é aqui relatada de forma direcionada ao ensino médio.

SARS-CoV-2 como possibilidade para o ensino de Evolução

A atual pandemia do vírus SARS-CoV-2, causador da COVID-19, e seus desdobramentos sociais, políticos, econômicos e na saúde pública têm suscitado polêmicas em diversas disciplinas. As novas descobertas sobre o vírus, tratamentos e vacinas podem ser bons motivos para despertar questionamentos dos estudantes, os quais serão respondidos a partir dos conhecimentos de diferentes campos da Biologia.

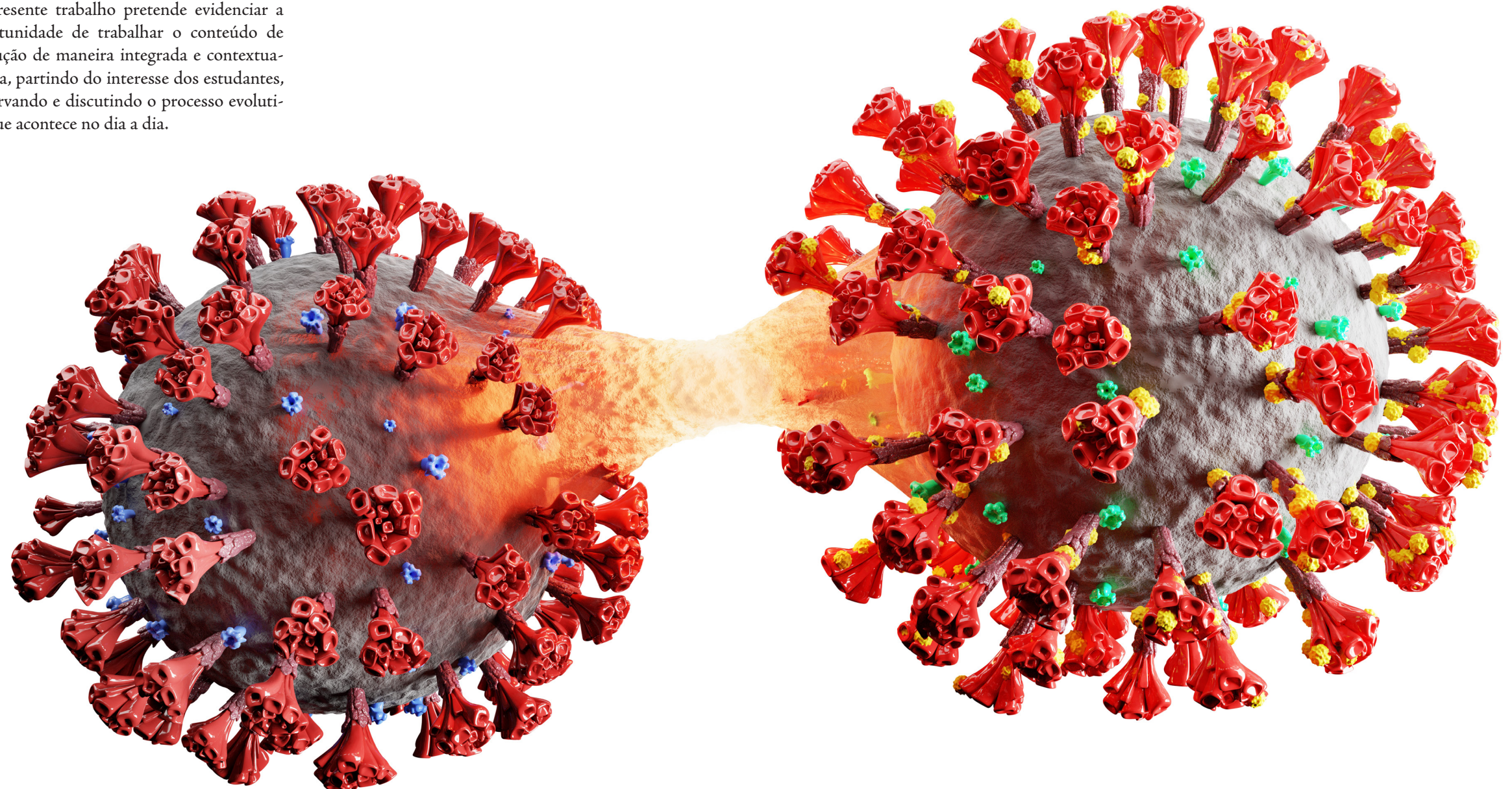
O presente trabalho pretende evidenciar a oportunidade de trabalhar o conteúdo de evolução de maneira integrada e contextualizada, partindo do interesse dos estudantes, observando e discutindo o processo evolutivo que acontece no dia a dia.

Além de possibilitar discussões sobre o processo evolutivo, o desenrolar dos acontecimentos relacionados à pandemia permite também compreender o desenvolvimento do pensamento científico. É possível observar, a partir das informações diárias, como os cientistas conduzem suas investigações e que tipo de perguntas fazem.

Cada nova notícia e descoberta pode levar a novas indagações, e muitas vezes são feitas previsões de possíveis cenários. Assim, a pergunta do cientista é também a nossa pergunta: Como apareceu esse vírus? Por que alguns países apresentam taxas maiores de mortalidade? Será que determinada variante

viral é mais ou menos agressiva ou contagiosa? Quando todos forem vacinados, o vírus será extinto?

As perguntas são inúmeras, mas o mais importante é mostrar aos estudantes que a ciência se faz a partir de questionamentos, que levam a previsões; não de modo aleatório, mas a partir dos conhecimentos previamente elaborados por uma comunidade científica, que se vale de situações similares e modelos teóricos. Os pesquisadores então testam essas previsões e as confirmam ou refutam, e a sociedade toma suas decisões baseada nos resultados desses estudos científicos, ao menos na maior parte das vezes.



Este tipo de exercício também pode ser realizado pelos estudantes, ao analisarem em retrospectiva se os cenários teóricos expostos por cientistas, jornalistas, *youtubers*, *podcasters*, influenciadores digitais ou pela própria turma se confirmaram ou não; a discussão sobre as razões para esse resultado pode ser um interessante exercício do pensamento científico.

Sabemos que há muitos desafios no ensino de evolução, mas há também boas possibilidades. Os conflitos religiosos sobre a origem do homem, a dificuldade na compreensão do tempo geológico, a perspectiva de que evolução seja sinônimo de melhoria ou progresso e que ocorra em ao longo da vida dos indivíduos (e não ao longo de gerações em populações) são alguns dos principais desafios a serem superados no ensino de evolução. Por outro lado, o estudo do processo evolutivo de vírus e bactérias é uma excelente perspectiva para o desenvolvimento do pensamento biológico: por não envolver conflitos religiosos, a evolução de um vírus ou bactéria é mais facilmente “aceitável” do que a evolução da espécie humana, por exemplo; a ideia de uma população de vírus é intuitiva e o processo evolutivo viral ocorre tão rápido que não é necessário recorrer à compreensão do conceito abstrato de tempo geológico.

Assim, o estudo dos fatores evolutivos tomando como modelo o vírus SARS-CoV-2 pode ser bastante efetivo para a apresentação, contextualização e problematização de conceitos fundamentais para a compreensão do processo de evolução biológica.

E por que ninguém pensou nisso antes?

Ora, não é bem assim; exemplos de evolução em microrganismos são comuns em livros técnicos. Talvez não por acaso, dois dos principais livros-texto de biologia evolutiva (ver item Para Saber Mais) iniciam sua exposição com o exemplo do vírus da imunodeficiência humana (HIV), expondo como a biologia evolutiva foi central para a compreensão do

vírus e o desenvolvimento de drogas.

O modelo viral do HIV é particularmente importante para o ensino de evolução porque reúne algumas características que despertam interesse:

- ♦ apresenta grande importância e debate na saúde pública;
- ♦ é amplamente conhecido pelo público em geral;
- ♦ alastrou-se (e foi notícia) pelo mundo a partir da década de 1980;
- ♦ desenvolve resistência a drogas com rapidez.

No entanto, embora seja um modelo excepcionalmente bom para o estudo de evolução viral, o HIV não desperta mais tanta curiosidade nos jovens; já é comum, literalmente uma discussão do século passado.

SARS-CoV-2 e os fatores evolutivos

Desde T. Dobzhansky entendemos a evolução como a alteração das frequências alélicas das populações com o passar das gerações. Os processos que provocam essa mudança são denominados fatores evolutivos: mutação, seleção natural, migração e deriva genética. Assim, para a compreensão do processo evolutivo os estudantes devem, além de compreender o funcionamento de cada um dos fatores evolutivos, identificar a ação desses processos, não só ao longo do tempo, mas também no contexto à sua volta. As dinâmicas de populações virais podem iluminar processos de mutação, seleção e deriva. O fato de serem populações que se reproduzem de modo assexual implica que os achados podem ter diferenças em relação a organismos sexuais, mas muitos dos processos evolutivos podem ser estudados de modo produtivo.

Assim como o HIV, os coronavírus (entre eles o SARS-CoV-2) possuem como material genético o RNA e apresentam algumas características que os tornam particularmente interessantes para o estudo do processo evolutivo: populações imensas pois são bi-

lhões de cópias do vírus em um único hospedeiro, com grande poder de replicação, isto é, centenas de milhares de cópias em poucas horas, e alta taxa de mutação, porque o RNA é mais instável e sua taxa de mutação é milhares de vezes maior que do DNA). A possibilidade de usar o número de pessoas infectadas em um dado momento como referência para o tamanho populacional é mais um facilitador para a compreensão dos estudantes. Mesmo que seja uma noção bastante imprecisa, pois não existe esta contagem e parte do pressuposto de que todos os infectados apresentam a mesma carga viral, mesmo assim, para os jovens urbanos, ainda é mais palpável que imaginar pragas em uma lavoura, por exemplo.

Com certeza, nem todos os conceitos importantes do conteúdo de evolução podem ser tratados a partir dos vírus, mas a potencialidade do estudo do SARS-CoV-2 para a compreensão dos fatores evolutivos é inegável. As notícias diárias trazem o assunto para o contexto dos alunos, instigando-os a conhecer melhor as relações que podem ser estabelecidas entre a pandemia e a evolução do vírus.

No quadro a seguir são apresentados os fatores evolutivos seguidos de conceitos e abordagens que podem ser tratados a partir do estudo do SARS-CoV-2. A última coluna traz sugestões de perguntas para promover a discussão sobre o assunto.

Fator Evolutivo	Conceitos abordados	Algumas questões para discussão
Mutação	Taxas de mutação Comparação do material genético viral (RNA) e humano (DNA). A taxa de mutação dos vírus de RNA é milhares de vezes maior do que a dos eucariotos	Por que este vírus de RNA apresenta taxa de mutação maior que a do DNA humano? Como a alta taxa de mutação do vírus influencia no seu combate pelo sistema imunológico dos hospedeiros? Por que o aumento do número de pessoas infectadas é um fator preocupante para o surgimento de novas variantes virais? Existe a possibilidade de que tenhamos campanhas anuais de vacinação contra o SARS-CoV-2? Por que isso seria necessário? Por que estão surgindo novas variantes do SARS-CoV-2?
	Aleatoriedade das mutações Mutações surgem ao acaso, e não por necessidade Alguns pontos do genoma apresentam maior taxa de mutação do que outros (<i>hotspots</i> mutacionais)	Existem mais variantes virais do que as já detectadas? As novas variantes genéticas são vantajosas aos vírus? As novas variantes de impacto na transmissibilidade/virulência ocorreram em locais específicos do genoma viral?
	Mutações e alterações fenotípicas Possíveis efeitos das novas variantes na transmissibilidade do vírus (neutro, deletério ou vantajoso) Mutações convergentes Surgimento independente das mesmas variantes virais	Que locais do genoma viral tem potencial para gerar variantes preocupantes para os humanos? A recombinação pode ser reconhecida como um fator evolutivo para os vírus? Considerando o tamanho do genoma viral e sua taxa de mutação, a ocorrência de mutações convergentes é um fenômeno provável neste vírus?
Migração	Efeito homogeneizador nas populações virais Trânsito de pessoas entre diferentes locais, portando as mesmas ou diferentes variantes virais Efeitos de medidas restrição de locomoção para diminuição do fluxo gênico, como a restrição de tráfego aéreo	Por que mesmo países com muitas pessoas infectadas impediram a entrada de viajantes? Como a testagem realizada nas fronteiras pode contribuir para a redução da variabilidade genética viral? Como o <i>lockdown</i> pode contribuir para a diminuição da mobilidade das variantes virais?



Seleção	Tipos de seleção: positiva/negativa ou direcional, estabilizadora, disruptiva e adaptação Possíveis efeitos da virulência (agressividade do vírus) sobre sua transmissibilidade Suscetibilidade de diferentes populações humanas ao vírus	Que características/mutações seriam vantajosas para o vírus? Que condições ambientais estão agindo no processo de seleção do vírus? Quais destas condições ambientais podemos controlar? Que regiões do genoma viral podem estar sob maior pressão seletiva? Existem evidências de que algumas populações humanas são geneticamente mais suscetíveis ao SARS-CoV-2? Por que algumas variantes do SARS-CoV-2 espalharam-se pelo mundo e outras não? Por que diversos países impediram a entrada de viajantes de algumas localidades, mas de outras não? Qual o efeito esperado do uso indiscriminado de antibióticos (no combate do SARS-CoV-2) sobre bactérias? Que efeito indesejado pode ocorrer com o uso de antivirais? A ocorrência de evolução convergente é um fenômeno provável neste vírus?
	Efeitos do uso de antibióticos sobre bactérias e fungos Aumento da frequência de variantes resistentes a drogas antivirais Evolução convergente Variantes com as mesmas características em populações de origem distinta	
Deriva Genética	Alterações aleatórias das frequências gênicas Importância da Deriva Genética em populações pequenas Efeito do fundador Infecção de novos hospedeiros Chegada da primeira pessoa contaminada a uma localidade Efeito gargalo de garrafa Possíveis efeitos da redução drástica e ao acaso da população viral	As frequências das variantes virais são iguais em todas as populações humanas? Como explicar o aumento ou diminuição de frequência de algumas variantes virais, de igual transmissibilidade e virulência? Como o <i>lockdown</i> pode contribuir para a diminuição do número de pessoas infectadas? Por que o número de variantes do SARS-CoV-2 tem aumentado com o tempo e o aumento da populacional viral? Uma pessoa infectada pode portar mais de uma variante viral? Qual deve ser o efeito da redução populacional do vírus sobre a frequência de suas variantes, principalmente as menos comuns?

Além de poder ser estudado o efeito de cada fator evolutivo separadamente, estes também podem ser analisados de modo integrado, compondo um cenário mais complexo e próximo à realidade. Neste sentido, é comum analisar a interação entre dois ou mais fatores evolutivos: mutação e seleção natural, mutação e deriva genética, seleção natural e migração, seleção natural e deriva genética. Este tipo de comparação traz a importante lição da aleatoriedade do processo evolutivo.

Existem diversas possibilidades de condução de discussões em aula sobre este assunto. Um exemplo é o surgimento da variante delta do SARS-CoV-2, que está se espalhando

pelo mundo e em muitos locais já é a cepa dominante do vírus. Sua transmissibilidade e virulência são diferentes da variante alfa, assim como a proteção das vacinas já produzidas. Outros pontos, além dos já apresentados no quadro, também poderiam ser suscitados, como a própria denominação das variantes (a variante gama já foi chamada de P.1 e, inicialmente, de “variante de Manaus”) e seu impacto social.

Certamente, muitas indagações que surgirem ficarão em aberto. A análise da evolução do HIV (o capítulo 1 de FREEMAN e HERRON, 2009 é uma referência sucinta aos professores) fornece uma comparação com caso similar.

Professores que desejarem investigar profundamente outras vertentes da biologia evolutiva também têm amplo espaço. Diversos tópicos podem ser explorados, como o efeito da ligação gênica, genealogias de genes, relógio molecular e especiação, entre outros.

A adoção do SARS-CoV-2 como modelo do processo evolutivo pode ser utilizado por professores tanto para contextualização de conceitos já trabalhados em aula quanto para uma problematização inicial. É uma excelente oportunidade para que os estudantes reconheçam o surgimento e a detecção de novas variantes, sua frequência nas populações e possível seleção natural. Ou seja, a evolução ocorrendo sob os nossos olhos.

Para saber mais

FIOCRUZ - Fundação Oswaldo Cruz. Disponível em < <https://portal.fiocruz.br/> >

FREEMAN S.; HERRON, J. C. *Análise Evolutiva*. 4a edição. Porto Alegre: Artmed, 2009.

FUTUYMA, D.J; KIRKPATRICK, M. *Evolution*. 4a edição. Sunderland: Sinauer Associates, 2017.

OPAS - Organização Pan-Americana de Saúde. Disponível em <<https://www.paho.org/pt/covid19>>

Pesquisa FAPESP. Disponível em <<https://revista-pesquisa.fapesp.br/>>



Alelotório: um simulador virtual didático para o ensino de deriva genética



Ediko Dominike Cruz Pessoa¹, Maíra de Paiva Leite², Janaina Lima de Oliveira³

¹ Graduando em Sistemas para Internet, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, PB

² Graduada em Ciências Biológicas, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB

³ Laboratório de Biologia Evolutiva e do Desenvolvimento (LaBED), Universidade Federal da Bahia, Instituto de Biologia, Salvador, BA

Autor para correspondência – janaina.lima@ufba.br

Palavras-chave: deriva genética, ensino, evolução, ferramenta digital

A deriva genética é um processo evolutivo decorrente do acaso, associado à transmissão de alelos de uma geração para outra. Sua intensidade depende do tamanho populacional. Suas propriedades estão intrinsecamente ligadas a conceitos estatísticos como aleatoriedade, probabilidades e erros amostrais, requerendo um nível de abstração que pode constituir um desafio para o processo de ensino e aprendizagem. Considerando esse contexto, desenvolvemos e disponibilizamos *online* uma ferramenta didática virtual, o **Alelotório**, que é um simulador elaborado com o intuito de demonstrar os efeitos da deriva genética, indicado para o ensino desse tema para estudantes de graduação em Ciências Biológicas.

A deriva genética

A seleção natural explica a evolução de caracteres adaptativos pelo favorecimento ou desfavorecimento de um alelo em particular, como resultado de seus efeitos vantajosos ou deletérios, respectivamente. Contudo, nem todas as características dos organismos afetam as chances de sobrevivência e/ou reprodução, sendo, portanto, denominadas seletivamente neutras. Como, então, essas características podem evoluir, se passam despercebidas pela seleção natural? Para responder a essa pergunta, é importante ter em mente que a seleção natural não é a única força evolutiva existente (embora seja uma muito importante). Dentre outras, a deriva genética é uma das mais influentes na evolução de caracteres seletivamente neutros e atua de forma especialmente intensa em populações de tamanho limitado. De fato, uma das principais características da deriva genética é que sua intensidade é inversamente proporcional ao tamanho populacional, ou seja, quanto menor a população, maior o efeito da deriva. Isso porque, uma vez que as populações biológicas têm um tamanho finito, a amostragem dos alelos que contribuirão para a formação da próxima geração pode resultar em mudanças nas frequências alélicas. Consequentemente, alguns alelos poderão ficar mais raros e, em alguns casos, inclusive serem eliminados da população, enquanto outros aumentarão em frequência, podendo ser eventualmente **fixados**, levando à perda da variabilidade genética dentro da população. Considerando-se que uma das formas de se definir a evolução biológica é “mudança nas frequências alélicas ao longo das gerações”, podemos então perceber por que a deriva é considerada uma força evolutiva.

Outra característica fundamental da deriva genética está ligada à sua natureza aleatória: as flutuações nas frequências alélicas causadas por ela não favorecem preferencialmente nenhum dos alelos em particular, significando que, partindo de frequências iguais, dois alelos apresentam exatamente a mesma chance de serem fixados ou perdidos. Por exemplo, considerando-se os alelos *A1* e *A2*, ambos com frequências iniciais iguais a 0,5, numa eventual fixação causada pela deriva, há 50% de chance de que o alelo fixado tenha sido o *A1* e 50% de que tenha sido o *A2*.

O ensino de deriva

Compreender a importância da deriva genética como uma força evolutiva é algo fundamental para entender a evolução biológica, algo imprescindível na formação de biólogos e professores de biologia. Apesar disso, muitos estudantes apresentam uma certa dificuldade em entender esse tema por inteiro e a evolução passa a ser entendida apenas através da ação da seleção natural. Dentre os diversos fatores associados a tal dificuldade, podemos destacar o desafio de se abordar o tema em sala de aula por exigir um nível maior de abstração por parte dos alunos, já que as propriedades da deriva estão intrinsecamente ligadas a conceitos estatísticos como aleatoriedade, probabilidades e erros amostrais.

Por se tratar de um processo dinâmico, a deriva genética pode ser melhor compreendida por meio de abordagens igualmente dinâmicas. Nesse sentido, a utilização de materiais didáticos seguindo um roteiro previamente elaborado, de forma a ressaltar as propriedades da deriva, tem se tornado uma prática cada vez mais comum para superar o problema. Muitos desses materiais usados exigem recursos físicos que requerem simulações manuais como, por exemplo, por sucessivas rodadas de amostragem de bolinhas coloridas (representando alelos), demonstrando flutuações nas frequências que aconteceriam ao longo de gerações como resultado de erros amostrais. Apesar de contribuírem significativamente para o processo de ensino e aprendizagem quando comparadas ao ensino através apenas da exposição teórica, essas abordagens podem oferecer algumas limitações. Além de possíveis danos ao material (degradações, perdas etc.), que podem dificultar o andamento da aula, o número de vezes que o processo pode ser replicado ao longo de uma única aula é muito reduzido. Assim, torna-se difícil demonstrar umas das principais características da deriva: o efeito aleatório no que diz respeito à fixação de um ou outro alelo (ou seja, a ausência de preferência por um ou outro), o que poderia ser demonstrado após a execução de múltiplas repetições do processo simulado para uma única população. Com a realização dessas réplicas, é possível identificar que, em cerca

Fixado - Diz-se que um alelo foi fixado quando ele é disseminado de tal forma na população que sua frequência alélica atinge valor igual a 1.

Co-dominância - O fenótipo dos heterozigotos é distinto dos homozigotos, ou seja, não há relação de dominância e recessividade no locus.

da metade delas, um dado alelo é fixado, enquanto o outro é fixado na outra metade.

O uso de ferramentas digitais, nesse aspecto, pode proporcionar um grande avanço para o ensino da deriva. Além de maior atratividade e interatividade, simuladores didáticos virtuais permitem maior capacidade de replicação (o processo, que antes era executado manualmente para uma única população, pode então ser rapidamente repetido dezenas, centenas de vezes) e maior portabilidade, principalmente quando implementados para utilização em diversos aparelhos. Também torna-se mais fácil que o aluno/usuário explore a influência de diferentes parâmetros (como o tamanho populacional e as frequências alélicas iniciais), observe resultados e identifique padrões, permitindo que seja parte ativa na construção de seu próprio conhecimento.

Até o momento, simuladores para o ensino de deriva genética estão disponíveis apenas em outros idiomas e/ou são voltados a um público mais especializado, o que dificulta sua implementação em aulas de graduação. Considerando o grande potencial de recursos digitais para o processo de ensino e aprendizagem de deriva genética, desenvolvemos o **Alelotório**, uma ferramenta virtual gratuita e *online* em que é possível simular os efeitos da deriva e identificar suas principais propriedades.

Apresentando o Alelotório

Modelo

Para o desenvolvimento do **Alelotório**, foi considerado um modelo com as seguintes características: (i) indivíduos diplóides e hermafroditas que se acasalam ao acaso; (ii) o traço analisado apresenta 3 fenótipos distintos, determinados por um único locus com 2 alelos (denominados aqui *A1* e *A2*) em **co-dominância**; (iii) o tamanho da população mantém-se constante, pois o número de descendentes a cada geração é sempre igual ao da população parental.

Especificações técnicas

O simulador foi desenvolvido para ser utilizado em navegadores de internet, não sendo

necessária a instalação de nenhum aplicativo, o que torna seu carregamento mais rápido mesmo com conexões a internet limitadas. Além disso, o simulador é responsivo e se adapta a diferentes tamanhos de telas, podendo ser usado em qualquer aparelho (computadores, tablets, smartphones etc.) e sistema operacional, sem perda de qualidade ou privação de funcionalidade. Uma outra facilidade diz respeito à possibilidade de utilização *offline* após um primeiro acesso *online* ao simulador, exigindo acesso à internet uma única vez. Desse modo, professor e alunos poderão baixar os arquivos do site em seus dispositivos móveis ou computadores, previamente, podendo utilizá-los em aula mesmo que não disponham de conexão com a internet no momento do uso.

O simulador e seu código fonte estão disponíveis em <https://edikocruz.github.io/alelotorio> e <https://github.com/EdikoCruz/alelotorio>, respectivamente, ambos em plataforma gratuita de compartilhamento de código. Assim, usuários do sistema têm um local para indicar melhorias ou correções, e qualquer pessoa da plataforma pode sugerir modificações no código que atendam a esses pedidos. Para facilitar a possível participação da comunidade de desenvolvedores de software, foi escolhida a tecnologia *Vue.js*, que é uma das mais usadas e fáceis para desenvolvimento de aplicações *web*.

Recursos

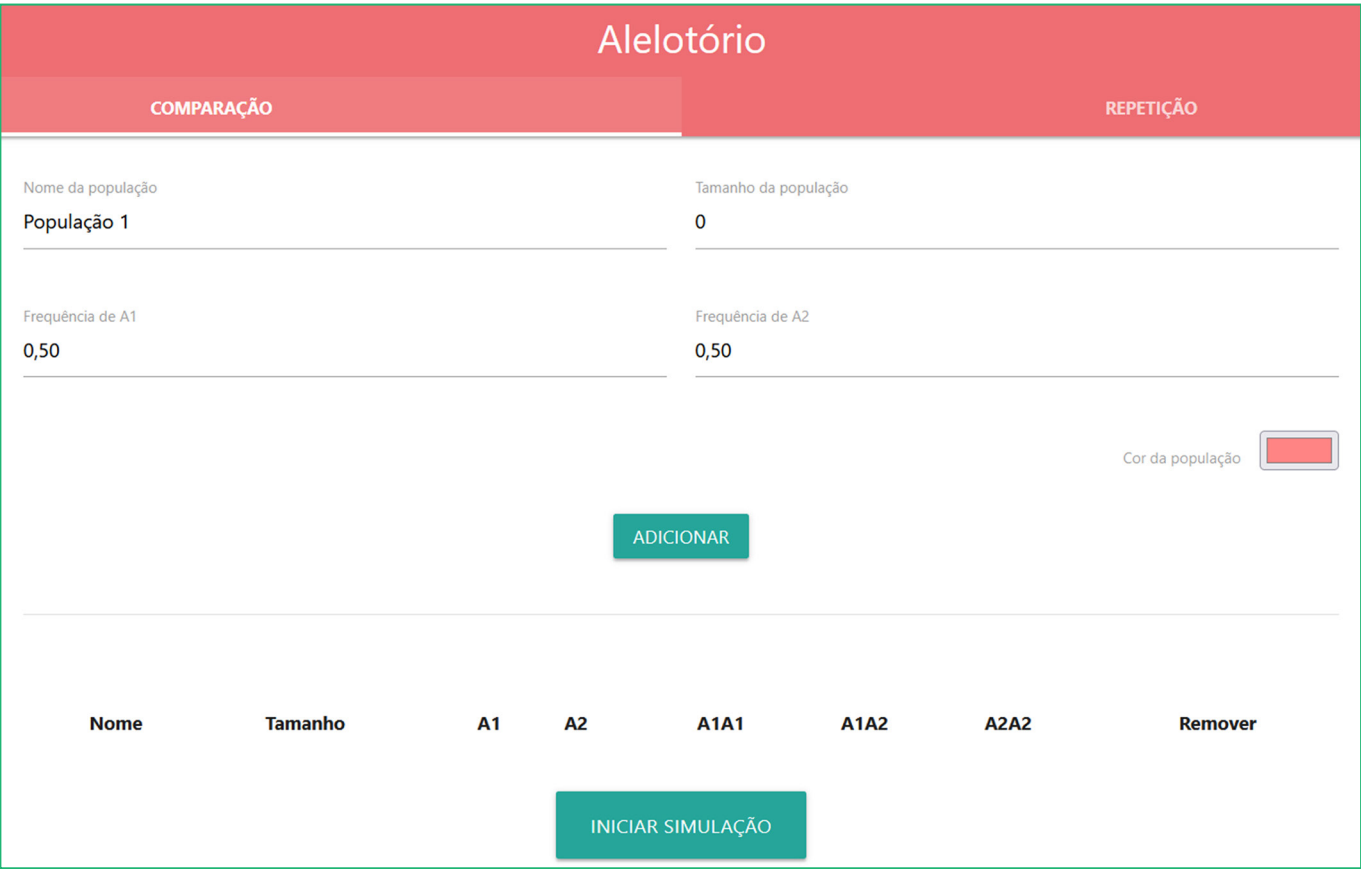
Na página inicial, encontram-se duas abas principais: “Comparação” e “Repetição” (Figura 1).

1. “Comparação” (Figura 1): essa é a aba inicial. O intuito dessa etapa é comparar os efeitos da deriva genética em populações de tamanhos diferentes. Para tanto, o usuário deve inserir os dados “nome”, “tamanho” e “frequências alélicas iniciais” de uma população de cada vez e clicar no botão “adicionar”. Em seguida, será possível visualizar esses dados em uma lista logo abaixo. Após repetir esse procedimento para todas as populações de interesse, o usuário deve clicar em “iniciar simulação”. Ao fim da simulação, será possível visualizar os resultados na parte inferior da página. Na aba “todos”, um único gráfico incluirá os dados das frequências alélicas em todas as populações, a cada geração. O usuá-



rio poderá optar por observar os dados referentes aos dois alelos (*A1* e *A2*) ou apenas um deles em cada população. Posicionando o *mouse* sobre um ponto de uma das linhas do gráfico, serão mostradas as seguintes informações: o alelo que está sendo representado por aquela linha (*A1* ou *A2*), além da população, geração (eixo *x*) e frequência alélica (eixo *y*) a que aquele ponto específico do gráfico se refere. Os dados da simulação para cada população são tabulados para mostrar qual alelo foi fixado em cada uma delas e em

que geração isso ocorreu. No gráfico de rosca que estará posicionado ao lado, é possível observar a proporção de populações em que cada um dos alelos foi fixado. Para informações mais específicas, o usuário poderá clicar na aba referente ao nome da população de interesse (que ficará ao lado da aba “todos”). Assim, ao arrastar a barra localizada ao final da página será possível observar os dados genotípicos e fenotípicos da população a cada geração e como se alteraram ao longo do tempo.



2. “Repetição” (Figura 2): aqui, o usuário pode verificar se os mesmos resultados da etapa anterior são obtidos ao replicar o experimento várias vezes. Assim, é possível identificar padrões gerais de forma mais robusta e delinear propriedades da deriva, como o fato de que, em geral, a fixação ocorre mais rapidamente em populações menores, e que não há preferência por um dos alelos. Para isso, deve-se inserir o tamanho da população, o número de réplicas (ou seja, quantas vezes a simulação da etapa anterior deve ser repetida) e o máximo de gerações até onde a análise deverá ir. Caso não ocorra a fixação de

um dos alelos antes, por exemplo, se o número escolhido for 5.000 e ao atingir esse número de gerações, os dois alelos ainda estiverem segregando na população, a análise será finalizada nesse ponto. Ao inserir esses parâmetros, o usuário pode então iniciar a simulação, e ao finalizar, serão gerados dois gráficos. O primeiro, um histograma, representa uma distribuição demonstrando o número de casos (eixo *y*) em que um dos alelos foi fixado em um determinado intervalo *x* de gerações (eixo *x*). Por exemplo, é possível identificar quantos eventos de fixação ocorreram entre as gerações 100 e 200,

Figura 1. Visão geral do **Alelotório**, demonstrando a aba inicial “Comparação”. Nela, é possível incluir os dados das populações a serem analisadas e comparadas na simulação.

ou 300 e 400 etc., podendo o tamanho desses intervalos ser ajustado na barra “agrupar por”, presente abaixo do gráfico. Ainda, nesse histograma é possível observar o número máximo de gerações, considerando todas as réplicas que foram necessárias para que um dos alelos fosse fixado. A informação referente à quantidade de vezes que cada um dos alelos foi fixado é resumida em um gráfico de rosca

disposto ao lado do histograma. Toda a análise descrita nesse tópico diz respeito à simulação de réplicas para as condições (tamanho populacional) de uma mesma população. Contudo, para fins comparativos, sugere-se que o usuário repita o processo para cada uma das populações analisadas no tópico anterior (“comparação”), ajustando o tamanho populacional adequadamente.



Figura 2. Aba “Repetição” do **Alelotório**. Nela, é possível repetir a simulação realizada no tópico anterior de cem a mil vezes, para cada população.

Roteiro

No tópico anterior, apresentamos o **Alelotório**, suas abas e funções. Aqui, propomos um roteiro para utilização em sala de aula, embora o programa possa ser utilizado para simular diversos cenários, permitindo que o usuário explore a ferramenta e investigue diferentes questões. O intuito é que, através de uma abordagem mais ativa, o aluno seja parte central na construção de seu próprio conhecimento, cabendo ao professor o papel de guia, e consiga, ao fim, identificar as propriedades gerais da deriva. A sugestão para a realização da prática é que cada aluno realize o processo individualmente (ou em grupos pequenos), e só depois discuta os resultados com o restante da turma.

Situação problema

Uma grande empresa mantém uma criação de peixes com três fenótipos distintos: vermelho, laranja e amarelo, determinados pelos genótipos *A1A1*, *A1A2* e *A2A2*, respectivamente. Para fins de venda, esse distribuidor adota uma norma que especifica que a população de cada aquário vendido deve ser metade formada por indivíduos laranjas, e a outra metade igualmente composta por indivíduos vermelhos e amarelos (ou seja, 25% de cada uma dessas duas cores).

Para a inauguração do Grande Aquário Municipal (GAM), a prefeitura comprou 200 indivíduos desse fornecedor para iniciar uma população, sendo esse tamanho populacional mantido a cada geração. Em paralelo, um funcionário do GAM, encantado com



os peixes de cores vibrantes que havia visto lá, decidiu comprar da mesma distribuidora 20 indivíduos e iniciar uma pequena criação, cujo tamanho também manteve constante a cada geração. Assim, as proporções iniciais das variedades (1:2:1) e o processo de criação adotado era o mesmo que aquele do Grande Aquário, mas em uma escala 10 vezes menor.

Após realizar as mesmas práticas de manejo nos dois aquários de forma quase que automática, certo dia o funcionário decidiu fazer um censo e verificou que as proporções fenotípicas haviam mudado. Como isso ocorreu?

Instruções

PARTE I

1. Formule uma hipótese sobre o que você acha que o funcionário do GAM encontrou nas duas populações, no que diz respeito às proporções fenotípicas.
2. Para testar sua hipótese, inicie uma simulação no **Alelotório**. Na aba “comparação”, inclua os dados das duas populações (uma de cada vez), com os nomes e número de indivíduos, e, em seguida, pressione o botão “iniciar simulação”.
3. Analise os resultados dessa primeira etapa e responda as seguintes questões:
 - a. Houve fixação de algum alelo em alguma das populações? Como é possível identificar isso no gráfico?
 - b. Em caso positivo, qual alelo foi fixado e em que geração isso ocorreu em cada população? O que houve com o outro alelo?
 - c. Essas flutuações nas frequências alélicas têm algum impacto sobre a diversidade genética das populações em estudo?
 - d. Agora, acesse as abas específicas de cada população (com o nome delas) e analise de forma mais detalhada. Compare as proporções fenotípicas iniciais e finais, arrastando a barra localizada ao fim da página. Houve alguma mudança em relação às proporções iniciais?
 - e. Sua hipótese (formulada no tópico 1) foi corroborada ou refutada?

f. Compare seus resultados com os dos colegas. Considerando os tamanhos das populações, as proporções fenotípicas (iniciais e finais), a fixação de alelos e a geração em que isso ocorreu, é possível delinear algum padrão nos resultados encontrados? Justifique sua resposta.

g. Levando em consideração que o funcionário do GAM encontrou diferenças nas proporções fenotípicas das populações após apenas algumas gerações, em qual das populações você acha que ele encontrou maior diferença em relação às proporções iniciais?

Os experimentos realizados por cada aluno com as duas populações constituem verdadeiras réplicas, já que foram utilizados os mesmos parâmetros na análise, ou seja, é como se a simulação realizada por cada aluno representasse a população de um novo GAM e de um novo pequeno produtor. Embora as réplicas possam oferecer algumas pistas sobre padrões gerais, quanto mais réplicas forem realizadas, mais robustas serão as conclusões delineadas. Por isso, a próxima etapa envolve a execução de múltiplas réplicas desse experimento, a fim de testar se as hipóteses levantadas a partir de resultados iniciais se sustentam após vários testes.

PARTE II

1. Na aba “repetição”, utilize as barras referentes ao tamanho da população, número de repetições e número máximo de gerações. Inicie com a população pequena, selecionando os valores de 20, 1.000 e 10.000 para esses parâmetros, respectivamente. Em seguida, inicie a simulação.
2. Observe os gráficos gerados e responda:
 - a. Segundo o histograma mostrado, a maioria dos eventos de fixação nas 1.000 réplicas ocorreu em torno de qual geração? (Para responder a essa questão, posicione o mouse sobre a maior barra do histograma, onde serão mostrados dois números: a geração correspondente e o número de eventos de fixação).
 - b. Ainda segundo esse gráfico, em algumas réplicas a fixação ocorreu após muito mais gerações. Qual o máximo de gera-

ções que foram necessárias para que um evento de fixação acontecesse? (Para responder a essa questão, posicione o mouse sobre a última barra do histograma, e observe a geração a que ela corresponde).

- c. Analise o gráfico de rosca, posicionando o mouse sobre cada uma das cores mostradas. Das 1.000 réplicas, quantas vezes o alelo A1 foi fixado? E o A2? Houve algum desvio considerável de uma proporção 1:1?
3. Repita o passo 1, alterando apenas o valor referente ao tamanho da população, dessa vez ajustando-o para 200 (população do GAM). Em seguida, analise os resultados e responda às três questões do tópico 2, desta vez para essa população maior.
 4. Compare seus resultados com os dos colegas. Você acha que houve alguma preferência pelo alelo A1 ou A2? Considerando as simulações para a população pequena e a grande, é possível estabelecer alguma conclusão?

Conceitos que devem ser apontados através dos resultados obtidos

- A deriva genética leva à perda da variabilidade dentro de uma população. Considerando um locus com dois alelos, quando um deles é fixado, o outro é perdido. Se esse gene estiver envolvido com alguma característica morfológica, como a coloração no caso analisado, a perda de diversidade genética também tem consequências na diversidade fenotípica.
- Ela é uma força evolutiva inversamente proporcional ao tamanho populacional. No exemplo dos aquários do GAM e do funcionário, após algumas gerações, ele conseguiu observar os efeitos da deriva em um grau mais marcante em seu próprio aquário do que no outro. No entanto, as simulações mostram que, dado tempo su-

ficiente, os efeitos mais intensos da deriva podem ser observados também em populações maiores. Ou seja, ele poderia ter encontrado o mesmo resultado no GAM após várias outras gerações. Assim, quanto menor a população, maior a força da deriva e menor o tempo necessário para que haja perda da variabilidade genética, medido em número de gerações.

- ♦ A deriva é aleatória. As flutuações nas frequências alélicas causadas por ela não envolvem a preferência de um alelo quando comparado com outro, ou seja, não há uma vantagem de A1 em relação a A2, ou vice versa. O fato de que a frequência de um aumenta em relação ao outro é algo que ocorre aleatoriamente. Algumas vezes pode levar à fixação de A1, outras vezes, de A2.

Considerações finais

A deriva genética é uma força fundamental no processo evolutivo, embora geralmente pouco creditada e compreendida por estudantes de graduação em Ciências Biológicas. Considerando que uma das principais razões para isso diz respeito à abordagem do tema em sala de aula, a utilização de materiais didáticos interativos, juntamente com metodologias ativas, podem ser estratégias promissoras. Diante disso, propomos a implementação do simulador **Alelotório** seguindo o roteiro aqui descrito em aulas voltadas ao ensino de deriva genética.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro (JLO projeto 153407/2018-2).

Leitura recomendada

- DE OLIVEIRA, J. L.; SOBRINHO-JÚNIOR, I. S. Deriva genética: a aleatoriedade no processo evolutivo. *Genética na Escola*, v.13, n.2, p.105-111, 2018.
- HERRON, J.C.; FREEMAN, S. *Análise evolutiva*. 4ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.



Evolução Humana através da gamificação

A evolução da espécie humana e de outras linhagens de homínios ainda são temas de difícil compreensão no meio escolar. A dificuldade muitas vezes pode estar associada a conceitos errôneos amplamente disseminados sobre a origem do ser humano. Além disso, novas descobertas feitas a cada ano muitas vezes mudam a narrativa conhecida, tornando-se necessário a atualização constante do professor. Utilizando a gamificação da plataforma do Google Forms, este artigo apresenta um material *online*, gratuito e sem necessidade de *download* sobre Evolução Humana. Este recurso tem o objetivo de ser uma ferramenta simples e com conteúdo continuamente atualizado para ser usado no ensino médio e, possivelmente, no ensino superior.



Marília Carina Baltazar, Mariana Freitas Nery

Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Genética, Evolução, Microbiologia e Imunologia, Instituto de Biologia, Campinas, SP

Autor para correspondência - marilia.carina@gmail.com

Palavras-chave: evolução humana, material online, gamificação, Google Forms, jogo de perguntas, viagem no tempo

“De onde viemos?” ou “Quem somos?” são perguntas que provavelmente já fizemos em relação a nós mesmos. Respondendo sucintamente: como espécie humana, viemos do continente africano, mas para a pergunta “quem somos”, é preciso um aprofundamento maior na nossa história evolutiva e no entendimento de como a nossa espécie chegou até a atualidade.

Para entendermos como evoluímos até os dias atuais, precisamos entender a evolução biológica que, em termos simples, é a mudança dos seres vivos ao longo do tempo, resultado da ação de processos evolutivos, como a seleção natural, por exemplo. A evolução é um campo da ciência que busca entender como surgiu - e ainda surge - a biodiversidade na Terra, explicando as semelhanças e diferenças biológicas existentes entre os seres vivos e as suas adaptações para os mais variados ambientes.

Todos os organismos vivos do nosso planeta estão sujeitos à evolução, incluindo a nossa espécie que, desde seu surgimento, sofreu muitas transformações através dos processos evolutivos - exatamente como todos os demais grupos de seres vivos. Porém, a evolução humana ainda é dificilmente assimilada na esfera escolar/universitária e, mais ainda, fora dela. Para isso, neste presente artigo será apresentado um material didático como recurso para compreender a Evolução Humana.

Gamificação

O objetivo deste material didático é elucidar os conceitos sobre evolução, com foco na evolução humana, de forma dinâmica e interessante para os jovens estudantes. Para este propósito, foi usada a gamificação do Google Forms, ou seja, a plataforma de formulários fornecida pelo Google foi utilizada de forma que parecesse um jogo de perguntas. Todas as perguntas são objetivas e as respostas estão dispostas em alternativas, na qual cada uma delas direciona a pessoa para uma resposta de *feedback*, mostrando se a alternativa estaria correta ou incorreta. Outro ponto importante deste material é auxiliar os estudantes a entenderem como os processos evo-

lutivos ocorrem e trazer aspectos de como a ciência acontece.

O material didático sobre a Evolução Humana aqui proposto é totalmente virtual, gratuito, continuamente atualizado e sem necessidade de *download*. A gamificação é voltada para alunos do ensino médio, porém pode ser usada também para alunos ingressantes de cursos do ensino superior que tenham tal disciplina no currículo.

Para ter acesso à gamificação,
basta acessar o link abaixo:

<https://forms.gle/yctfAT'Z7LXcvcyWR9>

A gamificação consiste de 13 perguntas com 3 a 7 alternativas como respostas, dependendo da questão. Todas as perguntas possuem apenas uma escolha correta. Para cada alternativa há um *feedback* da resposta, independentemente de ela estar certa ou errada. Por exemplo, se o aluno errar a alternativa, terá uma explicação do porquê daquela resposta estar incorreta e ele será levado de volta à questão para tentar novamente. Só quando o jogador acertar a questão, é que ele poderá seguir para a pergunta seguinte. Dessa maneira, o aluno pode jogar de maneira autônoma, entendendo o motivo de ter errado eventuais respostas, tanto pela explicação como também pelas dicas fornecidas para ajudar o jogador a acertar a alternativa correta. Assim, a gamificação oferece um novo ponto de vista sobre o assunto, permitindo que o jogador jogue de novo e compreenda o tema da questão por completo.

As perguntas foram feitas seguindo uma linha cronológica evolutiva, como se o aluno estivesse fazendo uma viagem no tempo para milhões e milhares de anos atrás, até os dias atuais. A viagem no tempo passa pelos principais marcos da história evolutiva humana, sobre a compreensão de como a ciência funciona, e aborda a diversidade de espécies humanas e a coexistência do *Homo sapiens* com algumas delas. Há também curiosidades, *links* de sites para que o aluno possa aprofundar mais sobre o assunto das questões, caso deseje, e questionamentos reflexivos são trazidos também no material didático, abrindo possibilidade para o professor trabalhar em sala estas questões em aberto.



Figura 1.
Tela de início da gamificação.

Viajando no tempo

A viagem no tempo passa pelos temas a seguir, com suas respectivas perguntas:

1. Vídeo de introdução sobre a Evolução Humana e o convite para os alunos em-

barcarem na viagem do tempo e entender como surgimos;

2. Como era a Terra há 7 milhões de anos?;
3. Importância de saber sobre o ambiente e suas variações ao longo da evolução humana;



Evolução Humana - viajando no tempo

Hominínios e Hominídeos

Hominínios: grupo evolutivo que agrupa gêneros de espécies humanas, incluindo fósseis e humano moderno (*Sahelanthropus tchadensis*, *Australopithecus afarensis*, *Homo erectus* etc).

Hominídeos: grupo evolutivo que agrupa a família de grandes macacos sem cauda, incluindo gorilas, orangotangos, chimpanzés e nós, humanos.

Qual é uma das características que distingue os hominínios de outros primatas?

☐ Usar pedras como ferramentas

☐ Cérebro grande

☐ Bipedalismo (andar sobre 2 pernas)

☐ Saber usar o fogo

[Voltar](#) [Próxima](#) [Limpar formulário](#)

Figura 2.
Terceira pergunta da gamificação.

4. Hominínios e Hominídeos: qual é uma das características que distingue os hominínios de outros primatas?;
5. Hipótese da Savana: surgimento do bipedalismo;
6. Bipedalismo: sua vez de descobrir se o fóssil apresentado é bípede ou não;
7. Estilo de vida: de que modo a habilidade de fazer e utilizar ferramentas impulsionou a nossa evolução?;
8. Entre 2 milhões e 1.8 milhão de anos atrás: quantidade de espécies de hominínios que havia na Terra e quantas pertenciam ao gênero *Homo*;
9. Relação entre maior capacidade cerebral e maior complexidade;
10. *Homo sapiens*: os efeitos de sociabilizar;
11. Cultura e arte: saber diferenciar uma pintura moderna de uma pintura de milhares de anos atrás;
12. Chegada às Américas: como saber quando chegamos?;
13. Sozinhos: por que não há outras espécies humanas vivendo com a gente?;
14. Para onde vamos?;
15. Referências.

Evolução Humana - viajando no tempo

Saber usar o fogo... será?

Os humanos não foram os primeiros a usarem o fogo em benefício próprio. Talvez tenham sido os primeiros a saber dominá-lo. Mas, a prática de usar o fogo, quando há queimadas naturais em regiões secas, pode ser percebida por animais atuais, como o chimpanzé que se alimenta de animais queimados pelo fogo, ou as águias que se beneficiam do fogo para pegar os animais que tentam fugir dele. Tente novamente!

Águias se aproveitando do fogo para caçar.



[Voltar](#) [Próxima](#)

Figura 3.
Resposta de feedback se o estudante escolher a alternativa "Saber usar o fogo".

Sugestão para os docentes

Para ter acesso à gamificação não é necessário colocar um e-mail e os usuários são totalmente anônimos. Como só é possível chegar ao fim do jogo acertando todas as questões, não é necessário o professor ter acesso ao formulário de respostas que o Google Forms gera automaticamente para as respostas enviadas, pois o próprio jogo guiará os alunos para as alternativas corretas. Como sugestão, os professores podem pedir para que os alunos anotem as questões que erraram uma ou mais vezes até acertarem, para que possam visualizar qual(is) das questões a turma está com mais dificuldade para responder corretamente.

lário de respostas que o Google Forms gera automaticamente para as respostas enviadas, pois o próprio jogo guiará os alunos para as alternativas corretas. Como sugestão, os professores podem pedir para que os alunos anotem as questões que erraram uma ou mais vezes até acertarem, para que possam visualizar qual(is) das questões a turma está com mais dificuldade para responder corretamente.

Evolução Humana - viajando no tempo

Isso mesmo!

O **bipedalismo** ou **bipedismo**. No início o **bipedalismo** era uma **adaptação comportamental** para fazer curtos caminhos, como carregar alimentos com as mãos. Mas com o tempo e através de processos evolutivos, houve uma **reorganização musculoesquelética** que fez com que certos primatas pudessem percorrer maiores caminhos em 2 membros.

Sahelanthropus tchadensis - Uma das espécies mais antigas da árvore genealógica humana, viveu entre 7 e 6 milhões de anos atrás na África Centro-Occidental (Chade). Andar em pé pode ter ajudado esta espécie a sobreviver em diversos habitats, incluindo florestas e pastagens. Apesar de poder andar sobre dois membros, seu uso era ocasional, ou seja, andar ereto não era sua forma de locomoção prioritária.



Voltar

Próxima

Limpar formulário

Figura 4. Resposta correta da questão sobre uma das diferenças entre hominínios e homínídeos.

Apêndice

Desafios em ensinar Evolução Humana

A evolução humana é comumente menosprezada no conteúdo sobre evolução nas escolas, mesmo que o ser humano seja

usado como referencial para outros assuntos, como anatomia, genética ou fisiologia. Alguns fatores podem influenciar tal situação, sendo eles relacionados aos alunos, aos professores e ao material didático. Em relação aos alunos, pode não haver interesse pelo assunto, seja por sua crença pessoal ou pelo não entendimento acerca do processo

evolutivo. Com relação aos professores, eles podem não ter uma formação adequada que os respalde neste conteúdo, ou podem ser influenciados por sua crença individual ou ainda pelo desejo de não criar conflitos dentro da sala de aula. Por fim, com relação aos materiais didáticos, por não incluírem informações recentes acerca da evolução humana ou quando a possuem, podem conter conceitos inexatos.

Outra dificuldade em ensinar este tema está relacionada à aceitação de que a teoria darwinista da Evolução é a melhor explicação científica para origem de novas espécies a partir de espécies preexistentes e à compreensão de como a evolução acontece. Para entender evolução, e ainda mais evolução humana, é de fundamental importância compreender o que é ciência e os conceitos relacionados a ela.

Alguns aspectos são tidos como consensuais no que diz respeito à compreensão do que é a natureza da Ciência e devem ser discutidas entre alunos e professores. Tais aspectos podem ser relacionados às dificuldades de entender a evolução, em geral, e a evolução humana, em particular, tais como: acreditar que a ciência seja apenas experimental e pode resultar em pensamentos como “A evolução não é ciência porque não pode ser testada”; ou entender uma teoria como se fosse uma mera especulação, sem base científica, e que pode resultar na ideia de que “a evolução é só uma teoria”. Há também o aspecto do conhecimento científico ser provisório e dinâmico, isto é, que na ciência não há uma única verdade absoluta e imutável que deve ser aceita cegamente, mas que ela é dinâmica e o conhecimento científico está em constante mudança, revendo seus modelos e bases, da mesma maneira que a nossa interpretação sobre ela muda com o tempo, de acordo com o contexto social, cultural e político.

O material didático aqui proposto aborda tais aspectos da natureza da Ciência sob a ótica da evolução humana.

Do macaco ao...

Um dos conceitos errôneos mais comuns sobre a evolução humana é a de que ela seria linear, ou seja, a ideia de que os humanos modernos originaram-se através de sucessivas substituições de espécies anteriores à nossa, como se pudesse viver apenas uma espécie por vez e a cada geração espécies mais primitivas se transformariam em espécies cada vez mais superiores e mais evoluídas. Esse conceito foi muito divulgado pela ideia de que o homem veio do macaco, que mostra uma imagem generalista de um macaco em uma extremidade e, ao longo de uma sucessão linear, mostra diferentes espécies até que seja atingida a outra extremidade, com uma imagem do *Homo sapiens*. Esse conceito de evolução mal formulado pode fazer com que se acredite que a evolução humana ocorreu durante milhões de anos para que chegasse a um propósito, à nossa espécie. Assim, além de facilitar o equívoco sobre a evolução ter uma finalidade, a ideia que o ser humano pôde criar de si mesmo configura um conceito completamente antropocêntrico e sem capacidade de valorizar as demais formas de vida na Terra. Esta concepção errônea sobre evolução humana está amplamente difundida em diversos meios. Tal análise da situação motivou a disponibilização desse novo recurso para professores e estudantes trabalharem o tema de modo mais adequado didática e cientificamente.

Para saber mais

MOURA, J. C. SILVA; SILVA-SANTANA, C. CERQUEIRA. A evolução humana sob a ótica do professor do ensino médio. In: *Revista Metáfora Educacional* – versão on-line, n. 13 (jul. – dez. 2012), Feira de Santana – BA (Brasil), dez./2012, p. 93-108.

MOURA, B. A. O que é natureza da Ciência e qual sua relação com a História e Filosofia da Ciência? *Revista Brasileira de História da Ciência*, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 32-46, jan. 2014.

LEMOS, M. ENSINAR E APRENDER EVOLUÇÃO HUMANA: um estudo centrado na aprendizagem baseada na resolução de problemas. 2015. 208 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2015.



Que direção seguir? Melhor nenhuma!

Explorando o problema da teleologia e da hierarquia evolutiva no Ensino de Evolução com o uso de materiais didáticos digitais*

Alessandra da Conceição Zanin¹, Marina Corrêa Scalon², Paula Carolina Ferreira³, Allana K. P. da Silva⁴, Felipe Aguiar Martin⁴, Guilherme Rosa⁴, Iago Gabriel da Silva⁴, Isabela Santos Kropiwiec⁴, Laura Laino da Costa⁴, Luddy Searom Carias de Moraes⁴, Nickolas Spinelli Klein⁴, Pollyana de Brito⁴, Yasmin Cristina Ribeiro da Silva⁴, Fabricius M. C. B. Domingos⁴

¹ Programa de Pós-Graduação em Educação em Ciências e em Matemática, Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, PR

² Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação, Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, PR

³ Programa de Pós-Graduação em Botânica, Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, PR

⁴ Departamento de Zoologia, Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, PR

Autor para correspondência - fabricius.domingos@ufpr.br

Palavras-chave: biologia evolutiva, ensino médio, hierarquia evolutiva, material didático, paradigma panglossiano, teleologia

Neste trabalho, desenvolvemos e aplicamos dois materiais didáticos digitais (vídeo e folder) que podem auxiliar na desconstrução do pensamento teleológico e da ideia da hierarquia evolutiva em sala de aula, e verificamos sua eficiência em uma situação experimental alheia à sala de aula. Buscamos abordar conceitos básicos de evolução biológica, tratando explicitamente dos problemas da teleologia e da hierarquia evolutiva, a serem trabalhados no Ensino Médio e potencialmente em disciplinas introdutórias do primeiro ano de cursos na grande área das Ciências Biológicas.

* Artigo desenvolvido no contexto da disciplina “Produção de Material Didático em Zoologia” do Departamento de Zoologia, Universidade Federal do Paraná (UFPR).

O problema da teleologia e da noção de hierarquia no Ensino de Evolução

O vocabulário utilizado por professores(as) de Biologia durante o Ensino de Evolução reflete alguns dos dilemas culturais e epistemológicos que a Teoria da Evolução causou na sociedade moderna. Incurrir em equívocos no emprego de figuras de linguagem para tentar explicar e exemplificar conceitos evolutivos é uma prática comum. Desta forma, é necessária uma maior atenção sobre o problema de como as expressões e figuras de linguagem utilizadas em sala de aula podem fundamentar conceitos incorretos, principalmente em relação à Educação Básica. Apesar das frequentes tentativas de se esquivar da teleologia e explicações relacionadas por profissionais em biologia evolutiva, tal iniciativa é ainda limitada em sala de aula e em livros didáticos de Educação Básica.

Pensamentos teleológicos, juntamente com a ideia preconcebida de que existe uma hierarquia evolutiva, são fundamentados em grande carga cultural nos(as) estudantes. Tais interpretações preconcebidas implicam em uma tendência de assimilação dos conceitos evolutivos de modo a favorecer a explicação de que os seres vivos, assim como as suas características, tenham evoluído em determinada direção para atingir objetivos predefinidos. A esse respeito, dois conceitos devem ser alvos principais de críticas: eventos futuros causados por eventos anteriores e a ideia da intencionalidade dos eventos.

Em sala de aula, o problema das interpretações teleológicas apresenta-se na forma das explicações dos processos evolutivos. As explicações são habitualmente associadas a vícios de expressões e leituras de figuras de linguagem equivocadas do ponto de vista da biologia evolutiva. Tal fenômeno não é restrito aos estudantes, e muitos(as) biólogos(as) e professores(as) utilizam uma linguagem

teleológica para facilitar a explicação de diversos assuntos das ciências, ou de forma metafórica e ilustrativa.

Apesar de, ao menos superficialmente, facilitar a explicação e compreensão de conceitos biológicos, tal prática muitas vezes causa interpretações equivocadas dos temas tratados, e tais problemas tendem a não ser reparados ao longo do processo de ensino-aprendizagem. Desta forma, a utilização e propagação de ideias teleológicas e da existência de uma hierarquia evolutiva geram barreiras na compreensão de conceitos evolutivos, causadas por uma falha nos processos de ensino. Tais problemas podem também estar relacionados a outras questões: o pouco tempo dedicado ao Ensino de Evolução no Ensino Médio, a pouca importância dada ao assunto nos materiais didáticos oficiais adotados pelas escolas, bem como as crenças e conhecimentos prévios que o(a) estudante possui quando chega em sala de aula.

Problema proposto: a história evolutiva como um processo teleológico e hierárquico

A pergunta que não quer calar: “e então, quem é mais evoluído, humanos ou macacos?”

Observe a imagem a seguir e vamos refletir sobre o questionamento acima.

Interpretações teleológicas e hierárquicas do processo evolutivo implicam na construção de cenários equivocados onde haveria melhoria ou progresso dos organismos vivos e de suas características ao longo da evolução, e também de que haveria, no momento presente, espécies mais evoluídas do que outras. Em uma reflexão rápida sobre tais concepções, talvez o exemplo mais clássico seja o representado na Figura 1, que claramente sugere uma interpretação em que humanos teriam evoluído de forma direta de uma espécie de primata vivente (chimpanzé ou similar), e que as características morfológicas

teriam melhorado ao longo desse processo. Uma análise mais detalhada indica, ainda, que tal processo ocasiona uma falsa sensação de extinção das espécies em etapas evolutivas

intermediárias, porque suas características não eram suficientemente boas e, também, possivelmente para permitir a origem da própria espécie humana.

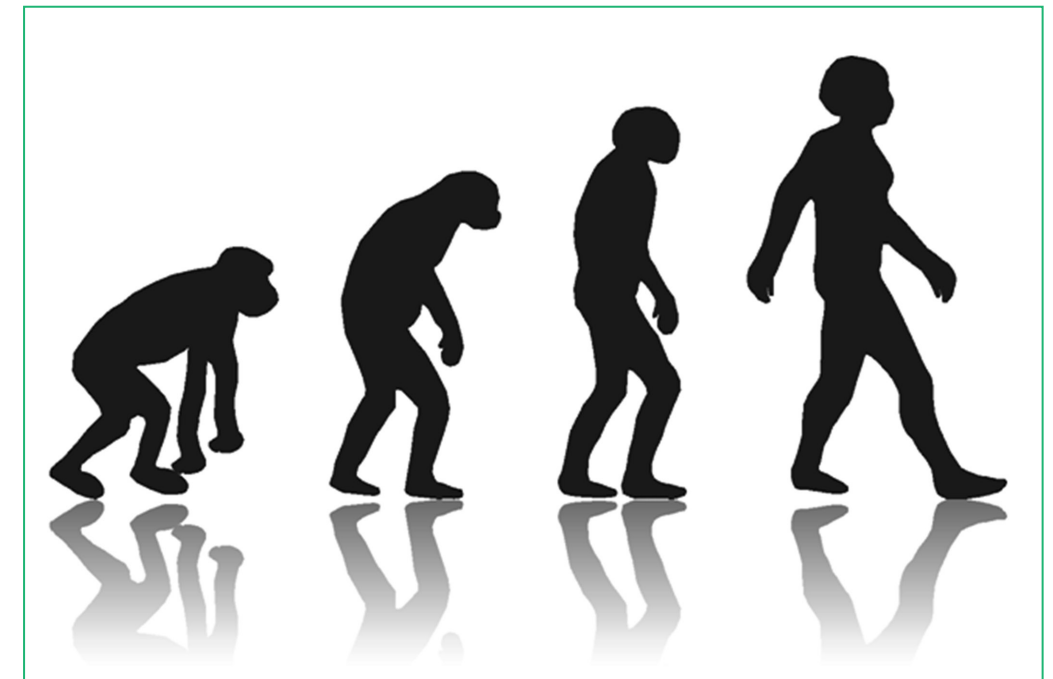


Figura 1. “Do macaco ao homem”, imagem que reforça vários conceitos equivocados acerca de biologia evolutiva, e é extremamente utilizada ao lado da palavra “Evolução” em diferentes tipos de mídia.

Centenas de outros exemplos regidos pelo pensamento teleológico e hierárquico, e frequentemente utilizados em aulas acerca de biodiversidade e de grupos de organismos, poderiam ser citados. De forma geral, o que se observa é uma incoerência na interpretação e no uso das figuras de linguagens, como no cenário exemplificado a seguir: afirmar que o coração das aves possui quatro câmaras dada à finalidade de melhor oxigenar o sangue e possibilitar o desempenho necessário durante o voo. Apesar de possuir conceitos corretos associados, tal explicação em sala de aula implica, geralmente, que tal estrutura teria evoluído de estruturas consideradas intermediárias. No caso, esses passos intermediários seriam o coração de peixes com duas câmaras e, em etapa seguinte, o coração de anfíbios e répteis com três câmaras, para finalmente chegar à etapa desejada em organismos endotérmicos. Nesse cenário, ignora-se que a evolução da morfologia do coração, bem como do voo ou da endotermia,

estariam necessariamente ligados à seleção natural e outros mecanismos evolutivos. Assim, atribui-se ao surgimento das características uma necessidade intrínseca que existiria em organismos considerados superiores, em comparação àqueles organismos ectotérmicos e que possuem coração com menor número de câmaras e seriam, portanto, inferiores.

Mas, afinal, como trabalhar esses conceitos de forma a abordar diretamente o problema da teleologia e da hierarquia evolutiva em sala de aula? Para tanto, desenvolvemos dois materiais didáticos digitais para facilitar o estudo e a discussão deste tema, no escopo do Ensino de Evolução, na tentativa de desconstruir conceitos teleológicos e hierárquicos. A escolha por materiais didáticos digitais foi realizada pela possibilidade de proporcionarem a utilização dos mesmos tanto em sala de aula quanto em contextos de Ensino à Distância (EaD).

Objetivo

Contornar tanto as interpretações teleológicas quanto a noção de hierarquia na história evolutiva dos organismos, assim como a utilização de terminologias teleológicas para explicar adaptações que evoluíram por seleção natural, são alguns dos maiores desafios que professores(as) encontram em sala de aula.

Nas seções a seguir, descrevemos dois materiais didáticos digitais que podem auxiliar na desconstrução do pensamento teleológico e da ideia da hierarquia evolutiva, muitas vezes impregnadas no Ensino de Evolução. Buscamos abordar conceitos básicos de evolução biológica, tratando explicitamente do problema da teleologia e da hierarquia evolutiva, a serem trabalhados no Ensino Médio e potencialmente em disciplinas introdutórias do primeiro ano de cursos na grande área das Ciências Biológicas.

Proposta pedagógica: descrição e contribuição dos materiais didáticos digitais para desconstrução de conceitos evolutivos problemáticos

Os materiais didáticos digitais foram criados em formatos amplamente utilizados, vídeo em MP4 e folder em PNG, para facilitar o acesso de modo presencial ou remoto. Optou-se, ainda, por desenvolver exemplos e figuras de linguagens que representassem equívocos comuns no Ensino de Evolução. A linguagem utilizada foi simplificada o máximo possível para que os materiais fossem facilmente compreendidos por discentes do Ensino Médio e acadêmicos(as) das áreas biológicas.

Além disso, em atenção aos padrões de utilização de mídias digitais por parte dos estudantes do século XXI, prezamos imensamente pelo desenvolvimento de materiais para os quais a visualização fosse de curta duração, de modo a permitir uma rápida e instigante visibilidade entre os(as) estudantes e a comunidade interessada. Tanto o vídeo quanto o folder (Figura 2) visam abordar conceitos evolutivos básicos e desconstruir os conceitos de direcionalidade, progresso e hierarquia quando aplicados aos sistemas e processos biológicos.



Figura 2.
A) entrada do vídeo “Quem é mais evoluído?” e, B) capa do folder “O animal mais evoluído do mundo!”.

O Vídeo: “Quem é mais evoluído?”

A animação traz dois personagens principais, um ser humano, com adaptações para sobreviver em ambiente terrestre, e um peixe exclusivamente aquático. No início da trama, ambos são representados nos respectivos ambientes que possuem características específicas e que permitem sua sobrevivência. Na sequência, são sub-

metidos a diferentes ambientes: terrestre, aquático e aéreo.

As cenas narradas mostram, em formato de uma disputa (como em jogos de videogame), qual ser vivo sobreviveria em cada situação, de acordo com as suas características específicas. Como resultado, há um empate na competição, uma vez que no exemplo criado nenhum dos personagens, ao ser submetido a ambientes para os quais não tinham adaptações, conseguiriam sobreviver (Figura 3).

Figura 3.
Sequência de algumas cenas introdutórias do vídeo didático. A) Entrada do vídeo “Quem é mais evoluído?”; B) Cena 1 – Ambiente comum ao peixe; C) Cena 2 – Ambiente comum ao humano; D) Cena 3 – Questionamento sobre o que aconteceria se os personagens mudassem de ambiente; E) Cena 4 – Personagens nos respectivos ambientes naturais; F) Cena 5 – Personagens nos ambientes incomuns; G) Cena 6 – Round 1: Morte do peixe por não possuir adaptações para sobreviver em ambiente desprovido de água; H) Cena 7 – Round 2: Morte do ser humano por não possuir adaptações para sobreviver em ambiente exclusivamente aquático; I) Cena 8 – Round 3: Morte simultânea do peixe e do ser humano por não possuírem adaptações para sobreviverem em ambiente exclusivamente aéreo.



Na sequência, há uma explicação no vídeo a respeito do empate entre os personagens (Figura 4). Para tanto, é feito um questionamento sobre o que leva, então, um ser vivo a ser mais evoluído do que outro. Em termos básicos, a explicação que se segue busca:

a) fundamentar o conceito de que evoluir não significa melhorar ou se tornar mais complexo;

b) reforçar a maneira como a seleção natural atua para fixar determinadas características fenotípicas nas populações, de acordo com o ambiente em que estão inseridas;

c) indicar que, em larga escala, mudanças nos ambientes e no planeta Terra como um todo fazem com que a evolução siga diferentes caminhos em diferentes grupos de organismos;





Figura 4. Sequência de algumas cenas do vídeo didático com explicações sobre evolução biológica e seleção natural. **A)** Cena 9 - Indicação de empate entre o peixe e o ser humano; **B)** Cena 10 - Questionamento sobre o que supostamente levaria um ser vivo a se tornar mais evoluído que outro; **C)** Cena 11 - Explicação sobre a falsa ideia de melhoria evolutiva; **D)** Cena 12 - Explicação sobre a evolução ser um processo ocorrido ao longo do tempo; **E)** Cena 13 - Indivíduos de determinada espécie com características fenotípicas distintas; **F)** Cena 14 - Personagens sendo selecionados em decorrência das características que os tornam mais suscetíveis à predação em determinados ambientes; **G)** Cena 15 - Demonstração de como poderia ocorrer a hereditariedade de determinada característica em um ambiente específico; **H)** Cena 16 - Questionamento sobre a ideia incorreta de melhoria ao longo do processo evolutivo; **I)** Cena 17 - Explicação sobre a falsa ideia de aumento de complexidade ao longo do processo evolutivo; **J)** Cena 18 - Explicação sobre como possíveis mudanças ambientais interferem no processo evolutivo; **K)** Cena 19 - Explicação sobre as características que permitem a sobrevivência de cada ser vivo em determinados ambientes; **L-M)** Cenas 20 e 21 - Explicação sobre a falsa ideia de hierarquia e complexidade em biologia evolutiva e; **N)** Cena 22 - Encerramento do vídeo; **O)** Cena 23 - Motivação, e integrantes que compuseram a produção do vídeo.

- d) defender que os organismos que observamos possuem atributos que podem permitir sobrevivência em um determinado ambiente naquele instante/período considerado, mas não sobreviverão em todos os casos, e podem não sobreviver frente a mudanças ambientais, e;
- e) concluir que não existem seres vivos mais ou menos evoluídos do que outros e, ainda, eles não devem ser considerados como parte de uma hierarquia.

O Folder: “O animal mais evoluído do mundo!”

A história é baseada no protagonismo de uma ostra que alega, de forma presunçosa e irônica, ser o animal mais evoluído do mundo (Figura 5). Ao lado da ostra, diferentes es-

pécies estariam destacando algumas de suas próprias características, que as tornariam mais evoluídas do que a espécie anterior. Devido às peculiaridades e características de cada uma, todas igualmente incríveis, de maneira própria a cada uma, refuta-se a concepção de hierarquização dos seres vivos.

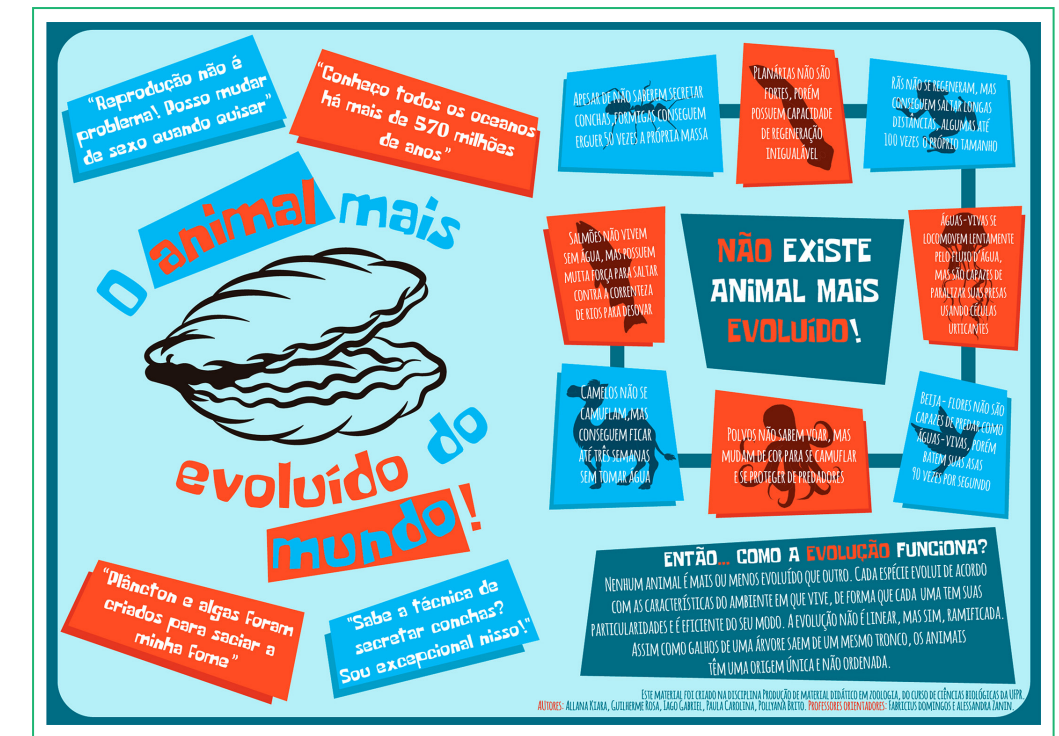


Figura 5. Folder “O animal mais evoluído do mundo!” na íntegra.

A ideia do folder surgiu a partir da leitura do texto “Foi o mundo feito para os Homens?” (*Was the world made for man?*) de Mark Twain, que trata exatamente de uma resposta irônica ao pensamento teleológico e hierárquico defendido por Alfred R. Wallace em seu livro “*Man's Place in the Universe*”. Ambos os textos foram publicados originalmente em 1903, evidenciando que a problemática da hierarquia evolutiva e outras interpretações teleológicas perduram por mais de um século.

Dividido em três partes, o folder traz a percepção da personagem Ostra a respeito de suas próprias características, e as vantagens que cada uma lhe confere. Neste con-

texto, tais características possibilitam que seja considerada o animal mais evoluído do mundo (Figura 6A). Segundo a Ostra, a reprodução para ela não é um problema, uma vez que, por se tratar de um ser hermafrodita, passa por mudanças de sexo conforme mecanismos de amadurecimento dos gametas. Ainda, por decorrência da trajetória evolutiva dos Bivalvia, de forma simplificada, a Ostra alega ter conhecido todos os oceanos do planeta. Outra característica que a personagem acredita ser fundamental para se intitular como o animal mais evoluído, refere-se a como outros seres vivos foram criados exclusivamente para a alimentar. Tal assertiva busca fazer referência

ao modo como algumas culturas humanas compreendem e dão sentido às características observadas em outros organismos, de forma geralmente antropocêntrica, finalista e utilitarista. Por fim, a personagem aponta que produzir a própria concha também lhe confere vantagens que permitem a ela ser o animal mais evoluído do mundo.

A imagem seguinte (Figura 6B), busca fazer o leitor refletir sobre como alguns organismos possuem características igualmente incríveis a de outros organismos e, portanto, não existem motivos para a argumentação de que determinados organismos seriam mais evoluídos do que outros. A imagem corresponde a um ciclo, em sentido horário, de diferentes animais argumentando acerca das particularidades que possuem e, de acordo com tais condições, poderiam ser considerados os animais mais evoluídos do mundo.

Tais particularidades referem-se, respectivamente, à habilidade: da formiga, em erguer uma massa 50 vezes maior que seu próprio peso; da planária, em realizar regeneração corporal; da rã, em saltar uma distância até 100 vezes maior que o comprimento do próprio corpo; da água-viva, em agarrar e matar suas presas por meio de células urticantes; do beija-flor, em bater as asas 90 vezes por segundo; do polvo, em mudar de cor e camuflar-se para proteger-se de predadores; do camelo, em poder ficar até três semanas sem ingerir água; do salmão, em saltar contra a correnteza de rios a fim de desovar (Figura 6B).

Por fim, no último quadro, há uma breve explicação teórica sobre a temática abordada, relacionando os caracteres à desconstrução dos conceitos evolutivos erroneamente tratados, hierarquia e progresso evolutivo (Figura 6C).

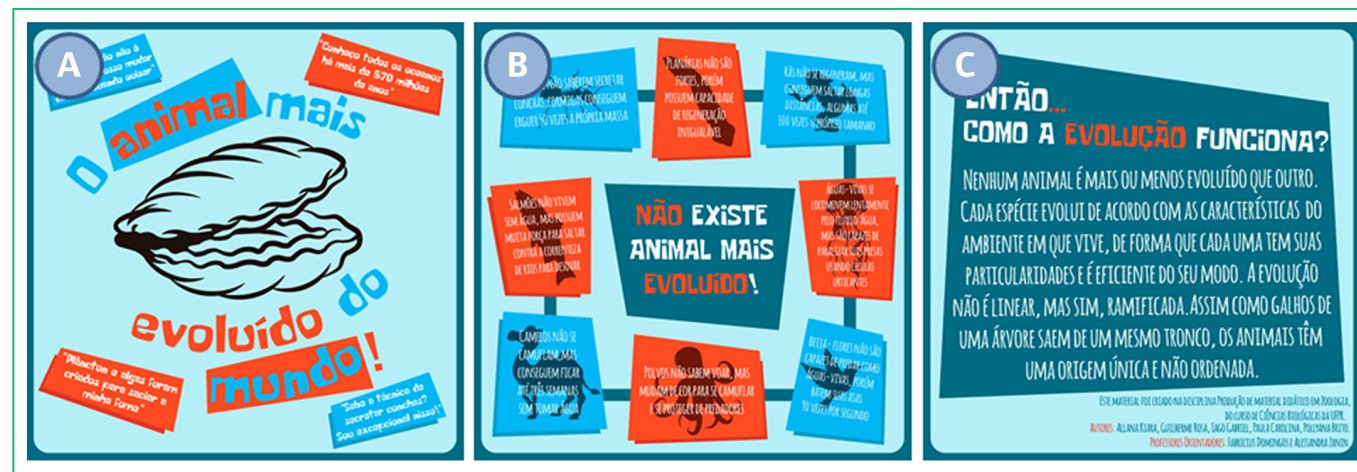


Figura 6.

Divisões do folder “O animal mais evoluído do mundo!”.

A) A protagonista Ostra e as respectivas características que a sustentam, ironicamente, como o animal mais evoluído do mundo; **B)** Diferentes animais e as respectivas características que os tornariam os animais mais evoluídos do mundo; **C)** Explicação sobre a falsa concepção de existirem organismos mais evoluídos, motivação e integrantes que compuseram a produção do folder.



Em suma, os materiais didáticos digitais apresentados, por meio de animações e representações do cotidiano do(a) estudante de Educação Básica ou Ensino Superior, possibilitarão, em sala de aula, o levantamento de discussões e reflexões a respeito de conceitos evolutivos. Tais reflexões serão

realizadas de forma concomitante com assuntos que podem ser curiosidades e fatos interessantes sobre a biodiversidade, facilitando a receptividade pelos(as) estudantes. Os materiais didáticos originais estão disponíveis para *download* no site da revista Genética na Escola.

Sugestão de como abordar em sala de aula

Como proposta de emprego dos materiais digitais, acreditamos que discutir amplamente o tema em sala de aula seja fundamental. Para isso, sugerimos apresentar algumas perguntas como guia para os(as) professores(as) conduzirem uma discussão. Para tanto, fornecemos um questionário simples (Anexo 1) que pode ser utilizado na íntegra, ou adaptado e complementado da forma que o(a) professor(a) julgar melhor.

Uma opção para ação direta em sala de aula seria:

- i) introduzir a problemática de interpretações teleológicas e hierárquicas em biologia evolutiva, utilizando a clássica figura “do humano ao macaco” (Figura 1);
- ii) disponibilizar o vídeo para um grupo de alunos(as), e o folder para outro grupo, para que possam refletir sobre a figura clássica supracitada;
- iii) separar a turma em grupos menores (duplas ou trios) para que respondam o questionário (Anexo 1) com auxílio das informações contidas no vídeo e no folder;
- iv) fazer a rotatividade de estudantes entre as duplas e trios para que conversem com outras pessoas sobre as conclusões que chegaram anteriormente, de forma a ampliar a reflexão e o confronto de ideias;
- v) abrir a discussão para toda a turma, permitir que os(as) estudantes exponham as ideias e, finalmente;
- iv) seguir para a intervenção direta do(a) professor(a) no sentido de apontar quais são as interpretações corretas do ponto de vista científico.

Análise da aplicação do material

A seguir, destacamos, analiticamente, o potencial de aprendizagem associado ao material didático apresentado. O material foi aplicado em um contexto alheio à sala de aula, e que pode servir como um indicativo das suas vantagens e limitações. Como ambos os materiais são digitais, nós divulgamos o mesmo utilizando *e-mails* e redes sociais, e analisamos as respostas obtidas de estudantes do Ensino Médio e do primeiro ano do curso de Ciências Biológicas.

O questionário (Anexo 1) foi aplicado utilizando a ferramenta de formulários do Google, e os(as) respondentes foram direcionados aleatoriamente para um dos seguintes três grupos: 1) grupo “Controle”, que respondeu ao questionário sem acesso aos materiais didáticos; 2) grupo “Folder”, que obteve acesso somente ao folder e foi, posteriormente, direcionado ao questionário; 3) grupo “Vídeo”, que obteve acesso unicamente ao vídeo e foi, posteriormente, direcionado ao questionário.

A figura 7 indica que, apesar de não contornar todos os problemas associados ao pensamento teleológico e hierárquico, a proporção de respostas corretas foi maior entre respondentes que obtiveram acesso aos materiais didáticos produzidos.

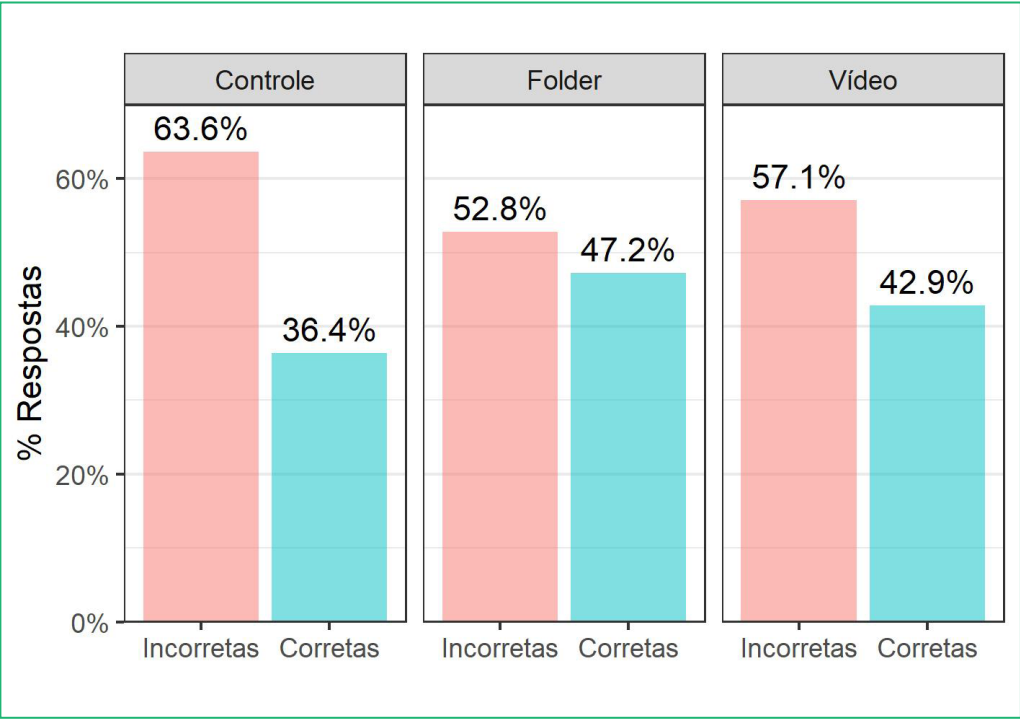
Ainda, a performance dos(as) estudantes no questionário variou entre as perguntas, como pode ser observado na figura 8. De forma geral, o material didático ajudou a solucionar problemas conceituais quando os(as) discentes foram confrontados com perguntas/conceitos que não envolviam humanos (perguntas 5 e 6, Anexo 1), e sim outros animais como exemplos de organismos mais ou menos evoluídos. Tal resultado indica a preva-

lência de uma carga cultural mais difícil de ser alterada quando o conceito de progresso e hierarquia está associado a características de seres humanos. O resultado está longe de ser surpreendente e fortalece a premissa de que os materiais didáticos devem ser utilizados sob a tutela de professores(as) dentro do contexto da sala de aula ou ensino à distância.

Ademais, tais avaliações meramente quantitativas e isoladas no tempo não podem ser interpretadas como definidoras da performance dos materiais didáticos aqui apresentados, pois logicamente o processo de ensino-aprendizagem é individualizado e associado ao tempo de trabalho dos conteúdos pelo(a) professor(a). Desta forma, sugerimos que, caso este resultado seja a tendência encontrada em sala de aula, ele servirá pronta-

mente para os(as) professores(as) discutirem o fato de que humanos não estão isolados como organismos especiais na história evolutiva, e que as interpretações biológicas dadas a outros organismos devem também espelhar nossa interpretação da história evolutiva humana.

Em particular, um resultado que merece destaque é a inversão na percentagem de respostas corretas à pergunta 1 (Anexo 1) no grupo que obteve acesso ao Folder em relação aos grupos controle e do vídeo. A pergunta trata diretamente dos tipos de características que estariam associadas a animais mais evoluídos, conceito altamente enraizado em culturas antropocêntricas, tornando este resultado particularmente promissor quanto ao uso dos materiais.



Respostas esperadas às perguntas do Anexo 1:

- 1) Nenhuma das opções acima;
- 2) Discordo;
- 3) Discordo;
- 4) Discordo;
- 5) Concordo;
- 6) Discordo

Figura 7. Proporção de respostas incorretas (barras vermelhas) e corretas (barras azuis) entre estudantes do Ensino Médio e estudantes do primeiro ano de Graduação em Ciências Biológicas que responderam ao questionário (Anexo 1) sem acesso a nenhum material didático (Controle, n = 22), com acesso ao folder (Folder, n = 36) e com acesso ao vídeo (Vídeo, n=14).



Figura 8. Proporção de respostas incorretas (barras vermelhas) e corretas (barras azuis) entre estudantes do Ensino Médio e estudantes do primeiro ano de Graduação em Ciências Biológicas para cada pergunta do questionário (Anexo 1). Os grupos foram divididos entre **A)** aqueles que não tiveram acesso a nenhum material didático (Controle, n = 22); **B)** aqueles que tiveram acesso ao folder (Folder, n = 36); e **C)** aqueles que tiveram acesso ao vídeo (Vídeo, n=14).

Considerações finais

A proposta apresentada objetiva auxiliar o percurso do(a) docente ao trabalhar com conceitos evolutivos e biológicos à medida que fornece suporte para a desconstrução de pensamentos e figuras de linguagem teleológicas e que envolvam hierarquia evolutiva. Os resultados aqui apresentados da aplicação dos dois materiais permite estabelecer as limitações dos mesmos quando apresentados sem intervenção do(a) docente e fora do contexto dialético da sala de aula. Dessa forma, o emprego dos mesmos de forma adaptada à realidade ao qual o(a) professor(a) e seus alunos(as) estiverem inseridos(as) possi-

velmente trará resultados de aprendizagem ainda melhores. Nesse sentido, tanto os materiais didáticos digitais aqui apresentados, quanto o uso de outras imagens, frases, questionamentos que guiem discussões, e formulários de avaliação de aprendizado, deverão integrar uma proposta didática adaptável à necessidade de cada sala de aula.

Referências

TWAIN, M. – Was the world made for man? In: TWAIN, M. *What Is Man? and Other Philosophical Writings*. Berkeley: University of California Press, 1973. p. 101–106.

WALLACE, A. R. *Man's Place in the Universe. A Study of the Results of Scientific Research in Relation to the Unity or Plurality of Worlds*. Londres: Chapman and Hall Limited, 1904.



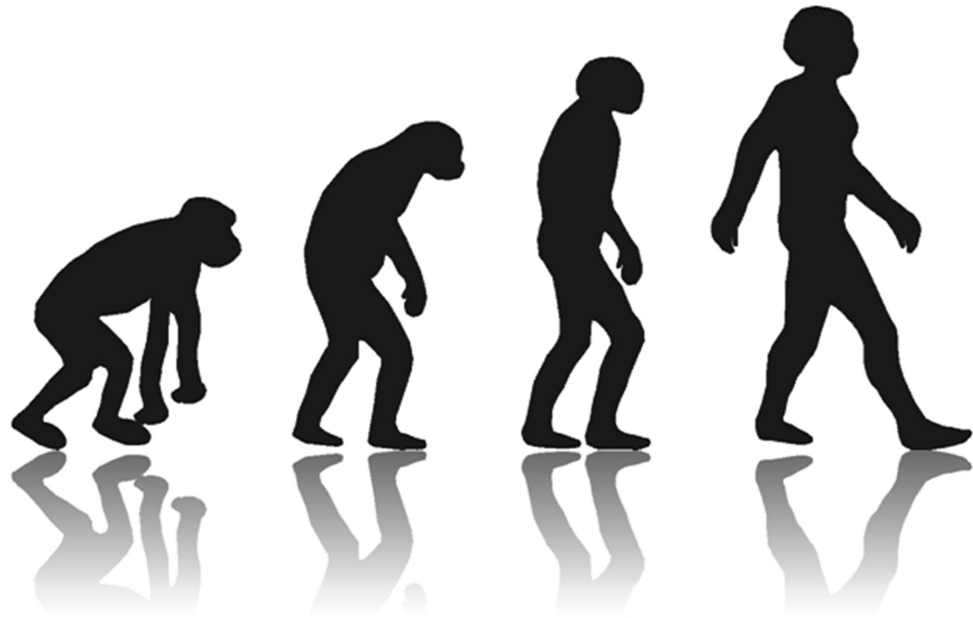
ANEXO 1

Questionário

1) Quais das características abaixo você acha que estão associadas a animais mais evoluídos?

- ☐ Complexidade do animal (número e especialização das células, tamanho do DNA).
- ☐ Características físicas (tamanho, força, força muscular, alta taxa e eficiência metabólica).
- ☐ Inteligência (comunicação elaborada, uso de ferramentas, memória, autoconsciência).
- ☐ Capacidade de se ajustar a diferentes situações (viver em diferentes ambientes, alimentar-se de coisas diferentes, respirar com ou sem oxigênio, reprodução com ou sem parceiros, resistir a longos períodos sem alimento/água).
- ☐ Todas, ou mais de uma opção acima. Muitas são as características que tornam os animais mais evoluídos.
- ☐ Nenhuma das opções acima. Não existem características que tornem os animais mais evoluídos que outros.

Esta imagem é muito usada para representar evolução. Com base nesta figura analise as afirmações a seguir (próximas duas questões 2 e 3).



2) A imagem representa de forma simplificada o rumo da evolução humana, desde primatas mais primitivos até chegar ao ser humano. O quanto você concorda com este conceito?

- ☐ Concordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Discordo

3) A imagem mostra a progressão evolutiva necessária para o ser humano adquirir bipedalismo (caminhar sobre duas pernas). O quanto você concorda com este conceito?

- ☐ Concordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Discordo

Com base na figura abaixo, analise as afirmações a seguir (próximas três questões):



4) A imagem representa, de forma simplificada, as etapas que foram necessárias para os animais progredirem do ambiente aquático para o terrestre. O quanto você concorda com esta afirmação?

- ☐ Concordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Discordo

5) A imagem apresenta diferentes animais com adaptações próprias para os ambientes que ocupam, não evidenciando qual é o mais evoluído. O quanto você concorda com este conceito?

- ☐ Concordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Discordo

6) A imagem mostra, da esquerda para a direita, animais cada vez melhores e mais complexos. O quanto você concorda com este conceito?

- ☐ Concordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Discordo

Ensino de Biologia: uma perspectiva evolutiva – a evolução como eixo integrador na educação básica

Leonardo Augusto Luvison Araújo

Pesquisador de Pós-Doutorado, Universidade de São Paulo, Faculdade de Educação, São Paulo, SP

Autor para correspondência - luvison@usp.br

Palavras-chave: ensino de evolução, biologia, educação básica, interdisciplinaridade, livro didático, biodiversidade

Uma das frases mais difundidas na Biologia é "Nada em biologia faz sentido exceto à luz da evolução", do geneticista Theodosius Dobzhansky, cunhada em um título de artigo no periódico *American Biology Teacher* (1973). Apesar desta reconhecida importância da evolução, quando olhamos para prática de ensino de biologia encontramos uma realidade muito distinta. Pesquisas feitas com professores, em livros didáticos e em currículos efetivamente adotados na educação básica verificaram que a utilização da evolução biológica como um eixo integrador ainda é incipiente. No Brasil, a evolução muitas vezes é tratada como apenas mais um conteúdo, usualmente presente apenas nos últimos capítulos dos livros didáticos destinados aos terceiros anos do ensino médio.

Esse cenário motivou a construção do livro *Ensino de Biologia: uma perspectiva evolutiva* (UFRGS/Diagrama Editorial, 2021). A obra, em dois volumes, foi planejada com o intuito de oferecer subsídios para que professores atuantes e em formação construam uma perspectiva evolutiva nos diferentes conteúdos abordados no ensino de biologia.

Para atingir esse objetivo, a obra conta com pesquisadores de diversas áreas da ciência, que foram desafiados a apresentar uma visão evolutiva da sua área disciplinar. Os autores também procuraram abordar de que forma o seu campo contribui para a teoria evolutiva e para o pensamento evolutivo de maneira mais geral.

O livro nasceu de um projeto de extensão chamado "Curso de Biologia Evolutiva na UFRGS", que busca oferecer formação continuada para biólogos e professores. As discussões empreendidas nos sete anos do curso foram essenciais para a concepção do livro e a formação de uma rede de pesquisadores que apresentam afinidades com o pensamento evolutivo, ainda que por vezes trabalhem em áreas distintas do conhecimento.

Dessa forma, pôde-se constituir parceria com 31 autores, gerando uma obra em dois volumes. O primeiro deles tem como enfoque discussões **interdisciplinares** na evolução (Figura 1). Disciplinas como bioquímica, citologia, imunologia, biologia do desenvolvimento, genética, ecologia e fisiologia humana estão contempladas no primeiro volume. Além disso, discussões mais amplas sobre evolução humana e aspectos históricos do pensamento evolutivo perpassam alguns capítulos.

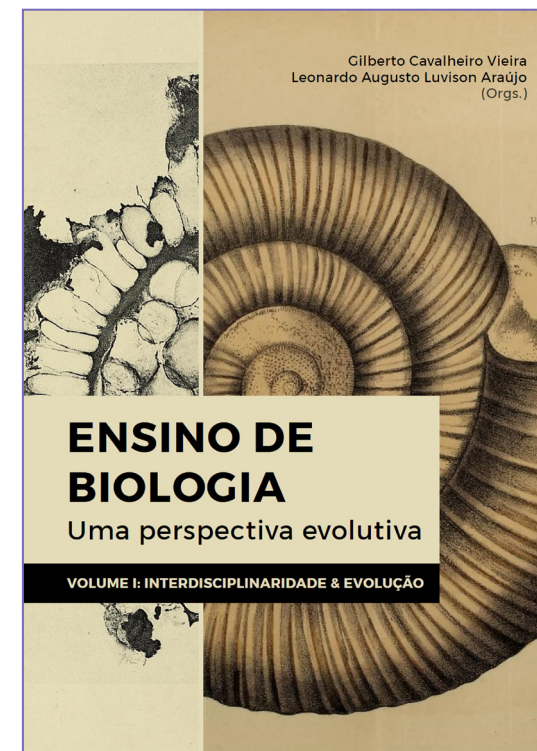


Figura 1.
Capa do volume I do livro
"Ensino de Biologia: uma
perspectiva evolutiva".

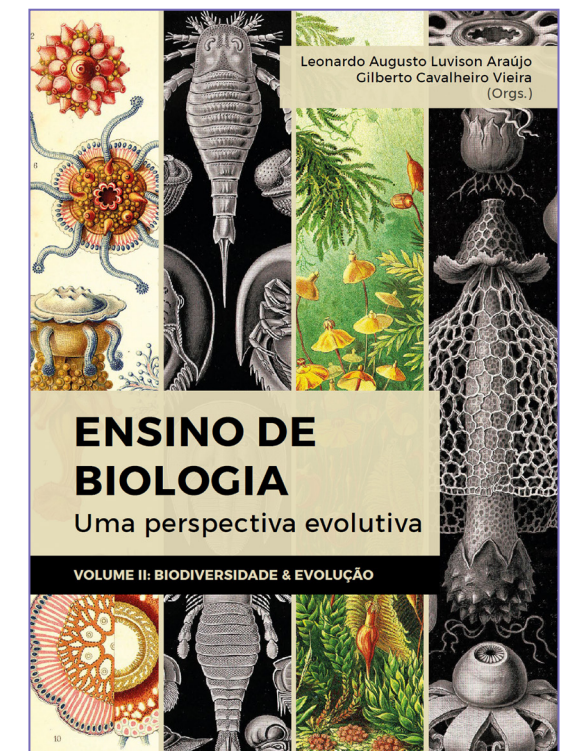


Figura 2.
Capa do volume II do livro
"Ensino de Biologia: uma
perspectiva evolutiva".

O segundo volume, intitulado **Biodiversidade e Evolução**, apresenta um panorama dos principais grupos de organismos em uma perspectiva filogenética (Figura 2). Afinal, a sistemática filogenética permite uma classificação natural dos seres vivos, baseada em suas relações de parentesco. A perspectiva evolutiva para a biodiversidade também perpassa distintas questões com importância no contexto pedagógico – desde representações sobre a história da vida no tempo profundo, passando por questões sobre conservação ambiental e contribui-

ções do conhecimento evolutivo para o entendimento de pandemias virais.

Obviamente, muito poderia ser discutido sobre evolução nas diferentes áreas do conhecimento. Os exemplos e enfoques adotados por cada capítulo não esgotam os inúmeros temas, mas apresentam temáticas evolutivas que podem inspirar o professor em sua prática diária. Os dois volumes do e-book estão disponíveis gratuitamente e podem ser acessados pelos professores e demais interessados em: <https://www.pensamentoevolutivo.com/publicacoes>.

Infinitas formas de grande beleza: como a evolução forjou a grande quantidade de criaturas que habitam nosso planeta

Nicolle Souza Leto¹, Janaina Lima de Oliveira²

¹ Graduanda em Ciências Biológicas, Universidade Federal da Bahia, Instituto de Biologia, Salvador, BA

² Laboratório de Biologia Evolutiva e do Desenvolvimento (LaBED), Universidade Federal da Bahia, Instituto de Biologia, Salvador, BA

Autor para correspondência - janaina.lima@ufba.br

Palavras-chave: evo devo, biologia evolutiva do desenvolvimento, evolução da forma animal

Em “*Infinitas Formas de Grande Beleza: Como a Evolução Forjou a Grande Quantidade de Criaturas que Habitam Nosso Planeta*” (Editora Zahar, 2006, 1. ed., 304 páginas), o professor e geneticista Sean B. Carroll é responsável por expor ao grande público um instigante e crescente (desde seu surgimento nos anos 1980) universo da Biologia – a Biologia Evolutiva do Desenvolvimento (Evo Devo). Investigando o processo evolutivo sob a ótica de alterações no desenvolvimento, a Evo Devo fornece uma sólida base para o estudo da evolução de toda a diversidade de criaturas que nos rodeiam.

O livro é dividido em duas partes: *A construção dos animais e Fósseis, genes e a formação da diversidade animal*. A primeira parte introduz, em cinco capítulos, os conceitos necessários para entender como a forma corporal animal é estabelecida, discutindo desde aspectos anatômicos até as implicações de alterações na regulação do desenvolvimento. Outra contribuição importante dessa parte da obra é a apresentação de aspectos metodológicos da prática científica nessa área de estudo, como a investigação de mutações e seus efeitos na forma através da alteração de vias desenvolvimentais, assim como em relação ao uso (ou não) de organismos-modelo.

A segunda parte discorre sobre o que talvez seja uma das maiores questões investigadas pela Evo Devo: a existência de variabilidade de formas é fundamental para o andamento da evolução morfológica, mas como ela surge, em primeiro lugar? Nos seis capítulos que compõem essa parte do livro, Carroll descreve de que forma grandes eventos evolutivos como diversificações da forma, adaptações de partes do corpo, concepção de padrões de coloração e até mesmo a evolução humana podem ter sido acarretados por alterações em vias de desenvolvimento e seus componentes. Ainda, o décimo primeiro e último capítulo do livro é

totalmente dedicado a situar a Evo Devo entre os outros campos da Biologia.

Carroll descreve os quatro tipos de leitores que tem em mente ao elaborar sua obra: (i) os curiosos pelo mundo animal que buscam fascinar-se, (ii) qualquer um que se pergunte sobre nossas origens, (iii) os cientistas de outras áreas que esperam novidades e (iv) os estudantes e professores para os quais ele espera trazer novos olhares sobre a evolução biológica. Ao longo do livro, o leitor é direcionado a refletir sobre a evolução de uma ampla gama de fenótipos que sempre estiveram ao alcance de nossos olhos, como os padrões de coloração animal, trazendo a uma realidade tangível elementos do estudo de evolução que parecem mais abstratos e distantes quando introduzidos dentro dos moldes mais formais da genética evolutiva. É por essa destreza que o autor consegue atingir seu objetivo de alcançar os mais diferentes públicos. Assim, a utilização desse livro em cursos de graduação em Ciências Biológicas pode constituir uma importante ferramenta para a formação desses profissionais em relação ao estudo do desenvolvimento e da evolução, que pode ser então difundido para além dos muros da universidade, em salas de aula de ensino médio e outros públicos não-especializados.