

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

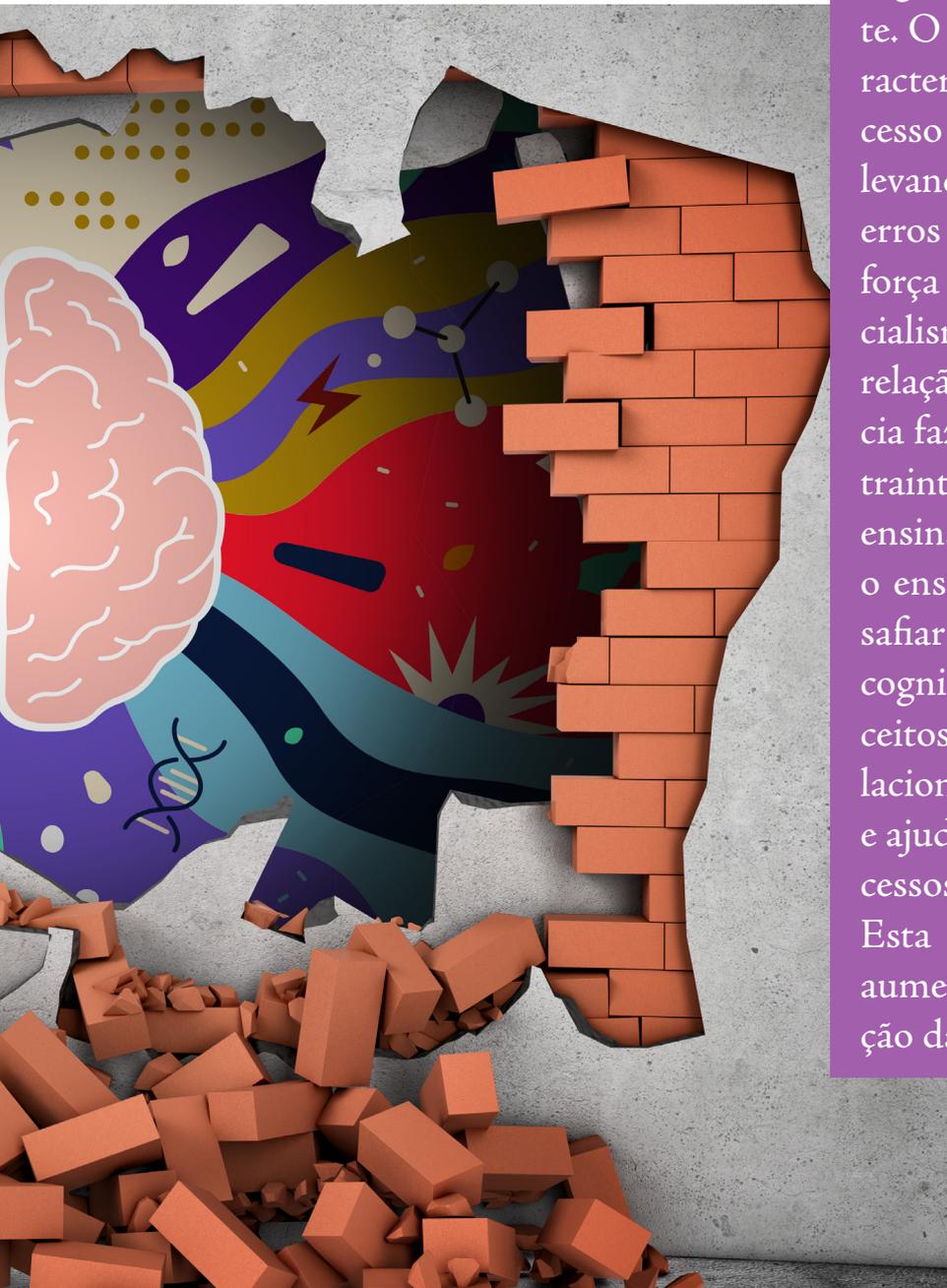
Leandro Rabello Monteiro

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

Autor para correspondência - lrmonf@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.

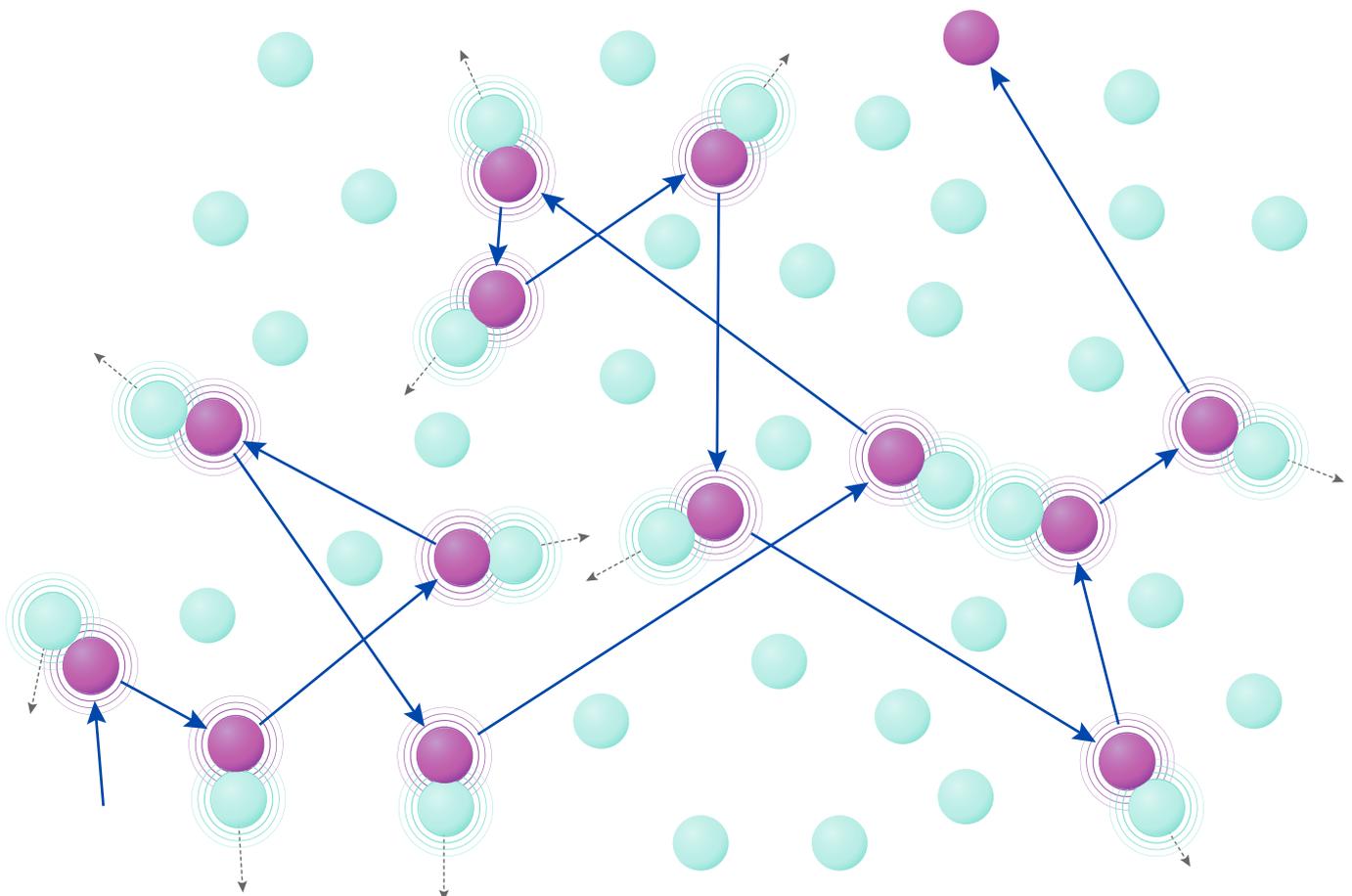


Evolução como processo emergente

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 impeditivas 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.

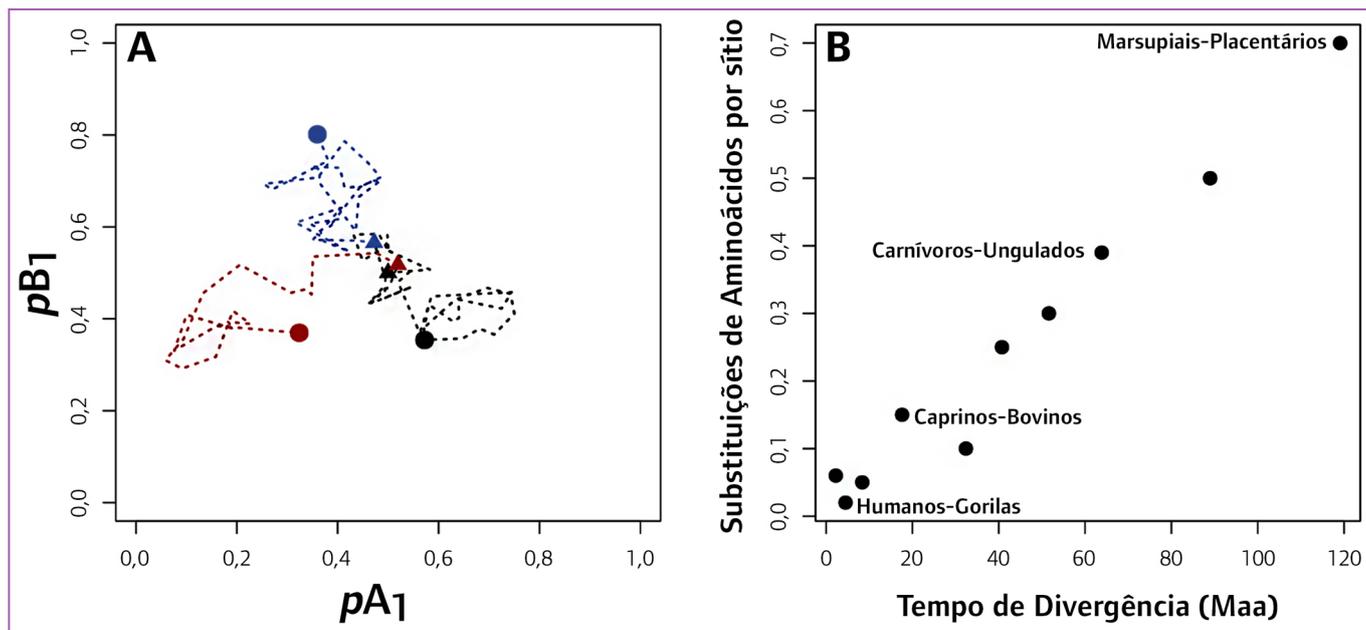


Figura 1.

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.

