

Humberto Martins de Souza

INVESTIGANDO O ALEATÓRIO:
evolução para além da seleção natural

Rio de Janeiro

2024

Humberto Martins de Souza

INVESTIGANDO O ALEATÓRIO:

evolução para além da seleção natural

Produto Educacional de Especialização apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Biologia, vinculado à Pró-Reitoria de Pós-Graduação, Pesquisa, Extensão e Cultura do Colégio Pedro II, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Ensino de Ciências e Biologia.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Violeta David Perini

Rio de Janeiro

2024

COLÉGIO PEDRO II
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA, EXTENSÃO E CULTURA
BIBLIOTECA PROFESSORA SILVIA BECHER
CATALOGAÇÃO NA FONTE

S729 Souza, Humberto Martins de
Investigando o aleatório : evolução para além da seleção natural /
Humberto Martins de Souza. – Rio de Janeiro, 2024.

46 f.

Produto Educacional de Especialização apresentado como
Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Ensino de
Ciências e Biologia) – Colégio Pedro II, Pró-Reitoria de Pós-
Graduação, Pesquisa, Extensão e Cultura.

Orientador: Violeta David Perini.

1. Biologia (Ensino médio) - Estudo e ensino. 2. Evolução
(Biologia). 3. Seleção natural – Biologia. 4. Jogos educativos. 5.
Estratégias pedagógicas. 6. Negacionismo. I. Perini, Violeta David.
II. Colégio Pedro II. III. Título.

CDD 570

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Simone Alves – CRB7 5692.

Humberto Martins de Souza

INVESTIGANDO O ALEATÓRIO:

evolução para além da seleção natural

Produto Educacional de Especialização apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Biologia, vinculado à Pró-Reitoria de Pós-Graduação, Pesquisa, Extensão e Cultura do Colégio Pedro II, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Ensino de Ciências e Biologia.

Aprovado em: 22 / 11 / 2024.

Banca Examinadora:

Profª. Dra. Violeta David Perini
Colégio Pedro II, Campus Humaitá II

Profª. Dra. Gabriela Dias Bevilacqua
Colégio Pedro II, Campus Centro

Prof. Dr. Vidal Assis Ferreira Filho
Colégio Pedro II, Campus Humaitá II

Rio de Janeiro

2024

AGRADECIMENTOS

A profissão do professor pode se tornar muito solitária. Mesmo imersos em um oceano de estudantes, muitas vezes temos nossos medos, inseguranças e defeitos postos à prova. Podemos enfrentar os desafios sozinhos ou podemos ter a sorte de encontrar companheiros de profissão que nos ajudam a crescer e evoluir, tornando nossa jornada mais agradável e pavimentando o caminho para que nossos objetivos se tornem concretos e nossos sonhos para uma sociedade justa e igualitária se tornem realidade.

Por isso, agradeço imensamente às amigadas que ganhei da escola em que trabalho, dos alunos da Especialização a qual este TCC faz parte e, especialmente, aos professores do Colégio Pedro II por, primeiramente terem participado da minha formação no ensino básico e, atualmente, terem me mostrado um novo caminho onde meu lado professor e meu lado pesquisador podem se tornar um só.

RESUMO

A Teoria da Evolução é a espinha dorsal das ciências biológicas. Porém, sua compreensão e aceitação enfrentam barreiras a níveis epistemológicos e culturais. Neste trabalho, discutimos brevemente essas barreiras, com ênfase nas dificuldades epistemológicas do conteúdo, mais especificamente na compreensão do papel da aleatoriedade na construção de padrões e de mudanças na biodiversidade. Apresentamos, ainda, um jogo didático desenvolvido para o terceiro ano do Ensino Médio com o propósito de ilustrar como forças evolutivas aleatórias, como a mutação e a deriva genética operam. O objetivo é contribuir para uma melhor compreensão da Teoria da Evolução e diminuir os impactos negativos que a compreensão equivocada de seus princípios podem ter na sua aceitação.

Palavras-chave: Ensino de Evolução; Mudança Conceitual; Jogo Didático.

ABSTRACT

The Theory of Evolution is the backbone of biological sciences. However, its comprehension and acceptance encounter several barriers on both cultural and epistemological levels. In this study, we briefly discuss these barriers, emphasizing the epistemological challenges of this subject matter, particularly regarding the role of stochasticity in generating patterns and driving changes in biodiversity. We also introduce a didactic game developed for the final year of high school, designed to illustrate how random evolutionary forces, such as mutation and genetic drift, operate. Our goal is to contribute to a deeper understanding of the Theory of Evolution and reduce the negative impacts that a misunderstanding of its principles may have on its acceptance.

Keywords: Evolution Teaching; Conceptual Change; Didactic game.

LISTA DE FIGURAS (ILUSTRAÇÕES)

Figura 1 - Cartela de anotação Modo 1 (com um descendente)	30
Figura 2 - Cartela de anotação Modo 2 (com 2 descendentes)	31
Figura 3 - Dados utilizados por alunos e professores e suas funções	32
Figura 4 - Simulação de uma partida no Modo 2 do jogo.	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BNCC – Base Nacional Curricular Comum

BSCS - *Biological Science Curriculum Studies*

DNA - Ácido Desoxirribonucleico

EM – Ensino Médio

PCN - Parâmetros Curriculares Nacionais

PNLD - Programa Nacional do Livro Didático

SN–Seleção Natural

TE – Teoria da Evolução

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO13

2 FUNDAMENTAÇÃO METODOLOGICA-TEÓRICA15

2.1 O Ensino de Evolução no Brasil15

2.1.2 Mudanças curriculares e a Base Nacional Comum Curricular15

2.1.4 A polêmica entre ensino de evolução e criacionismo16

2.1.5 Predominância da seleção natural no ensino de evolução16

2.2 Desafios para o Ensino de Evolução: Barreiras para a Aceitação da Teoria da Evolução17

2.2.1 Aceitação da Teoria da Evolução e religiosidade17

2.2.2 Aceitação dos aspectos epistemológicos da Teoria da Evolução18

2.2.3 Natureza da ciência19

2.3 Princípios da Teoria da Evolução para o Ensino de Evolução19

2.3.1 A seleção natural e o seu papel na Teoria da Evolução20

2.3.2 O papel das situações de incerteza na evolução.20

2.4. Concepções Alternativas no Ensino de Ciências21

2.4.1 Origens das concepções alternativas de processos não sequenciais22

2.4.2 Concepções alternativas e mudança conceitual23

2.4.3 Como resolver concepções alternativas no nível ontológico?24

2.5 O Papel do Aleatório na Evolução: Deriva Genética, Mutação, Migração, Permuta Genética e sua Interação com a Seleção Natural25

2.5.1 Deriva Genética: o acaso nas frequências genéticas25

2.5.2 Mutação: a geração de variabilidade genética26

2.5.3 Migração entre populações: o fluxo gênico e a diversidade27

2.5.4 Carona Genética: A posição relativa entre os genes importa27

2.5.5 O aleatório e concepções alternativas28

3. DESENVOLVIMENTO28

3.1 Jogo: Evolução Aleatória32

3.1.1 Público-alvo32

3.1.2 Organização prévia (pelo professor)32

3.1.3 Regras do jogo33

3.1.3.1 *Preparo da turma:*33

3.1.3.2 *Simulando o jogo*34

3.1.3.3 Simulando o jogo Simulação de uma partida no modo 236

3.1.4.1 A migração e o efeito fundador38

3.1.4.2 A evolução ocorre a nível de população39

3.1.4.3 Tudo está bem, até que não está mais40

3.1.4.4 O surgimento de uma estrutura complexa40

3.1.4.5 A migração pode restaurar uma população em risco41

3.1.4.6 Sua casa agora é minha! A competição pode eliminar a diversidade42

4 CONCLUSÃO43

REFERÊNCIAS44

1 INTRODUÇÃO

O ensino de evolução tem importância estratégica para a aprendizagem de biologia e para a formação geral de um cidadão. “Nada na biologia faz sentido, senão à luz da evolução” (Dobzhansky, 1973). A implicação básica dessa afirmação é que, para entender cientificamente o fenômeno da vida, é preciso entender que ela está sempre em processo de transformação, jamais estática. A noção dessa centralidade é fundamental para conectar os diferentes conteúdos trabalhados pelas disciplinas de ciências e biologia e fornecer as ferramentas de letramento científico necessárias para que o estudante possa participar de maneira informada em processos mais amplos de tomada de decisão e compreender questões contemporâneas relativas à saúde e meio ambiente (Pegoraro, 2016)

Apesar de sua importância, a Teoria da Evolução é um tema complexo, atravessado por problemas como a necessidade de um alto grau de abstração para a compreensão de seus conteúdos e conflitos socioculturais. De um lado, a Teoria da Evolução enfrenta resistência por grupos da sociedade devido a contradições entre suas implicações e algumas visões de mundo criacionistas (Barone; Petto; Campbell, 2014). Por outro, há a dificuldade de compreensão da evolução biológica, muitas vezes assimilada pelos estudantes dentro de um modelo ontológico incompatível com a realidade do processo evolutivo (Chi, 1992) e resultando em concepções alternativas sobre a Teoria da Evolução. Essas concepções alternativas podem contribuir para o aumento da resistência dos estudantes ao tema e, dentro de um contexto de crescente negacionismo da ciência, podem torná-los vulneráveis a discursos ligados a esses interesses (Smith, 2009)

São, portanto, essenciais pesquisas sobre o ensino de evolução para compreender as origens e os tipos de concepções alternativas e desenvolver estratégias de ensino que forneçam as ferramentas para que o estudante possa se posicionar com embasamento científico nos debates. Desse modo, independente da aceitação ou não-aceitação da evolução biológica, sua opinião será formulada a partir do que realmente a Teoria da Evolução diz sobre esse fenômeno, em oposição a posicionamentos contrários que se justificam em interpretações incorretas sobre o processo evolutivo.

Esse trabalho se insere nesse contexto, e busca desenvolver uma estratégia de ensino que promova, especificamente, uma melhor compreensão do papel da

aleatoriedade no processo de evolução das espécies e, de maneira geral, uma reflexão sobre a ontologia do processo.

2 FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA-TEÓRICA

2.1 O Ensino de Evolução no Brasil

O ensino da evolução nas escolas brasileiras tem sido marcado por desafios relacionados tanto à integração curricular quanto à resistência sociocultural. Desde sua primeira introdução nos currículos até a maneira como o conceito foi tratado nos livros didáticos, a evolução passou por diversas adaptações em seus conteúdos e abordagens temáticas (Soares, 2021).

A introdução da evolução nas escolas brasileiras se inicia em meados dos anos 1930, com foco em temas como a paleontologia, fósseis e a hereditariedade. Posteriormente, com a adaptação de projetos curriculares produzido pelo *Biological Science Curriculum Studies* (BSCS) dos Estados Unidos da América, se inserem, também, discursos que antagonizavam as teorias de Darwin e Lamarck sobre a evolução das espécies (Zamberlan; Silva, 2012) e que persistem até os dias de hoje.

2.1.2 Mudanças curriculares e a Base Nacional Comum Curricular

A implementação dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) em 1998 trouxe um novo foco para o ensino de ciências, enfatizando a importância de um currículo transversal onde a evolução fosse abordada como eixo unificador. Contudo, a partir de 2018, a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), emerge como o novo documento normatizador dos currículos nacionais e a evolução, apesar de citada, aparece com menos força do que nos PCNs (Soares, 2021)

2.1.3 Livros didáticos e o ensino de evolução

Os livros didáticos sempre desempenharam um papel central na educação. Apesar de algumas melhorias após a criação do Programa Nacional do Livro Didático (PNLD), a maioria das obras continua tratando a evolução como um conteúdo isolado. Estudos apontam que, na maior parte dos casos, os livros didáticos de Biologia abordam a evolução de forma desarticulada dos outros conteúdos da disciplina, geralmente no capítulo final e enfatizando uma suposta rivalidade entre as teorias de Darwin e Lamarck.

Essa abordagem contribui para uma visão equivocada acerca da natureza da ciência ao criar uma imagem individualista da ciência, na qual há perdedores e vencedores, ao invés de pensá-la como um esforço coletivo para tentar explicar os fenômenos naturais através de modelos. Além disso, ao isolar a evolução como um conteúdo, os livros caminham no sentido contrário ao entendimento da evolução como um paradigma dentro das ciências biológicas, um tema central que atravessa todas as suas áreas de conhecimento.

2.1.4 A polêmica entre ensino de evolução e criacionismo

Tanto o currículo quanto os livros didáticos são atravessados pelas tensões políticas presentes na sociedade. Desse modo, o crescimento da influência de grupos religiosos na política também moldou a forma como os conteúdos evolutivos têm se inserido no ensino de ciências e biologia. A tensão entre o ensino da evolução e o criacionismo ganhou força com o avanço do neoconservadorismo no Brasil, refletido em ações como o Projeto de Lei 867/2015, que promove o "Programa Escola Sem Partido". O crescimento da influência do criacionismo nas escolas, associado a novas alianças entre grupos religiosos, ameaça o ensino de ciências ao tentar inserir em seus conteúdos curriculares visões de mundo criacionistas e, em certos casos equiparando-as às explicações científicas sobre a origem e evolução da vida (Selles, 2016).

2.1.5 Predominância da seleção natural no ensino de evolução

Os conteúdos abordados historicamente no ensino de evolução estão centralizados na diferença entre as teorias de Darwin e Lamarck para o processo evolutivo. Para além dos problemas já discutidos, essa ênfase em coroar Darwin como o grande vencedor, associado com o pouco espaço que a teoria da evolução recebe, ofusca o papel das outras forças evolutivas que regulam o surgimento de novas características nas espécies. Essa redução pode contribuir para uma visão de que seleção natural e evolução são conceitos sinônimos, e não de que a seleção natural é uma dentre outras forças evolutivas. Além disso, o tratamento inadequado da seleção natural pode contribuir para um entendimento finalista da evolução, visto que sobra pouco espaço para a reflexão da aleatoriedade que rege o processo evolutivo.

2.2 Desafios para o Ensino de Evolução: Barreiras para a Aceitação da Teoria da Evolução

Em um levantamento sobre as pesquisas em Ensino de Evolução, Bizzo e Araújo (2021) assinalam a presença de três grandes desafios para a aceitação da Teoria da Evolução: compreensão sobre a natureza da ciência, compreensão dos conceitos de evolução e religiosidade. Esses três fatores se articulam de formas variadas, possuindo pesos diferentes em cada localidade. Nesta seção discutiremos separadamente as implicações que esses desafios impõem à compreensão da Teoria da evolução.

2.2.1 Aceitação da Teoria da Evolução e religiosidade

As conclusões às quais a Teoria da Evolução chega diferem radicalmente dos pressupostos criacionistas de várias religiões, assim como diferem de conclusões obtidas a partir de uma análise mais rápida e imediatista da realidade.

Pesquisas do campo apontam que há um sistema complexo de correlações entre crenças religiosas e aceitação e compreensão da Teoria da Evolução (Dunk, 2017). Essa correlação varia de acordo com aspectos culturais e socioeconômicos, mas, de forma geral, as cosmovisões criacionistas contribuem com uma resistência à aceitação da Teoria da Evolução. Contudo, não aceitar a teoria da evolução como válida não é o mesmo que não compreender seus princípios. Ou seja, é possível conhecer corretamente as leis e mecanismos que regem a modificação das espécies e rejeitar a validade da teoria por ela não coincidir com os pressupostos ontológicos da religião a qual o indivíduo pertence. Portanto, é importante diferenciar a influência de crenças religiosas nesses dois parâmetros: aceitação e compreensão da Teoria da Evolução (Barone; Petto; Campbell, 2014).

Essa distinção é importante pois deve-se ter cuidado para não tornar o ambiente do ensino de ciências em um campo de batalha entre visões de mundo. Esse cenário pode promover antipatia entre criacionistas e o conhecimento evolutivo, o que resultaria em seu afastamento das discussões sobre evolução e, conseqüentemente, impossibilitaria o aumento de sua compreensão sobre o tema.

Discussões sobre a relação entre ciência e religião tornam-se importante na adoção de estratégias e posicionamentos por parte dos professores quando essa relação emerge em sala de aula. Esses posicionamentos podem enfatizar diferenças, semelhanças,

conflitos ou convergências entre esses modos de pensar (Montalvão Neto e Fernandes, 2014; Sanches; Danilas, 2012).

2.2.2 Aceitação dos aspectos epistemológicos da Teoria da Evolução

Em termos epistemológicos, há uma discrepância entre o conhecimento construído pelo senso comum e o conhecimento científico, que muitas vezes desafia conclusões intuitivas e práticas que são muito úteis para a tomada de decisões corriqueiras no dia a dia. As concepções sobre os fenômenos naturais que os estudantes levam à escola baseadas na sua experiência cotidiana e que diferem das explicações científicas são chamadas de concepções alternativas. Os estudantes chegam à escola com várias concepções alternativas que foram se construídas através de experiências individuais e coletivas por mecanismos diferentes do científico. Algumas estratégias desenvolvidas para lidar com as concepções alternativas serão discutidas posteriormente no item 4.

Sobre a base epistemológica por trás da maioria das concepções construídas através do senso comum no cotidiano, Smith (2009) discute o papel de um sistema psicológico fortemente entranhado na história evolutiva humana que nos ajuda a tomar decisões e fornecer explicações satisfatórias na maioria das situações. Essas explicações consistem em três elementos fundamentais:

- Teleologia – Uma tendência a atribuir uma finalidade predestinada aos processos, sendo a existência de uma sequência de eventos justificada como etapas para a obtenção de um resultado final e necessário.
- Essencialismo – É a ideia de que as entidades observadas (espécies, moléculas, rochas) possuem uma essência intrínseca a elas, que conferem a elas a sua identidade observada.
- Intencionalidade – É a ideia de que os eventos são organizados por algum tipo de intencionalidade, como se os agentes em seu processo tivessem a intenção de chegar a um fim.

O conhecimento científico desafia visões de mundo centradas nesses elementos, pois propõe uma visão materialista, na qual os fenômenos naturais são produtos de interações randômicas e sem finalidade predeterminada. Ou seja, as concepções científicas e as concepções alternativas diferem em nível ontológico sobre um mesmo fenômeno e é, portanto, papel do ensino de ciências delimitar esses domínios ontológicos

para permitir que os estudantes transitem de maneira fluente entre explicações científicas e alternativas. Caso isso não ocorra, os estudantes podem se apropriar de forma incorreta dos conteúdos de evolução e chegarem a novas concepções alternativas mesmo através do ensino de ciências (Chi, 1997; Mortimer, 2000).

2.2.3 Natureza da ciência

Por fim, a capacidade de compreender o mundo por meio das explicações científicas sem recorrer aos três elementos abordados na sessão anterior também está relacionado com os níveis de desenvolvimento cognitivo. Etapas iniciais de desenvolvimento podem ser incoerentes com características da natureza da ciência, como a provisoriedade do conhecimento e o grau de incerteza inerentes às suas explicações (Smith, 2009).

Entender, por exemplo, que uma árvore filogenética é uma hipótese evolutiva (Platnick, 1977) baseada nas evidências atuais e que as relações de parentesco entre as espécies de um grupo podem mudar com a descoberta de novas evidências (envolve compreender a provisoriedade e a incerteza do conhecimento científico). Se os aspectos da natureza da ciência não forem bem discutidos, essa provisoriedade pode ser interpretada como uma falha do conhecimento científico, devido à expectativa equivocada de que a ciência produz verdades absolutas e imutáveis (Lima *et al.*, 2019).

Em síntese, para pensar em como promover um bom ensino de evolução, devemos considerar desafios que vão além de ensinar os conteúdos propriamente ditos desse campo do conhecimento. Devemos pensar em como dialogar com as diferenças religiosas e criar um ambiente propício a compreensão dos princípios evolutivos pelo ponto de vista científico, considerar as limitações oriundas das diferentes etapas de desenvolvimento cognitivo pelas quais os estudantes estão passando e investigar as concepções alternativas que eles trazem para a escola.

2.3 Princípios da Teoria da Evolução para o Ensino de Evolução

Nesta seção, discutiremos alguns dos princípios fundamentais da Teoria da Evolução.

2.3.1 A seleção natural e o seu papel na Teoria da Evolução

Os conceitos de Descendência com Modificações e de Seleção Natural são princípios básicos da Teoria Evolutiva proposta por Darwin e Wallace no século XIX. Desde então, outros fundamentos foram sendo articulados a esses dois, aumentando a robustez da Teoria Evolutiva e culminando na Síntese Evolutiva em meados do século XX, com a articulação da Teoria da Evolução com antigos e novos princípios, como as Leis de Mendel, a Deriva Genética, Equilíbrio de Hardy-Weiberg, e das descobertas da biologia molecular, como o papel do Ácido Desoxirribonucleico (DNA) na hereditariedade e o papel das mutações no surgimento de novas características.

A síntese foi necessária para a sobrevivência da Teoria da Evolução porque supriu as várias lacunas presentes e reconhecidas por Darwin e Wallace em sua tese. Compreender a evolução nos dias de hoje inclui conhecer tanto esses princípios fundamentais quanto os mais recentes.

Ohlsson e Bee (1992) definem cinco princípios da teoria da evolução darwinista a serem discutidos no Ensino de Evolução: Variação individual; Sobrevivência adaptativa; Fitness; Vantagem Reprodutiva e Hereditariedade. Além desses conceitos, devemos considerar, também, outros três aspectos incorporados pela Teoria Sintética da Evolução (Futuyma; Kirkpatrick, 2017), a saber: Deriva Genética; Mutação e Biologia Molecular.

Ainda que todos esses conceitos sejam importantes, o ensino de evolução tem priorizado de forma desproporcional o papel da Seleção Natural e negligenciado os outros conceitos e sua importância na transformação das espécies. As causas para o aumento da variação individual intraespecífica, como a mutação, segregação independente dos caracteres, permutação de genes e deriva genética recebem certa atenção ao longo dos conteúdos tradicionais da biologia. Contudo a aleatoriedade das mutações e das variações ambientais são pouco trabalhados e isso pode ser um fator determinante da compreensão equivocada da evolução como um processo teleológico e intencional (Chi; Slotta; Leeuw, 1994).

2.3.2 O papel das situações de incerteza na evolução.

O fenômeno evolutivo modifica, ao longo do tempo, o fenótipo e o genótipo dos seres vivos através da ação da seleção natural e de outras forças que agem de forma aleatória, que fornecem um alto grau de incerteza aos resultados dessas modificações. Forças como a Deriva Genética, a Mutação e a Migração entre populações podem moldar o fenótipo/genótipo de uma espécie de forma aleatória e independente da Seleção Natural. Inclusive, elas podem servir como hipótese nula para testar a ocorrência da Seleção Natural como o motor das modificações em determinada espécie (Futuyma; Kirkpatrick, 2017).

Os conteúdos de probabilidade e estatística são trabalhados tardiamente no ensino básico e a dificuldade de compreensão de seus conceitos podem ser uma barreira adicional à compreensão da evolução. Assim, surgem duas perguntas norteadoras desse trabalho:

- É possível ensinar o papel do acaso no processo de evolução das espécies no ensino básico?
- Como e quais conceitos de probabilidade e estatística podemos trabalhar nos níveis fundamental e médio dentro das disciplinas das Ciências Naturais?

2.4. Concepções Alternativas no Ensino de Ciências

As concepções alternativas podem ser compreendidas como um conjunto de conceitos e interpretações da realidade que os indivíduos possuem e que são diferentes das explicações dadas pelo ponto de vista das ciências. Ao passo que podem ser muito úteis para o dia a dia, elas podem nos levar a conclusões enganosas sobre os fenômenos naturais (Smith, 2009).

Como dito anteriormente, as concepções alternativas tendem a se basear em uma lógica teleológica, essencialista e finalista. Essa lógica pode ajudar-nos a entender de forma satisfatória o que acontece em eventos do cotidiano, como jogo de futebol ou uma fila de supermercado, processos nos quais os participantes desempenham papéis específicos para atingir uma finalidade. Já processos naturais, tais como a evolução, a difusão ou a troca de calor, pertencem a outro campo ontológico, no qual os agentes interagem de outra maneira e o resultado é mais produto de um equilíbrio dinâmico alcançado do que um resultado final, estático e pré-determinado.

Processos podem ser definidos, de forma genérica, como um conjunto de operações ou ações que levam a um fim observável. (Chi; Kristensen; Roscoe, 2012). Tais processos naturais podem ser classificados, segundo Chi (1992), em duas categorias, respectivamente: a dos processos sequenciais e a dos processos emergentes.

Chi, Kristensen e Roscoe (2012) elaboram algumas características específicas de dois tipos de processos distintos: os processos sequenciais e os processos emergentes. A disciplina de ciências possui conteúdos dentro desses dois tipos de processos. A Teoria da evolução, trocas de calor e difusão são conteúdos que abordam processos emergentes. Por outro lado, conteúdos como fisiologia, anatomia e classificação dos seres vivos podem ser interpretados dentro dos processos sequenciais.

A confusão feita entre esses dois tipos de processos pode levar a concepções alternativas que agem como barreiras à aquisição de novos conhecimentos científicos. Uma maneira de tentar enfrentar esse problema é através de estratégias de ensino de Mudança Conceitual (Nadelson, 2007). Estratégias de ensino envolvendo mudanças conceituais buscam fornecer ao estudante ferramentas para transitar entre suas concepções alternativas prévias para uma concepção científica dos fatos.

2.4.1 Origens das concepções alternativas de processos não sequenciais

Para o grupo de Chi, Kristensen e Roscoe (2012) os conteúdos referentes a processos emergentes são mal compreendidos por grande parte dos estudantes porque eles os interpretam como processos sequenciais. Isso ocorre porque esse tipo de processo é mais comum e é capaz de explicar a maior parte dos fenômenos de seu cotidiano.

Quando há esse tipo de confusão, aumentar o número de informações e conteúdos acessíveis para o aluno não é o suficiente para que ele desenvolva a capacidade de descrever corretamente o processo emergente, diferente do que ocorre com o aprendizado de processos sequenciais. Ou seja, no caso da evolução, a má compreensão do fenômeno vai além de simplesmente não compreender alguns conceitos.

Para Ferrari e Chi (1998) essa confusão de categoria é responsável pela interpretação da evolução como um processo no qual os agentes atuam com a intenção de produzir o padrão de mudança na forma da espécie e, ao atingir esse padrão, a evolução para de ocorrer.

2.4.2 Concepções alternativas e mudança conceitual

As concepções alternativas dos estudantes trazem dificuldades de aprendizagem de uma série de conteúdos científicos e precisam, portanto, serem superadas no processo de formação. Contudo modificar essas concepções pode ser bem complexo. Para além da utilidade prática das concepções alternativas há um fator cultural envolvido: os grupos sociais aos quais os estudantes pertencem também utilizam, reproduzem e ensinam concepções alternativas, fazendo com que essas concepções sejam importantes ferramentas de socialização para os estudantes.

Assim, o processo de mudança conceitual deve considerar a necessidade das concepções alternativas para o estudante e, simultaneamente, a necessidade de aprender os conceitos de forma científica. Chi (1997) define o processo de mudança conceitual como uma forma de ensinar aos alunos duas habilidades correlacionadas: a primeira, refere-se a utilizar modelos ontologicamente distintos (sequenciais e emergentes) para explicar o mesmo fenômeno; a segunda, refere-se à capacidade de avaliar qual o modelo mais apropriado para as diferentes interações sociais vividas pelo indivíduo.

Outra forma de compreender e resolver o problema é proposta pelo programa de pesquisa dos Perfis Conceituais (Mortimer, 2000). Nesse programa, devemos considerar que durante a história da Ciência os fenômenos também possuíam diferentes interpretações ontológicas e que, em cada período, essas interpretações tiveram sua validade e importância. Da mesma forma, os indivíduos possuem um perfil conceitual variado, no qual podem recorrer a diferentes interpretações para explicar um mesmo fenômeno dependendo do contexto social em que participam. Por essa perspectiva, o papel do professor e do ensino de ciências seria o de ensinar os perfis conceituais historicamente empregados pela ciência para compreender um determinado fenômeno (como a vida) e o de auxiliar o aluno a reconhecer o peso das diferentes ontologias no seu próprio perfil conceitual.

As duas abordagens possuem semelhanças e especificidades, mas esse trabalho busca pensar a problemática das concepções alternativas através das semelhanças enfatizadas aqui. Não objetivamos suplantarmos, invalidar ou substituir os conhecimentos prévios dos estudantes, e sim proporcionar a eles a possibilidade de conhecer de forma legítima e informada o que a ciência de fato diz sobre o fenômeno da Descendência com Modificação e suas implicações para a sociedade.

2.4.3 Como resolver concepções alternativas no nível ontológico?

Em pesquisa realizada por Chi, Kristensen e Roscoe (2012), evidenciou-se a necessidade de apresentar o conceito e as características de um processo emergente para que os estudantes pudessem identificá-los como tal e, então, realizassem uma mudança conceitual que corrigisse a interpretação da evolução oriunda dos modelos sequenciais prévios. Um dos exemplos envolve a comparação entre um jogo de beisebol e a difusão dos átomos.

O primeiro descreve um processo sequencial. Cada jogador é individualmente único e realiza uma função específica (nível micro) com o objetivo de ganhar o jogo para o seu time (nível macro). Há uma ordem que determina quando cada indivíduo deve entrar em ação e todos eles possuem um objetivo que é marcar um ponto para o seu time. Assim, todas as etapas culminam em um final definitivo que inclui a vitória de um time e a derrota do outro. Quando o jogo acaba os jogadores deixam suas posições e não exercem mais sua função, o processo está finalizado.

Já no caso da difusão, podemos observar um fenômeno de espalhamento de uma substância (nível macro) cujas moléculas estão se chocando aleatoriamente (nível micro). O movimento percebido não é nem intenção nem a finalidade das moléculas, é apenas o resultado dos choques aleatórios entre elas, o que faz com que algumas moléculas sejam empurradas para mais longe. Quando o espalhamento das moléculas atinge um equilíbrio a percepção do movimento direcional da substância se difundido acaba (nível macro está estático), mas as moléculas continuam se chocando e se movendo no nível micro. Ou seja, os agentes envolvidos no processo emergente continuam sua atividade, mesmo após o processo ter sido “finalizado”.

Tomar consciência desses dois tipos distintos de processos pode fornecer uma base para que o aluno possa classificar os processos que ele conhece dentro dessas duas categorias. Além disso, pode solucionar dificuldades de aprendizagem quando ele percebe que classificava um determinado fenômeno dentro de uma ontologia equivocada.

Para compreender o processo emergente, é importante que o aluno perceba que os agentes envolvidos se comportam de maneira aleatória, em oposição a uma maneira ordenada. O resultado percebido não é exatamente um resultado, mas sim um estado de equilíbrio dinâmico que pode ser modificado caso ocorram interferências externas.

2.5 O Papel do Aleatório na Evolução: Deriva Genética, Mutação, Migração, Permuta Genética e sua Interação com a Seleção Natural

De uma forma geral, o papel da Seleção Natural é bastante abordado e difundido no senso comum da sociedade sobre a Teoria da Evolução. Contudo, pensar a evolução exclusivamente do ponto de vista da Seleção Natural pode contribuir para uma compreensão enganosa do processo, uma vez que ela é uma força evolutiva direcional que favorece características benéficas para a sobrevivência e a reprodução.

Um entendimento mais abrangente da evolução exige uma consideração aprofundada dos mecanismos aleatórios que interagem com a Seleção Natural. A deriva genética, a mutação e a migração entre populações são processos estocásticos que desempenham papéis fundamentais na evolução, e a forma como esses mecanismos se entrelaçam com a seleção natural é crucial para uma compreensão completa da dinâmica evolutiva.

2.5.1 Deriva Genética: o acaso nas frequências genéticas

A Deriva Genética é um mecanismo evolutivo que resulta em mudanças aleatórias nas frequências genéticas dentro de uma população (Futuyma; Kirkpatrick, 2017). Ao contrário da Seleção Natural, que é um processo direcionado e adaptativo, a Deriva Genética é um fenômeno não direcionado, frequentemente causado por eventos imprevisíveis, que envolvem a flutuação dinâmica de fatores bióticos e abióticos.

A Deriva Genética ocorre mais intensamente em populações pequenas, onde as flutuações aleatórias têm um impacto muito significativo. Em uma população pequena, a frequência de alelos pode mudar de uma geração para outra devido a eventos aleatórios, como a morte de indivíduos ou a seleção aleatória de gametas durante a reprodução. Esses eventos podem levar a uma variação significativa nas frequências genéticas sem qualquer relação com a importância adaptativa dos alelos de uma determinada característica (Lenormand; Roze; Rousset, 2009).

Um exemplo é o efeito fundador. Nesse cenário, um pequeno grupo de indivíduos de uma população se estabelece em uma nova área, criando uma nova população. Devido ao tamanho reduzido, a nova população pode ter uma diversidade genética muito menor do que a população original, com uma composição genética distinta. Outro fenômeno relacionado é o gargalo populacional, que ocorre quando uma população é drasticamente

reduzida por eventos catastróficos, levando a uma perda de variabilidade genética e a uma população com características genéticas muito diferentes das da população original (Keller; Taylor, 2008).

A Deriva Genética pode ter um impacto profundo na evolução das populações, especialmente em contextos de tamanho reduzido. Ela pode levar à fixação de alelos neutros ou prejudiciais, simplesmente devido ao acaso. Em uma população pequena, a influência de eventos aleatórios pode ser tão significativa que pode alterar a composição genética de forma acentuada, mesmo na ausência de pressões seletivas.

Em populações grandes, a influência da Deriva Genética é reduzida, o que mantém uma alta diversidade de genótipos sobre os quais Seleção Natural tem oportunidade de atuar. A interação entre Deriva Genética e Seleção Natural cria um cenário evolutivo no qual a seleção de características vantajosas se articula com os processos históricos estocásticos que influenciam a composição genética das populações de maneira independente da Seleção Natural (Futuyma; Kirkpatrick, 2017).

2.5.2 Mutação: a geração de variabilidade genética

As mutações são alterações no material genético que introduzem novas variantes genéticas em uma população. Elas produzem a matéria prima para a seleção natural, a variabilidade genética (Futuyma; Kirkpatrick, 2017).

Elas ocorrem devido a erros durante a replicação do DNA ou podem ser induzidas por fatores ambientais, como radiação ou produtos químicos. Essas alterações podem variar de substituições de nucleotídeos a inserções ou deleções de sequências inteiras de DNA. Embora muitas mutações não tenham um impacto significativo, algumas podem ser muito altamente benéficas enquanto outras são letais (Futuyma; Kirkpatrick, 2017).

A taxa de mutação e o efeito das mutações na evolução são moldados pelo ambiente e pelas características da população. A interação entre mutação e Seleção Natural é dinâmica, com a Seleção Natural atuando sobre as variantes geradas por mutações e influenciando a frequência desses alelos na população. Da mesma forma que a Deriva Genética, essa força evolutiva produz genótipos de maneira independente da Seleção Natural (Lenormand; Roze; Rousset, 2009).

2.5.3 Migração entre populações: o fluxo gênico e a diversidade

A migração é o movimento de indivíduos e seus genes entre populações diferentes. Esse processo pode introduzir novas variantes genéticas em uma população e afetar a diversidade genética (Berthier *et al.*, 2006).

Quando indivíduos de uma população se movem para outra, eles levam consigo seus alelos, alterando a composição genética da população receptora. Esse fluxo gênico pode aumentar a variabilidade genética dentro da população receptora e reduzir a diferenciação genética entre populações diferentes. A migração pode ocorrer devido a fatores como mudanças ambientais, busca por recursos ou reprodução (Berthier *et al.*, 2006).

Essa força pode ter efeitos variados na evolução das populações. Em invasões ou colonização de novos ambientes, por exemplo, a população que se estabelece em um novo lugar vai obter mais ou menos sucesso de acordo com suas características genéticas. A diversidade genética dos colonizadores é apenas uma amostra de uma parte da população originária e, ao interagir com as novas condições ambientais, pode produzir uma população com proporções alélicas muito diferentes da população original (Berthier *et al.*, 2006).

2.5.4 Carona Genética: A posição relativa entre os genes importa

A carona genética é um fenômeno que ocorre quando uma mutação neutra ou deletéria está em um mesmo *locus* gênico que uma mutação altamente positiva. Desse modo, devido a sua posição e a despeito da pressão seletiva negativa sobre uma mutação deletéria, ela pode se fixar em uma população devido a uma mutação altamente benéfica presente neste *locus*. O contrário também é possível, no caso em que uma mutação altamente prejudicial está presente no mesmo *locus* que uma mutação vantajosa, a pressão negativa atuando sobre a mutação prejudicial pode eliminar junto com ela a mutação vantajosa (Stephan, 2010).

Quando a espécie se reproduz assexuadamente, esse efeito é bem forte, ao passo que, em espécies de reprodução sexuada esse efeito é diluído por conta da permuta genética que ocorre na meiose. Isso ocorre porque, ao realizar troca genética entre cromossomos homólogos, ela pode separar alelos prejudiciais e benéficos de maneira

aleatória. Contudo, ela também pode juntar em um mesmo *locus* mutações benéficas e deletérias, produzindo efeitos de carona inesperados (Masel, 2012).

2.5.5 O aleatório e concepções alternativas

Parte das concepções alternativas sobre evolução envolvem uma má compreensão da influência aleatória que essas forças têm na produção de fenótipos sobre os quais a seleção natural pode atuar de maneira direcionada.

Entender que as mutações ocorrem de maneira aleatória e independente do efeito que ela terá sobre a sobrevivência do indivíduo; entender que uma característica vantajosa que surgiu recentemente em uma mutação pode ser perdida, simplesmente porque um deslizamento de terra matou os poucos indivíduos que a possuíam; entender que o contato aleatório entre populações separadas pode alterar o fenótipo da população receptora de maneira independente das necessidades que ela possui: tudo isso pode causar uma mudança conceitual que se aproxime mais do processo evolutivo.

3. DESENVOLVIMENTO









Como forma de desenvolver o conceito de processos emergentes e estimular a compreensão da evolução como um processo sem finalidade, propomos um jogo de dados cujo objetivo é que os jogadores não possuam absolutamente nenhum controle sobre o resultado final. Este dependerá exclusivamente da interação entre diferentes fenômenos ao acaso.

No jogo, enfatizamos a relação entre Mutação e Seleção Natural na produção de sequências numéricas que representam indivíduos de uma espécie que se reproduz de forma assexuada e haploide. Dessa maneira, anulamos os efeitos de trocas genéticas entre indivíduos e das interações alélicas capazes de produzir fenótipos variados dependendo da composição alélica de um indivíduo.

Há dois modos de se jogar. O primeiro, mais simples, considera que cada indivíduo pode ter somente um descendente. O segundo modo considera a possibilidade de cada indivíduo ter dois descendentes, aprofundando a dinâmica de populações no jogo.

O jogo se baseia em uma cartela para anotação dos eventos para cada dupla (Figuras 1 e 2) e no uso de quatro diferentes dados (Figura 3). (ou formas digitais de sorteio de números). Cada dado representará um fenômeno específico: Mutações aleatórias nos descendentes dos indivíduos ou mudanças no ambiente que geram pressões seletivas.















Figura 1 - Cartela de anotação Modo 1 (com um descendente)

Modelo de ficha para o Modo 1		
F0	<u>1</u> - <u>1</u> - <u>1</u> - <u>1</u> - <u>1</u> - <u>1</u>	Nº da morte  <input type="text"/>
F1	__ - __ - __ - __ - __ - __	Nº da morte  <input type="text"/>
F2	__ - __ - __ - __ - __ - __	Nº da morte  <input type="text"/>
F3	__ - __ - __ - __ - __ - __	Nº da morte  <input type="text"/>
F4	__ - __ - __ - __ - __ - __	Nº da morte  <input type="text"/>
F5	__ - __ - __ - __ - __ - __	Nº da morte  <input type="text"/>
F6	__ - __ - __ - __ - __ - __	Nº da morte  <input type="text"/>
F7	__ - __ - __ - __ - __ - __	Nº da morte  <input type="text"/>

Fonte: o autor (2024).

Figura 2 - Cartela de anotação Modo 2 (com 2 descendentes)

Modelo de ficha para o Modo 2

F0	<u>1</u> - <u>1</u> - <u>1</u> - <u>1</u> - <u>1</u> - <u>1</u>		
F1	- - - - -	 	- - - - -
F2	- - - - -	 	- - - - -
F3	- - - - -	 	- - - - -
F4	- - - - -	 	- - - - -
F5	- - - - -	 	- - - - -
F6	- - - - -	 	- - - - -
F7	- - - - -	 	- - - - -

Fonte: o autor (2024).

Figura 3 - Dados utilizados por alunos e professores e suas funções



Fonte: o autor (2024).

3.1 Jogo: Evolução Aleatória

3.1.1 Público-alvo

Alunos do terceiro ano do ensino médio. A escolha por essa série se deve ao fato de eles já terem estudado na disciplina de matemática conteúdos referentes à estatística e à probabilidade. Contudo, o jogo pode ser trabalhado de maneira simplificada com alunos mais novos.

3.1.2 Organização prévia (pelo professor)

Antes da aula o professor deve imprimir:

- Duas cartelas para cada dupla de alunos (Fig. 1 e Fig. 2)
- Os quatro dados (Fig. 3).
- As regras do jogo para cada dupla de alunos.

3.1.3 Regras do jogo

3.1.3.1 Preparo da turma:

- Cada dupla de alunos receberá duas cartelas. Cada cartela representa um organismo e nela serão anotados os descendentes desse organismo e as mutações que irão (ou não) ocorrer.
- O professor jogará com o “dado da morte” de 6 lados (D6) e um dado de 4 lados (D4).
- Os alunos jogarão com o “dado da mutação” de 6 lados (D6) e um dado de 4 lados (D4).
- Cada organismo tem seu genoma representado por uma sequência de 6 números. Inicialmente todos os organismos, por serem clones, têm a sequência genética 1-1-1-1-1-1, já representada em cada cartela
- O jogo se organiza em rodadas. Cada rodada representa um fenômeno de reprodução dos organismos. **No modo 1**, cada organismo só pode deixar um descendente. **No Modo 2**, cada organismo pode deixar até dois descendentes, mas a população total de cada dupla pode ter no máximo quatro indivíduos vivos.
- A cada rodada, professor e alunos jogam, nessa ordem.
- A cada rodada, na jogada do professor, será definido o número da morte. Esse número representa a característica que está sendo negativamente selecionada pelo meio e determinará a morte do organismo que tiver aquele número em seu genoma.
- A cada rodada, na jogada dos alunos, os organismos poderão sofrer mutações que alterem seu genoma.
- O objetivo do jogo é sobreviver até a 7ª geração¹ ou ser a última dupla a ter seus indivíduos extintos.

¹ A estrutura do jogo contém a possibilidade de ele durar um número muito superior de rodadas. Contudo, optamos neste trabalho por estabelecer um limite de rodadas, entendendo que ele não deve ser muito longo, pelo menos inicialmente, sob o risco de os alunos perderem o interesse nele e o acharem cansativo. Porém, dependendo do comprometimento e da concentração dos estudantes, assim como de seu grau de compreensão da atividade, há a possibilidade de o professor expandir o número máximo de rodadas, ou até mesmo não colocar nenhum limite e deixar o jogo fluir até que somente um grupo sobreviva.

3.1.3.2 Simulando o jogo

- **Enredo do jogo:** Uma pequena população de bactérias geneticamente iguais colonizou um novo ambiente, uma pequena rocha na beira do mar. Você e sua dupla acompanharão duas bactérias e seus descendentes na luta pela sobrevivência nesse novo ambiente.
- **Rodada 1**
 - **Jogada do Professor:** O professor joga o dado da morte (D6) e define o número da característica negativamente selecionada.
 - Se o número sorteado for 1: todos os indivíduos morrem e o jogo recomeça.
 - Se o número for diferente de 1: alunos jogam.
 - **Jogada dos Alunos**
 1. Após o professor definir o número da morte, os alunos representam os filhos dos organismos sobreviventes na linha F1, representando a sequência genética de cada descendente.
 - 1.1. No modo 1, cada indivíduo produz apenas um descendente.
 - 1.2 No modo 2 cada indivíduo pode produzir dois descendentes, segundo os seguintes critérios:
 - Se o número da morte for par, o indivíduo que tiver um número par (diferente do número da morte) na sequência, terá apenas um descendente. Caso só possua números ímpares, ele terá dois descendentes.
 - Se o número da morte for ímpar, o indivíduo que tiver um número ímpar (diferente do número da morte) na sequência, terá apenas um descendente. Caso só possua números pares, ele terá dois descendentes.
 2. Para cada novo organismo da F1, os alunos jogam o D4 uma vez:
 - Resultado 1, 2 ou 3 (mudança): os alunos jogam o dado da mutação (D6) duas vezes:
 - A primeira jogada determina a posição da sequência genética que sofrerá a mutação.

- A segunda jogada determina o novo número que substituirá o número que ocupava aquela posição.
- Resultado 4 (sem mudança): a sequência se mantém.

3. Verificação de Morte:

- Após a mutação, os alunos devem verificar se a nova sequência de cada organismo contém o número da morte selecionado pelo professor. O organismo que tiver recebido o número da morte em sua sequência, morre.

• Rodadas 2 em diante

○ Jogada Do Professor

1. O professor joga o D4. – Mudança ou manutenção da pressão seletiva
 - Resultado 1, 2 ou 3 (mudança): O professor joga o dado da morte (D6) para determinar um novo número da morte.
 - Resultado 4 (ausência de mudança): O número da morte previamente sorteado pelo professor permanece o mesmo. Não há mudança de pressão seletiva.

○ Jogada dos Alunos

1. Os alunos repetem as ações da rodada anterior:
 - Jogam o D4 para determinar se haverá mutação.
 - Se houver mutação, jogam o D6 duas vezes para determinar a nova sequência.
2. Verificação de Morte:
 - Após a mutação, verifique novamente se a nova sequência de cada indivíduo contém o número selecionado pelo professor. Se sim, o indivíduo morre.

• Fim do Jogo

O jogo termina quando apenas 1 dupla de alunos possui espécies que ainda não foram extintas, ou quando todas as espécies foram extintas.

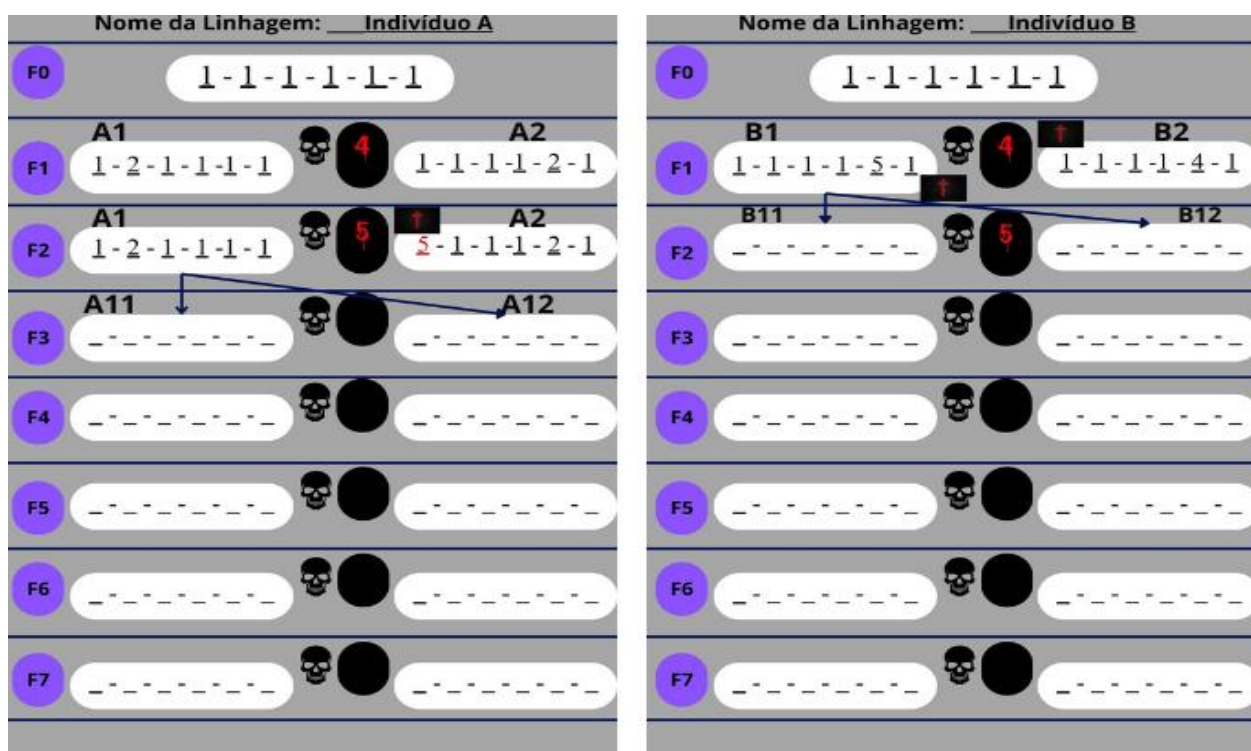
Para alunos de séries anteriores ao 3º ano do Ensino Médio, o número de rodadas e critérios pode ser mínimo para fazê-los entender o conceito de aleatoriedade no surgimento de novas características e da influência do meio sobre os indivíduos.

Já para a terceira série podem ser acrescentadas outras mecânicas, como a geração de dois descendentes por geração, a migração, uma sequência especial que garante a vitória no jogo. Esses mecanismos serão discutidos mais profundamente nas sugestões de uso do jogo em sala de aula.

3.1.3.3 Simulando o jogo Simulação de uma partida no modo 2

Cada indivíduo pode produzir até dois descendentes (Figura 4).

Figura 4 - Simulação de uma partida no Modo 2 do jogo



Fonte: o autor (2024)

A figura acima representa uma simulação de uma partida com apenas uma dupla, que durou apenas 2 rodadas.

- 1º Rodada:
 - Os alunos nomeiam seus indivíduos

- O professor sorteia o número da morte no D6 e o resultado foi 4.
 - Os alunos jogam o D4 e ninguém tira 4, ou seja, todos sofrerão mutação.
 - Para o indivíduo A1, o dado sorteou duas vezes o número 2. O primeiro sorteio indicou a posição da mutação (o segundo número da sequência) e o segundo sorteio indicou qual número substituiria o antigo.
 - Para o indivíduo A2, os dados sortearam primeiro o número 5 (posição) e depois o número 2 (novo número).
 - Para o indivíduo B1, os dados sortearam primeiro o número 4 (posição) e depois o número 5 (novo número).
 - Para o indivíduo B2, os dados sortearam primeiro o número 1 (posição) e depois o número 4 (novo número). Com o resultado desse sorteio, o filho B2 morreu, devido à sua mutação ser o número da morte (4).
- 2ª Rodada:
 - O professor joga o dado D4, que indicou mudança no número da morte e necessidade de jogar o D6. O novo número da morte selecionado foi o número 5.
 - Com isso, o indivíduo **B1 morreu antes de poder se reproduzir.**
 - O indivíduo A11 sorteou estabilidade no D4 e não sofreu mutação.
 - O indivíduo A21 sorteou mutação, e recebeu um número 5 na posição 4, por isso morreu.
 - Como um descendente da linhagem de A sobreviveu e todos os descendentes de B morreram, o jogador do indivíduo A ganhou (por enquanto).

- 3ª Rodada em diante:

Caso houvesse mais duplas jogando, o jogo continuaria. Nesse cenário, a dupla em questão teria apenas um organismo vivo que poderia se reproduzir duas vezes. Um indivíduo ocuparia a posição da esquerda e o segundo ocuparia o lugar vago da linhagem A2. O uso do código A11 e A12, assim como as setas, nos ajudam a traçar a ancestralidade daquele indivíduo.

Posteriormente, em uma quarta rodada, os descendentes A11 e A12, caso sobrevivessem à seleção, poderiam ocupar os nichos vagos da linhagem B1 e B2, restabelecendo o número populacional máximo de indivíduos por dupla (quatro indivíduos).

3.1.4 Sugestão de uso do jogo Evolução Aleatória

Nesta seção, discutiremos alguns cenários possíveis ao longo dos dois modos do jogo. Alguns desses cenários foram observados em partidas experimentais realizadas com grupos de amigos, outros cenários são hipotéticos, porém possíveis de ocorrer em uma partida. A partir da análise desses cenários, podemos discutir sobre alguns conceitos pertinentes sobre a evolução.

3.1.4.1 A migração e o efeito fundador

O cenário proposto apresenta duas premissas contraditórias: Todos os indivíduos provenientes de uma onda de migração possuem exatamente a mesma sequência genômica. Contudo, o sorteio com o D4 indica que a probabilidade de haver mutação a cada evento reprodutivo é, aproximadamente, 3 vezes maior do que de não haver mutação, o que faz emergir a seguinte pergunta: **Por que os indivíduos que colonizaram a sala de aula são todos geneticamente iguais?**

Para responder a essa pergunta, os alunos devem imaginar cenários plausíveis para a ocorrência dessa contradição.

Por um lado, podemos considerar que no local de origem dessas bactérias há uma forte pressão seletiva que elimina da população qualquer mutação que mude a sequência numérica. Nesse cenário, podemos refletir sobre o impacto que a migração teria no tamanho populacional da espécie e na diversidade da espécie, uma vez que o lugar colonizado permite um aumento tanto na diversidade de formas quanto no tamanho da população.

Um outro cenário possível é de que a taxa de mutação dessa espécie é baixa, porém, no lugar colonizado há algum fator ambiental que intensifica a taxa de mutações. Nesse cenário, a característica homogênea das sequências das colonizadoras pode se dever a uma maior frequência dessa sequência na população original ou uma concentração desse padrão em uma região geográfica que sofreu um evento de separação da população original. Ao colonizar um novo local, os efeitos também são o de aumentar a biodiversidade, mas não podemos afirmar muita coisa sobre o aumento no tamanho populacional.

Por fim, há os cenários em que o dado da morte sorteia o número 1. Dada a pouca diversidade genética do grupo colonizador, sua vulnerabilidade para uma extinção total é muito grande.

Quando isso ocorre na primeira rodada, podemos refletir sobre eventos de migração que levam a lugares inóspitos e que imediatamente matam os indivíduos colonizadores, como seria no caso de sementes de plantas de níveis sucessionais tardios que são transportadas para uma ilha recém destruída por uma erupção vulcânica.

Quando isso ocorre nas rodadas subsequentes à primeira, podemos discutir a incerteza sobre a permanência das condições. Um evento de migração pode parecer vantajoso em um primeiro momento, mas o “jogo pode virar” a qualquer momento.

3.1.4.2 A evolução ocorre a nível de população

Com o objetivo de tornar o jogo mais atrativo, estabelecemos inicialmente com os alunos um critério de vitória individual, o qual depende da sobrevivência de uma das duas linhagens de bactérias que a dupla recebeu.

Porém, após o fim do jogo, o professor deve fazer um levantamento de quantas duplas sobreviveram e expor e uma tabela no quadro. Então pode iniciar a discussão da sobrevivência da espécie. Tendo em vista que são todos indivíduos da mesma espécie, temos que considerá-los como descendentes de um ancestral comum. Dessa maneira, mesmo que apenas um grupo tenha sobrevivido na 7ª rodada, a espécie como um todo conseguiu se manter viva até aquele momento.

No modo 2 do jogo, esse fator se torna mais evidente. Como cada dupla possui dois indivíduos e cada um desses indivíduos pode ter até dois descendentes, com um limite de quatro indivíduos por geração, a chance de ocorrer um evento de extinção total diminui. O que pode ser analisado aqui são os momentos em que quase ocorre a extinção. Se em uma geração três dos quatro indivíduos morrerem, a espécie está próxima da extinção. Porém, se os dados estiverem a seu favor, em duas gerações o estudante pode restabelecer o número máximo da população.

Nesse modelo, através do uso de setas que conectam os descendentes com os ancestrais, podemos analisar alguns padrões genômicos que são construídos ao longo das gerações. O único sobrevivente que vai restabelecer o número populacional máximo transmitirá suas mutações acumuladas e elas serão um padrão de semelhança entre seus

descendentes. Esse cenário pode exemplificar o caso de características que estão presentes em espécies, mas que não estão ali por conta da seleção natural e sim por conta da deriva genética.

Por fim, o modo 2 pode ser usado para construir um gráfico da flutuação da população ao longo do tempo. A realização de duas ou mais rodadas pode construir um material para a comparação entre os gráficos de diferentes simulações. Através deles, é possível comparar qual simulação produziu o evento mais bem-sucedido de colonização, aquele que produziu o maior número de descendentes vivos até a rodada final e/ou a maior biodiversidade.

3.1.4.3 Tudo está bem, até que não está mais

Em ambos os modos é possível analisar as situações em que um indivíduo estava apto para se reproduzir, porém, na rodada seguinte, antes de sua efetiva reprodução, o número da morte mudou para um número de sua sequência e o indivíduo morreu antes mesmo de se reproduzir. Isso pode ilustrar cenários em que uma característica, inicialmente vantajosa, se torna desvantajosa.

Especificamente no modo 2 essa situação pode ser ampliada para o nível populacional. Nesse caso, algumas duplas terão os 4 indivíduos vivos, mas podem perdê-los todos simultaneamente em uma rodada e sair do jogo. No caminho contrário, alguém que estava perdendo pode se recuperar e tornar-se o novo padrão da espécie.

3.1.4.4 O surgimento de uma estrutura complexa

Um argumento antievolucionista gira em torno da ideia da baixa probabilidade de estruturas complexas como o olho humano surgirem de maneira aleatória. Uma forma de ilustrar como estruturas complexas podem surgir como resultado do acúmulo de mutações ao longo do tempo é estabelecer uma **sequência de ouro**. Essa seria uma sequência aleatória de dois ou mais determinada antes de o jogo começar por exemplo “2, 5”, ou “2,5,6”.

Essa sequência pode ocorrer em qualquer posição do genoma do indivíduo, mas precisa necessariamente estar nessa ordem. Quando um indivíduo adquire essa

combinação, ele ganha uma vantagem em relação aos outros: passa a poder ter 3 descendentes.

Como maneira de travar essa sequência, ela passa a se tornar vital para a sobrevivência dos descendentes, ou seja, quem deles sofrer uma mutação que altere a sequência de ouro morre automaticamente.

Adicionando essa regra, podemos observar quais novos padrões podem surgir em função dessa nova característica que passa a ser conservada. Dependendo do tempo disponível do professor, ele também pode estabelecer uma sequência de três números, ao invés de dois.

3.1.4.5 A migração pode restaurar uma população em risco

Uma regra adicional pode ser estabelecida: quando uma dupla atingir o número máximo de indivíduos, os descendentes “excedentes” podem migrar e ocupar espaços vagos em outras duplas. Isso já ocorre quando uma das linhagens da dupla é extinta, como foi exemplificado na simulação acima, mas pode ser expandido para a turma toda.

Dessa maneira, caso uma dupla perca todos os seus indivíduos, há uma chance de ela retornar ao jogo, caso um evento de migração leve um indivíduo de outra para sua ficha. Para regular a migração de maneira aleatória, pode-se usar um D20 e atribuir um número a cada dupla da sala.

O uso do D20 produzirá três situações distintas:

1) o D20 sorteou um número de uma dupla com quatro indivíduos. Nesse caso, o nicho está ocupado e o descendente migrante morrerá.

2) O D20 sorteou um número de uma dupla com espaço, um nicho vago. O descendente irá prosperar em um novo habitat.

3) O D20 sorteou um número que não faz referência a nenhuma dupla. O descendente migrou para um local desconhecido e, dentro do nosso campo de conhecimento, não sabemos qual foi o seu destino.

Com esses três cenários, podemos discutir os riscos e incertezas presentes em eventos de migração. Não há garantia que, ao migrar, os indivíduos encontrarão os locais adequados para sua sobrevivência.

Essa regra, além de aumentar a complexidade, possui outra desvantagem. Ela torna o jogo mais longo. Como forma de limitar a extensão da partida, pode-se estabelecer

algumas metas, como por exemplo, a primeira dupla que tiver um número pré-determinado de descendentes vivos simultaneamente em uma geração em qualquer lugar da sala (oito indivíduos, por exemplo) ganha e o jogo se encerra.

3.1.4.6 Sua casa agora é minha! A competição pode eliminar a diversidade

Em um nível maior de complexidade, podemos combinar as regras quatro e cinco. Nesse modelo, se um indivíduo com a sequência de ouro migrar para um local totalmente ocupado, ele, por possuir a sequência, elimina os indivíduos pré-existentes e se estabelece no nicho. Seus descendentes possuem a mesma vantagem.

Nesse cenário, adicionamos a competição como um motor da evolução. Ao adquirir uma vantagem competitiva, uma linhagem tem o potencial de destruir as outras e se estabelecer como o novo padrão. Esse modo de jogo tem a potencialidade de continuar por muitas rodadas, mas ele possui um final definitivo, no qual uma linhagem consegue se sobrepôr a todas as outras.

4 CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho, discutimos algumas problemáticas em torno da aceitação e da compreensão da Teoria da Evolução (TE) por parte da sociedade e suas implicações para o ensino de ciências. Apesar de essa questão ser atravessada por inúmeros fatores, optamos por focar apenas na dimensão pertinente aos conhecimentos necessários para uma boa compreensão do processo de modificação das espécies.

Identificamos que uma das dificuldades de se compreender corretamente a TE se deve ao fato de os alunos a considerarem como um processo sequencial, ontologicamente distinto do que de fato é, um processo emergente. Neste tipo de processo, os agentes participantes não possuem o objetivo de atingir o que observamos como um resultado final. Eles apenas interagem entre si, de maneira estocástica e o resultado observado é apenas um equilíbrio dinâmico que emerge dessas interações. Contudo, após atingirem o que concebemos como um resultado, os agentes continuam interagindo e, qualquer modificação em suas interações pode produzir um novo estado de equilíbrio.

Para compreender essas interações, é preciso possuir um certo domínio do conceito de aleatoriedade e de como ela funciona na criação de padrões observáveis. Para isso, propusemos um jogo cuja mecânica de funcionamento consiste exclusivamente na observação de padrões de transformações em uma sequência numérica gerados por sorteios aleatórios ao longo do tempo. O jogo foi desenvolvido como uma atividade de dados e papel, porém o professor também pode empregar aplicativos digitais se assim desejar

A mecânica desenvolvida pode articular diversos níveis de complexidade de maneira independente, ajudando o professor a trabalhar outros conceitos importantes para a evolução, tendo como base o princípio das transformações aleatórias. Combinar os níveis de complexidade vai depender do contexto de cada turma e cabe ao professor optar pela melhor combinação.

Analisar essas transformações e os efeitos que as diferentes combinações de efeitos aleatórios produzem no número total de sequências “sobreviventes” ao longo de várias “gerações” dentro de uma narrativa bem desenhada pelo professor, pode ajudar os alunos a materializarem conceitos estatísticos altamente abstratos em uma folha de papel e servir de base para analogias que ilustram o processo de evolução como algo permanente e inerente à vida.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Argus V. de; FALCÃO, Jorge T. da R.. As teorias de Lamarck e Darwin nos livros didáticos de Biologia no Brasil. **Ciência & Educação (Bauri)**, [S.L.], v. 16, n. 3, p. 649-665, 2010. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-73132010000300010>.
- BARONE, Lindsay M.; PETTO, Andrew J.; CAMPBELL, Benjamin C.. Predictors of evolution acceptance in a museum population. **Evolution: Education and Outreach**, [S.L.], v. 7, n. 1, 9 out. 2014. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s12052-014-0023-2>.
- BERTHIER, K.; CHARBONNEL, N.; GALAN, M.; CHAVAL, Y.; COSSON, J.-F.. Migration and recovery of the genetic diversity during the increasing density phase in cyclic vole populations. **Molecular Ecology**, [S.L.], v. 15, n. 9, p. 2665-2676, 20 jun. 2006. Wiley. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-294x.2006.02959.x>.
- BIZZO, Nelio; ARAÚJO, Leonardo Augusto L.. Ensino de Evolução. **Genética na Escola**, [S.L.], v. 16, n. 2, p. 440-449, 14 dez. 2021. Sociedade Brasileira de Genética. DOI: <http://dx.doi.org/10.55838/1980-3540.ge.2021.401>.
- CHI, Michele T. H.. Conceptual change within and across ontological categories: examples from learning and discovery in science. In: GIÈRE, Ronald N. (ed.). **Cognitive Models of Science: Minnesota studies in the philosophy of science**. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1992. p. 129-186.
- CHI, Michelene T.H.; SLOTTA, James D.; LEEUW, Nicholas de. From things to processes: a theory of conceptual change for learning science concepts. **Learning And Instruction**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 27-43, jan. 1994. Elsevier BV. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90017-5](http://dx.doi.org/10.1016/0959-4752(94)90017-5).
- CHI, Michele T. H.. Creativity: shifting across ontological categories flexibly. In: WARD, Thomas B.; SMITH, Steven M.; VAID, Jyotsna (ed.). **Creative Thought: An Investigation of Conceptual Structures and Processes**. Washington: American Psychological Association, 1997. p. 209-234.
- CHI, Michelene T. H.; KRISTENSEN, Agnieszka Kosminska; ROSCOE, Rod D.. Misunderstanding Emergent Causal Mechanism in Natural Selection. In: ROSENGREN, Karl S.; BREM, Sarah K.; EVANS, E. Margaret; SINATRA, Gale M. (ed.). **Evolution Challenges: integrating research and practice in teaching and learning about evolution**. New York: Oxford University Press, 2012. p. 145-173.
- DOBZHANSKY, Theodosius. Nothing in Biology Makes Sense except in the Light of Evolution. **The American Biology Teacher**, [S.L.], v. 35, n. 3, p. 125-129, 1 mar. 1973. University of California Press. DOI: <http://dx.doi.org/10.2307/4444260>.
- DUNK, Ryan D. P.; PETTO, Andrew J.; WILES, Jason R.; CAMPBELL, Benjamin C.. A multifactorial analysis of acceptance of evolution. **Evolution: Education and**

Outreach, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 1-8, 17 jul. 2017. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s12052-017-0068-0>.

FERRARI, Michel; CHI, Michelene T. H.. The nature of naive explanations of natural selection. **International Journal Of Science Education**, [S.L.], v. 20, n. 10, p. 1231-1256, dez. 1998. Informa UK Limited. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/0950069980201005>.

FUTUYMA, Douglas J.; KIRKPATRICK, Mark. **Evolution**. 4. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2017. 594 p.

KELLER, Stephen R.; TAYLOR, Douglas R. History, chance and adaptation during biological invasion: separating stochastic phenotypic evolution from response to selection. **Ecology Letters**, [S.L.], v. 11, n. 8, p. 852-866, 8 jul. 2008. Wiley. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01188.x>.

LENORMAND, Thomas; ROZE, Denis; ROUSSET, François. Stochasticity in evolution. **Trends In Ecology & Evolution**, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 157-165, mar. 2009. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2008.09.014>.

LIMA, Nathan W.; VAZATA, Pedro Antônio V.; MORAES, Andreia G.;

OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Claudio José de H.. Educação em Ciências nos Tempos de Pós-Verdade: reflexões metafísicas a partir dos estudos das ciências de bruno latour. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, [S.L.], p. 155-189, 5 maio 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.28976/1984-2686rbpec2019u155189>.

MASEL, Joanna. Rethinking Hardy–Weinberg and genetic drift in under graduate biology. **Bioessays**, [S.L.], v. 34, n. 8, p. 701-710, 10 maio 2012. Wiley. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/bies.201100178>.

MONTALVÃO NETO, Alberto L.; FERNANDES, Hyllo L.. Evolução e religião: perspectivas e reflexões de uma prática docente a partir de uma dualidade histórica. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA, 4., 2014, Ponta Grossa, 2014.

MORTIMER, Eduardo F.. **Linguagem e Formação de Conceitos no Ensino de Ciências**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2000. 373 p.

NADELSON, Louis S.. **Preservice teachers' understanding of evolution, the nature of science, and situations of chance**. 2007. 203 f. Tese (Doutorado) - Curso de Educational Psychology, University of Nevada, Las Vegas, 2007.

OHLSSON, S.; BEE, N. V. **The effect of expository text on children's explanations of biological evolution**. Pittsburgh: Office of Educational Research and Improvement, 1992. Learning Research and Development Center.

PEGORARO, Ariane; SOARES, Luana G.; RIZZON, Mariluz Z.; MOLIN, Eliete da; FERNANDES, Fabiana M.; LOVATO, Luciana B.; CUNHA, Gládis F. da. A

importância do ensino de evolução para o pensamento crítico e científico. **Revista Interdisciplinar de Ciência Aplicada**. Caxias do Sul, p. 14-21, out. 2016.

PLATNICK, Norman I. Cladograms, Phylogenetic Trees, and Hypothesis Testing. **Systematic Zoology**, [S.L.], v. 26, n. 4, p. 438, dez. 1977. JSTOR. DOI: <http://dx.doi.org/10.2307/2412799>.

SANCHES, Mário Antonio; DANILAS, Sergio. Busca de harmonia entre religião e ciência no Brasil: reflexões a partir do ano de Darwin. **Teocomunicação**, Porto Alegre, v. 42, n. 1, p. 98-118, jan. 2012.

SELLES, Sandra E. A polêmica instituída entre ensino de evolução e criacionismo: dimensões do público e do privado no avanço do neoconservadorismo. **Ciência & Educação (Bauru)**, [S.L.], v. 22, n. 4, p. 831-835, dez. 2016. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1516-731320160040001>.

SMITH, Mike U. Current Status of Research in Teaching and Learning Evolution: ii. Pedagogical issues. **Science & Education**, [S.L.], v. 19, n. 6-8, p. 539-571, 12 nov. 2009. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11191-009-9216-4>.

SOARES, Rafaela G. **Darwin, Lamarck e Wallace através do tempo**: uma história contada por livros didáticos brasileiros. 2021. 54 f. Monografia (Especialização) - Curso de Ensino de Ciências e Biologia, Colégio Pedro II, Rio de Janeiro, 2021.

STEPHAN, Wolfgang. Genetic hitch hiking versus background selection: the controversy and its implications. **Philosophical Transactions Of The Royal Society B: Biological Sciences**, [S.L.], v. 365, n. 1544, p. 1245-1253, 27 abr. 2010. The Royal Society. DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2009.0278>

ZAMBERLAN, Edmara S. J.; SILVA, Marcos R. da. O Ensino de Evolução Biológica e sua Abordagem em Livros Didáticos. **Educação & Realidade**, [S.L.], v. 37, n. 1, p. 187-212, abr. 2012. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2175-623613967>.