

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS – CAMPUS BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
EDUCAÇÃO PARA A CIÊNCIA**

THAIS BENETTI DE OLIVEIRA

**UMA PESQUISA DIDÁTICO-EPISTEMOLÓGICA NA
FORMAÇÃO INICIAL EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS:
“COMO A EVOLUÇÃO FORJOU A GRANDE
QUANTIDADE DE CRIATURAS QUE HABITAM O
NOSSO PLANETA”?**

BAURU – SP

2015

Thais Benetti de Oliveira

**UMA PESQUISA DIDÁTICO-EPISTEMOLÓGICA NA
FORMAÇÃO INICIAL EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS:
“COMO A EVOLUÇÃO FORJOU A GRANDE
QUANTIDADE DE CRIATURAS QUE HABITAM O
NOSSO PLANETA”?**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência, área de concentração em Ensino de Ciências, da Unesp / Campus de Bauru, como requisito à obtenção do título de Doutor em Educação para a Ciência, sob a orientação da Profa. Dra. Ana Maria de Andrade Caldeira.

**BAURU– SP
2015**

Aos meus pais, Cris e Heron,
Pelo amor dedicado em cada instante da minha vida.
Pelo amparo permanente.
Por serem meu “Ouro de Mina”.

AGRADECIMENTOS

“A vida é fruto da decisão de cada momento. Talvez seja por isso que a ideia de plantio seja tão reveladora sobre a arte de viver. Viver é plantar. É atitude de constante semeadura, de deixar cair na terra de nossa existência as mais diversas formas de sementes” (Padre Fábio de Melo).

Agradeço a Deus por ter me permitido plantar e semear cada semente da minha vida. Cada pessoa que citarei abaixo é uma semente que plantei e semeei durante esses três anos.

Ao meu irmão Bena,
Por ser meu equilíbrio, a metade de tudo que me falta.

A minha Tia Denise,
Por torcer por mim e me incentivar como uma mãe.

A Tia Laici, Tio Paulo, Bruna, Gui e Guto,
Por serem fundamentais. Uma parte da família que sempre se ajuda.

A minha cunhada Karen,
Por trazer alegria a minha família, por ser uma grande amiga e força.

Jandinha
Por ser a família que escolhi com o coração e que sempre foi uma força fundamental na minha trajetória.

Aos amigos Nina e Daniel, Fer e Marcel, Bruna e Júnior,
Pela força, pelo carinho e pela amizade.

As amigas de Bauru Bruna, Perola, Ana Laura e Dani,
Pelo carinho, pelas risadas, por escolherem estar ao meu lado.

Aos amigos Carol e Brunão,
Por serem o casal mais lindo e amigo que eu pude conhecer.

Aos amigos da Pós e da vida Michel, Danilo, Caio, Paty, Vivi e Thalita.

As amigas de Ilha e da vida Aline, Ana Julia, Marília, Gisele, Ju e Ary.
Pela presença constante em minha vida e pela amizade de tantos anos.

A amiga e professora Fernanda Brando,
Pela confiança, amizade e apoio emocional e acadêmico.

A minha psicóloga Regina,
Por tornar a minha caminhada menos dolorosa, me fazer enxergar meus erros e minhas virtudes.
E por fazê-lo com tanto amor.

A amiga única Renata,
Por ser tão incrível, pelo cuidado e admiração que tem por mim.

Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Educação para Ciência (em especial à Denise),
Por todo carinho, respeito e atenção.

À CAPES,
Pelo apoio financeiro que possibilitou dedicação exclusiva à Pesquisa.

Aos alunos participantes do GPEB e a todos os alunos da Unesp Bauru aos quais tive a honra de poder dar aulas,
Pelo carinho e pela atenção.

A aluna Bia,
Por ter contubuído muito para minha formação enquanto pesquisadora, por ter ajudado na pesquisa e por todo carinho.

Aos professores Renato, Aldo e Caluzi,
Pelas contribuições colocadas com tanta cautela e pelo esforço e atenção em ler o trabalho.

Por fim, Agradeço minha orientadora Ana,
Alguns orientadores assinam papéis, outros são ausentes; outros aparecem a cada seis meses. Eu tive o privilégio de ter uma orientadora que me inspirasse. Que me fizesse querer ser cada dia melhor. Que me ensinou o tamanho da minha força. Que foi meu exemplo. Que me orientou para a vida.
Que sejamos parceiras acadêmicas, amigas de vida.

Que as infinitas formas de grande beleza existentes no mundo propiciem um entusiasmo pungente naqueles que pretendem desvendar os mistérios que envolvem essa ubiquidade de formas e os mecanismos que a evolução forjou para tamanho portento.

RESUMO

O nosso trabalho fundamentou-se, principalmente em uma tentativa de articulação entre a Epistemologia e a Didática da Biologia: Como viabilizar que o percurso epistêmico de um conceito seja uma possibilidade didática exequível e potencial para abordagem sistêmica desse conceito? A biologia é uma ciência de natureza sistêmica e integrada. Dessa forma, a natureza dos conceitos biológicos subjaz uma pluralidade de interações sinérgicas e propriedades contingenciais e imprevistas, engendradas por uma rede de ações que ocorrem tanto em nível celular e/ou molecular como em nível de organismo ou ecológico- o que inviabiliza o reducionismo das pesquisas empíricas e/ou perspectivas didáticas e teóricas que ratificam a tendência à molecularização dos fenômenos biológicos. Essas caracterizações reducionistas do conhecimento biológico são parte fulcral de um debate epistêmico contemporâneo sobre a evolução biológica. Esse processo- enunciado como eixo unificador do conhecimento biológico – é representado, na maior parte dos casos, tanto nas salas de aula, quanto nos livros didáticos de Ensino Básico e Superior pela Teoria Sintética. Para essa teoria, os fenômenos evolutivos são concebidos principalmente a partir do viés molecular e a seleção natural entendida como principal mecanismo evolutivo, propiciando tanto as mudanças graduais identificadas nas populações ao longo do tempo evolutivo quanto as inovações morfológicas e/ou orgânicas repentinas.

Nosso intuito foi transitar teórica e empiricamente entre diferentes contextos evolutivos- de Darwin até as considerações sobre Síntese Expandida- sem obliterar com os pressupostos consolidados pela Teoria Sintética, mas apresentando (re) configurações teóricas e empíricas, principalmente referentes à origem de novas formas e a participação do processo ontogenético e do ambiente nas especificações evolutivas. Enxergamos a partir desse “percurso epistêmico” a possibilidade de uma caracterização pluralista para a evolução, além de discutirmos sobre a (de) sincronização entre a pesquisa teórica e empírica e as lacunas provisionadas por essa relação. Os nossos principais questionamentos foram “Como a evolução “forjou” toda diversidade orgânica existente (e as formas já extintas)?” Como abordamos a origem repentina dessas formas? Teríamos tantas sequências nucleotídicas quanto formas orgânicas distintas? Como, apenas a partir de processos graduais ou micro-cumulativos tantas formas poderiam ter sido geradas? Como poderia haver tanta diversidade orgânica se não houvesse algumas “chaves evolutivas” ou mecanismos operacionais específicos para engendrar as mais diversas formas? Seria a seleção natural, sozinha, capaz de gerar

tamanha diversidade? A partir dessas questões, nosso trabalho apresenta dois focos de pesquisa: uma compilação teórica e epistemológica sobre diferentes contextos evolutivos e uma pesquisa empírica cujo objetivo foi investigar como a evolução biológica é entendida por alunos integrantes de um curso de Licenciatura em Ciências Biológicas para então, inferirmos a possibilidade de uma abordagem epistêmica e plural desse conceito. Nossos dados foram coletados em dois contextos: a partir da aplicação de um questionário em duas turmas de um curso de Ciências Biológicas – cujos alunos já haviam cursado a disciplina de Evolução- e em um Grupo de Pesquisa em Epistemologia da Biologia (GPEB). A partir da categorização dos dados apontamos possibilidades de (re) estruturação do conhecimento biológico referente à evolução, indicando conteúdos fundamentais para elaboração de um texto didático para Formação Inicial.

Palavras-chaves: Ensino de Biologia, Epistemologia da Biologia, Ensino de Evolução, Evo-Devo.

ABSTRACT

This work was based mainly in an attempt to articulate the Epistemology and the Teaching of Biology: How to enable the epistemic path of a concept is a workable didactic possibility and potential for systemic approach to this concept? Biology's knowledge is systemic and integrated. Thus, the nature of biological concepts underlying a plurality of synergistic interactions and contingencies and unforeseen properties, engendered by a network of actions that occur in both cellular and / or molecular level as in body or ecologic which prevents the reductionism of empirical research and / or teaching and theoretical perspectives that ratify the tendency to molecularisation of biological phenomena. These reductionist characterization of biological knowledge is the key of a contemporary epistemic debate about biological evolution. This process- statement as a major paradigm of biological evolution - is represented, in most cases, both in the classroom, and in textbooks by Modern Synthesis. For this theory, evolutionary phenomena is primarily designed from the molecular bias and natural selection understood as main evolutionary mechanism, providing explanations for both gradual changes identified in populations over evolutionary time and / or sudden organic innovations.

Our aim was to move theoretica and empirically between different evolutionary contexts- Darwin to considerations of Synthesis Expandida- without obliterate with the assumptions consolidated by the Modern Synthesis, but presenting (re) theoretical and empirical settings, especially concerning the origin of new forms and participation of ontogenetic process and environment in evolutionary specifications. This "epistemic route" is a possibility of pluralist characterization for evolution, and we discuss the (de) synchronization between the theoretical and empirical research and accrued gaps by this relationship. Our main questions were "How evolution" forged "all existing organic diversity (and extinct forms)"? How think about the sudden origin of these forms? We would have so many different nucleotide sequences as organic forms? How gradual or micro-cumulative processes could have generated all the diversity? How could there be so much organic diversity if there were not some "evolutionary keys" or specific operational mechanisms to engender the most diverse forms? It would be possible natural selection generate such diversity? From these questions, we aimed to investigate how the biological evolution is understood by students of Biological Sciences to then infer the possibility of an epistemic and plural approach of that concept. Our data were

collected in two contexts: from the application of a questionnaire in two classes in a course of Biological Sciences - whose students had already taken the subject of Evolution- and in Research Group of Biology's Epistemology (GPEB). The categorization of the data point out possibilities for (re) structuring of biological knowledge about evolution, indicating fundamental contents for preparation of a textbook for Initial Training.

Keywords: Biology Teaching; Evolution Teaching; Epistemology of Biology; Evo-Devo.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
PROBLEMA DE PESQUISA	19
OBJETIVOS	22
Objetivo Geral.....	22
Objetivos específicos.....	22
CAPÍTULO 1 DA PERSPECTIVA SISTÊMICA DO CONHECIMENTO BIOLÓGICO: COMO EXEMPLIFICAR ESSA CARACTERIZAÇÃO?.....	23
CAPÍTULO 2 UM PREÂMBULO INVITATÓRIO: COMPÊNDIOS SOBRE A NECESSIDADE DE (RE) PENSARMOS O PAPEL DA SELEÇÃO NATURAL: “COMO A EVOLUÇÃO FORJOU A GRANDE QUANTIDADE DE CRIATURAS QUE HABITAM O NOSSO PLANETA”?.....	46
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA DA PESQUISA.....	119
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E ANÁLISE PARCIAL DOS DADOS.....	128
CAPÍTULO 5 A ESTRUTURAÇÃO DO PENSAMENTO BIOLÓGICO REFERENTE À EVOLUÇÃO: UMA POSSIBILIDADE PARA ARTICULAÇÃO ENTRE EPISTEMOLOGIA E DIDÁTICA DA BIOLOGIA NA FORMAÇÃO INICIAL.....	165
CAPÍTULO 6 A EPISTEMOLOGIA COMO PARTE FUNDAMENTAL DA DIDÁTICA DA BIOLOGIA: CONSIDERAÇÕES SOBRE A ABORDAGEM DA BIOLOGIA EVOLUTIVA E AS CONTRIBUIÇÕES DO GPEB.....	171
CAPÍTULO 7 GENE, ORGANISMO E AMBIENTE: AS INTERAÇÕES QUE RESPONDEM A NOSSA PERGUNTA.....	190
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	203

INTRODUÇÃO.

“É claro que temos que enxergar mais longe do que Darwin, mas o faremos nos apoiando em seus ombros, não virando as costas a ele”. John Maynard Smith.

O percurso de nosso trabalho parte de uma preocupação geral- a Didática da Biologia e respalda-se em uma dimensão mais específica- a Epistemologia da Biologia. Pretendemos, de acordo com toda descrição teórica e metodológica, alcançar uma articulação entre essas áreas, especificamente no que tange ao Ensino de Evolução. A característica fulcral dessa articulação realizar-se-á pelo trânsito epistêmico entre diferentes contextos filosóficos e históricos da biologia evolutiva e a possibilidade de inserção desse trânsito na própria natureza da biologia, concebida a partir da integração e abordagem sistêmica dos conceitos constituintes dessa ciência.

Enxergamos, a partir dessa articulação, um exercício epistêmico a partir do qual, os contextos de produção do conhecimento científico evidenciam aproximações heurísticas sobre o processo evolutivo ao mesmo tempo em que revelam as nuances e entraves da construção e/ou edificação das teorias ou paradigmas científicos. Assim, ao propormos como um de nossos objetivos uma articulação entre a Didática e a Epistemologia, temos o intuito de ir além das descrições teóricas sobre uma natureza geral e abstrata da ciência para, então, exemplificar- no contexto da ciência específica, do conceito específico- como nossas especulações filosóficas mostram-se pertinentes e tangíveis no âmbito do trabalho didático-pedagógico.

Não estamos a detratar os trabalhos que descrevem a natureza da ciência ou as concepções de professores e alunos sobre essa natureza, mas afirmando que isso seria insuficiente para sacramentar a articulação supracitada.

A epistemologia evolutiva predominante nos livros didáticos e nas salas de aula está alicerçada nos pressupostos da Teoria Sintética. A organização epistemológica desse paradigma pode ser, a priori, resumida a um reducionismo conceitual que aponta e/ou enfatiza os aspectos moleculares em detrimento dos aspectos macroevolutivos (explana principalmente conceitos como mutação, deriva genética, seleção natural e isolamento geográfico). O debate epistêmico contemporâneo cuja argumentação é basal para o desenvolvimento deste trabalho, incide, majoritariamente, sobre o poder causal atribuído à seleção natural: esse mecanismo propicia a transformação lenta e gradual das espécies, dada sua atuação sobre os genes. Mas por que, esse conceito é alvo de uma miríade de objeções teóricas?

Essa tendência a molecularização dos processos biológicos é uma característica bastante inapropriada do ponto de vista epistemológico e, no entanto, foi uma abordagem bastante presente nas pesquisas teóricas e empíricas a partir da metade do século XIX.

Atualmente, no entanto, esse molecular-centrismo que caracterizou o contexto de produção teórica e empírica da biologia evolutiva é, faticamente, criticado por filósofos e biólogos que propugnam sobre a idéia de que não exclusivamente a seleção natural, mas diversos outros mecanismos evolutivos têm papel causal e explicativo na evolução dos seres vivos. Essa ideia e/ou designação representa um cenário diferente à evolução e pauta-se em um pluralismo de processos que será discutido ao longo da tese. É de suma importância salientar que não prescindimos a ação dos processos de nível genético na evolução biológica e não atribuímos menor relevância a esse nível biológico, mas defendemos uma abordagem que perpassa desde mudanças de frequências gênicas em populações a origem da variação e da inovação fenotípica.

Esse breve trecho apresentou nossas razões e/ou fundamentações epistêmicas e filosóficas para a construção do trabalho.

Partamos agora para as fundamentações de cunho didático.

A evolução é citada por muitos autores e pelos próprios PCNs como eixo unificador do conhecimento biológico (BIZZO, 1991; MEGLHIORATTI, 2004, CICILLINI, 1997). No entanto, a biologia evolutiva tem sido detratada no Ensino Médio e, na maioria das vezes, apresenta-se restrita às noções do darwinismo e do lamarckismo.

A teoria evolutiva, enquanto um dos princípios ordenadores do conhecimento biológico traz embutida em si características que podem ser exploradas no ensino dos conteúdos biológicos. Essa teoria pressupõe uma abordagem histórica dos seres vivos, característica que pode ser explorada no Ensino de Biologia ao lado do enfoque histórico dos próprios conteúdos de evolução. Por um lado, a medida que responde pela história da vida dos organismos explicando a diversidade dos mesmos, suas semelhanças e diferenças, os padrões de distribuição, o comportamento, a adaptação e a interação entre os vários grupos de seres vivos, a teoria da evolução esclarece o dinamismo da rede de relações na qual o conhecimento biológico sobre os organismos foi e é produzido (CICILLINI, 1997, p.20).

A possibilidade de estudar as interações entre todos os níveis hierárquicos- celular, orgânico e ecológico- além da imprevisibilidade e/ou complexidade das propriedades engendradas pelo fenômeno da contingência inviabiliza a redução dos

sistemas vivos a níveis unicamente físico-químicos ou matemáticos. - o que já foi apresentado como um problema epistemológico da área.

Embora a evolução biológica seja o eixo unificador do conhecimento biológico, esse conceito é abordado, na maioria das vezes, de forma compartimentalizada e sem caráter integrador. Assim, o excesso de caracterizações e descrições- regidas pelo paradigma analítico de que é necessário entender as partes para então, compreender o todo- ratificam a perspectiva memorística do ensino e obliteram com a possibilidade ou potencial integrador da evolução biológica.

Muitas pesquisas mostraram que, embora os professores reconheçam a importância da Evolução biológica como eixo integrador do conhecimento biológico, abordam os conteúdos pertencentes a essa área como mais uma plêiade de termos e definições específicas dentro da biologia (GAYON 2001; TIDON E LEWONTIN 2004; CARNEIRO 2004; CASTRO E AUGUSTO 2009 E SEPÚLVEDA E EL-HANI 2009).

Outro problema apontado é o caráter linear e progressista das teorias evolucionistas trabalhadas pelos docentes (AZEVEDO, AYRES E SELLES, 2013), além da importância do uso da história e filosofia da Ciência para compreensão de todo processo evolutivo e do conceito de evolução biológica (CORRÊA, et al, 2010; MEGLHIORATTI, 2004).

O termo adaptação, abordado pela Teoria Sintética como resultado subjacente à um processo seletivo que, necessariamente, culmina em um traço cujo valor adaptativo aumentará o fitness da população, ou seja, atribui à seleção natural a capacidade em moldar fenótipos sempre ótimos também é alvo de debates epistêmicos e didáticos (SEPÚLVEDA E EL-HANI, 2008).

Cicillini (1997) aponta que, em uma pesquisa realizada com professores, o conhecimento histórico desses sujeitos sobre a formulação do conceito de evolução biológica está, em geral, associado às teorias de Darwin e Lamarck; que o conceito de evolução biológica é distorcido pela falta de conhecimentos científicos básicos como o de variedade de frequência gênica na população, que o conceito de evolução biológica do professor, muitas vezes, funde-se a crenças e valores culturais, como o da religião e a visão de progresso e que os professores do Ensino Médio não têm acesso às pesquisas recentes produzidas na universidade e nem a materiais didáticos cuja qualidade e coerência poderiam amparar e/ou subsidiar o trabalho na sala de aula (CICILLINI, 1997).

Esse último aspecto é uma preocupação bastante pungente no que se refere à elaboração e estrutura da nossa pesquisa. Se a nossa ideia é propor uma articulação entre a Epistemologia e a Didática, devemos fazê-la de forma que o produto final desse processo possa subsidiar a ação de professores e o trabalho pedagógico das salas de aula- em nosso caso, de Ensino Superior.

Tentemos traçar agora, uma tentativa de aproximar as duas áreas: Epistemologia e Didática.

Embora a ênfase do nosso trabalho recaia sobre algumas objeções teóricas referentes ao Darwinismo e a Síntese Moderna, o cerne de nossas derivações e especulações epistemológicas fundamenta-se em um sincronismo entre passado e presente, entre a pesquisa empírica (ou a falta de) e a consoante teórica. Toda ciência está obstinada a uma (re) avaliação teórico-epistemológica. Não há estaticidade no conhecimento e, então, sempre existirão novas compilações teóricas cujo resultado provisiona imprevisibilidades e/ou controvérsias filosóficas, inseridas em regimes epistêmicos diferentes.

Não existe uma acepção eternamente frutífera e unívoca para um conceito: não que ele esteja, necessariamente, fadado a uma obsolescência ou a uma subversão teórica, mas estará susceptível a incrementos de conteúdos, a reverberações filosóficas, muitas vezes decorrentes do andamento e consolidação das diferentes áreas da pesquisa empírica.

É indubitavelmente certo que o darwinismo e o neodarwinismo ofereceram e/ou oferecem contribuições incontestáveis ao corpo teórico da Biologia Evolutiva. No entanto, embora o núcleo teórico dessas teorias mantenha-se irrefutável, há alguns avanços conceituais sobre a propugnação de um entendimento do processo evolutivo a partir de uma perspectiva pluralista. Essa (re) leitura é um percurso natural da ciência, dada à vicissitude dos contextos científicos e filosóficos e concomitante prospecção de um (re) ordenamento ou uma (re) configuração da dimensão epistemológica da ciência.

Não pretendemos, em momento algum do nosso texto e exposições argumentativas, obliterar com os pressupostos darwinistas ou neodarwinistas, mas a partir deles, fundamentar-se em uma articulação coerente entre o “passado” e o “presente”. Recuperar, por meio de um diálogo com o passado, questionamentos já levantados e, no entanto, não tão claramente respondidos.

Qualquer exercício epistemológico induziria a proposição de reflexões e reverberações que, possivelmente, culminariam em acréscimos, reformulações ou refutações teóricas.

Trabalhar a partir de um cauteloso escrutínio filosófico é, também, investigar fundamentações já consolidadas e, então, derivar projeções teóricas cujas raízes ancoram-se no passado, mas têm possíveis prospecções em especulações atuais. Nossa principal tarefa é transitar, seguramente, por diferentes contextos evolutivos, sem desprestigiar nenhum deles, mas articular pressupostos passados e presentes.

Ignorar essa trajetória epistemológica da Ciência é como concordar que a passagem do tempo nada altera no panorama teórico e empírico dessa ciência. Como se não houvesse novos cientistas, novos estudiosos, novos filósofos e a proeminência de novas pesquisas, novas ideias, novas descobertas e então, diálogos e/ou proposições veementes e fervorosos sobre o que, ingenuamente, muitas vezes é tratado como a aclamação do novo e a obsolescência do velho.

Nesse sentido, esse trabalho procurou fazer uma (re) leitura epistemológica do Darwinismo e da Teoria Sintética, de forma a entender porque, atualmente, diversos autores arguem acerca de uma expansão da Síntese Moderna. Falar em expansão é sinônimo de romper com o passado e construir pressupostos evolutivos totalmente distintos dos já consolidados? Ou é, no sentido literal, apenas acrescentar alguns pontos não discutidos? Ou ainda, preencher lacunas já apontadas, mas que não puderam ser respondidas no passado?

Por acordarmos com a terceira inferência, entendemos a dificuldade e impossibilidade de elaboração de um paradigma ou uma teoria científica cuja fundamentação sempre esteja empírica e epistemologicamente adequada. Muitos dos questionamentos contemporâneos já estavam embuídos tanto na Teoria Sintética, quanto nos próprios pressupostos darwinistas, mas foram abordados de uma forma diferente. Assim, buscar em que momento essa articulação entre o “novo” e o “velho” pode fornecer pistas sobre como entender a repercussão e origem da “explosão epistemológica” que caracteriza o cenário da biologia evolutiva contemporânea.

Uma revisita ao passado nos indica que a indagação relativa à infinitude das formas orgânicas existentes sempre foi pungente em Darwin. A explicação para o surgimento e a existência dessa variedade de formas, certamente, é o principal embasamento e eixo de organização do nosso trabalho. Como, apenas a partir de processos graduais ou micro-cumulativos tantas formas poderiam ter sido geradas?

Como poderia haver tanta diversidade orgânica se não houvesse algumas “chaves evolutivas” ou mecanismos operacionais específicos para gerir a origem das mais diversas formas? Seria a seleção natural, sozinha, capaz de gerar tamanha diversidade?

Esses questionamentos indicaram a relevância de um estudo analítico e profundo sobre a Evo-Devo e as relações entre gene, organismo e ambiente. A partir de uma meta-análise de alguns contextos de produção de conhecimento referente à evolução, ensejamos traçar articulações entre os pressupostos desses campos de pesquisa e encontrar fundamentações para às discussões contemporâneas quadro conceitual evolutivo.

Em decorrência de toda trajetória e reflexão subjacente à pesquisa, outra preocupação nossa foi pensar em possibilidades de articulação entre Didática e Epistemologia da Biologia. Os conteúdos biológicos e todo percurso de sua construção- que, de fato, ainda não está finalizado- deve incidir sobre as especificações da Didática da Biologia. Como fazer com que o avanço teórico e empírico atinja os espaços de Formação Inicial? De que forma essa perspectiva integrada pode ser abordada na Biologia Evolutiva? Como transitar entre o passado e o presente, propiciando uma compreensão adequada de natureza da Ciência? Investigar como os alunos de um Curso de Licenciatura em Ciências Biológicas entendem o papel da seleção natural nos encaminhamentos evolutivos poderia ser o ponto de partida para essa (re) formulação didática?

Pensar em uma (re) contextualização didática foi a segunda etapa de nossa pesquisa. Como organizar e produzir esteios didáticos para que esses compêndios epistemológicos atinjam as salas de aula de Formação Inicial de professores de Biologia? Como atrelar a fundamentação e o tratamento epistemológico às configurações Didáticas? E como fornecer subsídios ou materiais pedagógicos para que os professores em atuação possam abordar a evolução sob esse viés?

O texto de uma tese, por exemplo, por mais bem escrito que esteja não fornece, sozinho, estrutura e organização para fomentar a ação didática de um professor na sala de aula. Portanto, este trabalho, também, objetivou investigar como o tema evolução biológica é compreendido por alunos integrantes do curso de Ciências Biológicas (que já cursaram a disciplina de evolução). A estrutura de nossa metodologia e de nosso instrumento de coleta de dados permitiu a análise das concepções dos alunos a partir de toda (re) configuração epistêmica contemporânea desse corpo de conhecimento, de forma que, a partir, do resultado de nossas análises tanto empíricas quanto teóricas,

podéssemos elaborar um texto sobre a Biologia Evolutiva Contemporânea para Formação Inicial.

Os elementos para construção do nosso trabalho foram fornecidos a partir de uma pesquisa teórica sobre o tema (meta-análise da construção do conhecimento acerca da biologia evolutiva) e dois contextos distintos de pesquisa empírica: o Grupo de Pesquisa em Epistemologia da Biologia (GPEB) e uma pesquisa realizada com estudantes de um curso de Licenciatura em Ciências Biológicas que já haviam cursado a disciplina de Evolução.

A partir do trabalho realizado nesses contextos, buscamos encontrar alguns termos estruturantes do pensamento biológico referente à evolução e algumas dificuldades e erros conceituais apresentados pelos alunos, além de articulações teóricas que permitissem uma organização didática e epistemológica do tema. A análise desses dados (no caso do grupo, das transcrições das reuniões e, no caso da pesquisa, de um questionário) e o estudo teórico sobre a biologia evolutiva fundamentaram a estrutura do nosso texto, uma vez que o viés de elaboração textual está alicerçado nas duas perspectivas supracitadas- a Epistemologia e a meta- análise da ciência e os dados teóricos extraídos dessa área e a Didática e os dados empíricos extraídos das pesquisas realizadas com alunos em Formação Inicial.

PROBLEMA DE PESQUISA

Acompanhando o pensamento de Darwin desde suas origens à bordo do Beagle, podemos ver o quanto controvérsias reais e imaginárias foram centrais a seus procedimentos para determinar sua conduta de investigação, seu desenvolvimento e devida avaliação, capazes de gerar mesmo padrões científicos inovadores, revelando a complexidade e a criatividade do processo de testabilidade empírica, com espaço para o trabalho da imaginação e para o trabalho especulativo da transferência do exame da evidência disponível de uma hipótese a outra (REGNER, 2014, p.19).

O trecho acima evidencia as nuances e imprevisibilidades do pensamento de um grande pesquisador; como as hipóteses e questões de pesquisa são (re) construídas dentro de um mesmo contexto, dadas as mudanças do cenário investigativo e da própria plausibilidade e exequibilidade empírica. Imaginemos agora, como se dá a produção de um conhecimento científico- no caso, a evolução biológica- em contextos históricos distintos. Como poderíamos abordar o cenário de produção desse conhecimento sem deturpar a natureza da ciência e as múltiplas facetas de um pesquisador?

Nosso problema de pesquisa incide, a princípio, sobre um aspecto mais geral, característico da própria organização do conhecimento científico- aqui, especificamente, biológico.

Os resquícios do paradigma cartesiano foram e são, até hoje, determinantes na estrutura dessa organização, uma vez que as diferentes áreas do conhecimento biológico são caracterizadas e abordadas a partir de uma perspectiva bastante compartimentalizada e estanque. Embora não explicitamente, os estudos biológicos, comumente delegam a compreensão do processo em questão a um nível de atuação e/ou operação biológica: É preciso identificar se estamos a trabalhar em nível genético, ou em nível ecológico ou em nível de organismo...

É notório que essa falta de integração reflete na organização curricular dos cursos de Formação Inicial e na própria formação que o futuro professor de biologia estará submetido. Uma vez que o conhecimento biológico é tratado de forma compartimentalizada nas salas de aula, o aluno, dificilmente, irá sozinho, derivar as relações de integração entre os diferentes conceitos biológicos.

As pesquisas de caráter epistêmico já realizadas no Grupo de Pesquisa em Epistemologia da Biologia (GPEB) viabilizaram a elaboração de estratégias didáticas referentes à abordagem sistêmica dos conceitos de organismo (MEGLHIORATTI,

2009), sucessão ecológica (BRANDO, 2010), gene (ANDRADE, 2011) e interação ecológica (MARICATO, 2012). O ponto categórico de todas essas pesquisas e o pano de fundo que caracteriza o andamento e estruturação do GPEB pauta-se na ideia de que para compreensão dos conceitos biológicos, faz-se necessário entender a interdependência entre esses níveis e a ação simultânea- e não de preponderância- entre os mesmos.

Se investigarmos profundamente a natureza do conhecimento biológico, perceberemos o indispensável nível de sinergia característico da ação dos fatores biológicos. Embora, visualmente, pertencentes a níveis espaciais distintos, estão estritamente integrados sobre a complexidade da rede de operação biológica e do próprio fenômeno de contingência.

Essa dimensão epistemológica suscitou a investigação de possibilidades ou elaboração de estratégias cujo objetivo fosse evidenciar a condição sistêmica da Biologia a partir de questionamentos e de uma (re) leitura da evolução biológica, que incide em nosso principal e mais específico objetivo: propor uma articulação exequível entre Epistemologia e Didática para o conceito de evolução biológica.

Como, a partir do próprio corpo de conhecimento já consolidado sobre a evolução podemos edificar uma possibilidade de abordagem sistêmica e integrada desse conhecimento?

Como enxergar a factualidade e a inegável integração entre os níveis biológicos (gene, organismo e ambiente) a partir do eixo integrador desse conhecimento? (a evolução biológica?).

Estrutura da Tese.

Em nosso **primeiro** capítulo abordaremos a natureza da Biologia como ciência: de que forma a caracterização sistêmica e integrada torna-se subjacente à própria caracterização ou definição dos conceitos constituintes dessa área do conhecimento. Apresentaremos uma breve problematização sobre os conceitos de gene, organismo e nicho ecológico com o intuito de afirmarmos e exemplificarmos a impossibilidade de abordar esses conceitos de forma reducionista e apenas sobre o enfoque molecular. Da mesma forma, o conceito de evolução biológica, precisa ser abordado sobre essa perspectiva: plural, sistêmica, a partir da ação sinérgica de vários fatores que podem atuar no mesmo nível (de organismo, molecular-genético ou ecológico) ou em níveis diferentes.

Em nosso **segundo-** e mais extenso capítulo- apresentaremos um retrato do percurso empírico e epistêmico do conhecimento sobre evolução biológica desde Darwin. O caminho de produção de conhecimento que transitou do papel preponderante e quase único do mecanismo de seleção natural na geração da diversidade orgânica para uma abordagem que exige uma pluralidade de processos operando de modo sinérgico e complementar; como articular as perspectivas seletional e transformacional adequadas à história evolutiva; como transgredir a ação gradual do acúmulo de processos micro-cumulativos para chegar a explanar à obscuridade referente à origem repentina de formas orgânicas inéditas.

Em nosso **terceiro** capítulo, descreveremos a metodologia adotada para o desenvolvimento dessa pesquisa. Apresentamos os dois contextos de coleta de dados: o Grupo de Pesquisa em Epistemologia da Biologia (GPEB) e a aplicação do questionário em duas turmas do último ano de um Curso de Licenciatura em Ciências Biológicas, além do referencial cooptado para análise de dados.

O **quarto** capítulo refere-se aos resultados e análises dos dados: análise das transcrições obtidas pelas reuniões do GPEB, análise do questionário aplicado no grupo e análise do questionário aplicado nas turmas de Licenciatura em Ciências Biológicas.

O **quinto** capítulo aborda as conclusões obtidas a partir da análise de dados: considerações sobre a estrutura do pensamento biológico referente à evolução biológica e como esses dados podem contribuir para reflexões e ações de ordem didática sobre evolução biológica.

O **sexto** capítulo descreve nossas considerações didáticas e epistemológicas cuja fundamentação fora o esteio para a organização das reuniões do GPEB e para elaboração de toda estrutura da tese.

O **sétimo** capítulo trata da produção de um texto para Formação Inicial deocorrente de toda análise e categorização dos dados e a partir do referencial teórico apresentado.

OBJETIVOS

Objetivo Geral.

- A partir de uma investigação teórica e empírica sobre o tema evolução biológica na Formação Inicial- de acordo com os referenciais apresentados-elaborar e/ou construir uma possibilidade de articulação entre Epistemologia e Didática.

Objetivos Específicos.

- Realizar um estudo teórico e analítico sobre a Biologia Evolutiva contemporânea.
- Discutir, sob o viés epistemológico, os questionamentos sobre a diversidade orgânica em diferentes contextos evolutivos.
- Discutir a importância da inserção da Evo-Devo nas explicações sobre evolução biológica, especificamente nas questões sobre diversidade orgânica.
- Discutir o conceito de evolução biológica a- partir de uma abordagem integrada da natureza do conhecimento biológico- em um Grupo de Pesquisa em Epistemologia da Biologia (GPEB).
- Realizar uma pesquisa empírica sobre as concepções do conceito de evolução biológica dos alunos de um curso de Licenciatura em Ciências Biológicas.
- Em decorrência dos objetivos anteriores, elaborar um texto sobre evolução biológica- fundamentado na perspectiva integrada desse conceito- (enfatizando as relações entre gene, organismo e ambiente) para Formação Inicial em Ciências Biológicas.

CAPÍTULO 1

DA PERSPECTIVA SISTÊMICA DO CONHECIMENTO BIOLÓGICO: COMO EXEMPLIFICAR ESSA CARACTERIZAÇÃO?

“Na Biologia não se pode escapar da relação dialética entre as partes e os todos”; (LEWONTIN, 2002, p.86).

Uma vez que o objetivo de nosso trabalho tange, principalmente, as ideias contemporâneas sobre o conceito de evolução biológica, por que dedicar um capítulo todo sobre outros conceitos pertencentes ao corpo teórico da biologia?

Esse primeiro capítulo é um preâmbulo: um ensaio e/ou tentativa a partir do qual começamos a delinear a justificativa e o viés teórico que pleiteou todo trabalho. Antes de convencer os leitores de que a evolução precisa ser entendida sob uma perspectiva mais plural e integrada, objetivamos constatar que toda biologia precisaria ser entendida sob essa perspectiva. Se nos atentarmos as características peculiares da natureza dessa ciência, ancorando-se em exemplos conceituais- certamente a necessidade de interpretação sistêmica ficará imbuída em qualquer tentativa de separar os objetos, de atribuir concepções herméticas e compartimentalizadas a eles.

Precisamos atentar-nos ao que já foi escrito sobre os conceitos biológicos e os contrapontos epistemológicos e empíricos atuais. Fazer esse trânsito na literatura nos permite elaborar e fundamentar um refinamento de ordem epistemológica que fomenta e justifica a interpretação integrada do corpo de conhecimento biológico e pode suscitar reflexões e ações que contribuam para reformulações Didáticas. Mas como exemplificar esse caráter integrado subjacente aos objetos biológicos?

Lewontin, a partir da concepção atribuída as relações entre gene, organismo e ambiente, fornece importantes contribuições acerca da natureza da biologia, uma vez que ratifica a integração e ação sistêmica entre elementos constituintes dessa ciência. Nesse capítulo, demonstraremos como essa dialogicidade está presente nos fenômenos biológicos, a partir da interdependência entre os conceitos estruturantes da Biologia e como essa integração pode ser identificada a partir dos próprios exemplos biológicos.

A estruturação do corpo de conhecimento das ciências naturais baliza-se em produções variadas, cujo resultado é um arcabouço teórico fundamentado por pressupostos próprios. Esses pressupostos tornam-se a base para a compreensão dos fenômenos estudados por uma determinada ciência (ANDRADE *et al*, 2009).

Embora as peculiaridades da natureza de cada ciência estejam bem descritas na literatura, há carência de materiais empíricos ou exemplos didático- pedagógicos por

meio dos quais a abordagem dos conceitos científicos esteja próxima à forma que os mesmos são produzidos e submetidos a embates teóricos constantes decorrentes de um contexto de refutações, alegações e deliberações as quais culminam na sustentação e/ou manutenção, ampliação ou obsolescência de teorias ou paradigmas. Um conceito é alvo de reverberações teóricas, filosóficas e empíricas e, portanto, está sujeito a (re)estruturações decorrentes dessas áreas.

Para nós, uma das dimensões mais relevantes para o entendimento do conceito científico é o estudo de sua epistemologia. A partir desse estudo, os alunos entendem a dinamicidade contextual em que os conceitos estão engendrados, passando a questionar aceções estáticas do conhecimento, por meio do trânsito entre diferentes contextos de produção desse conhecimento. No entanto, como afirma El-Hani (2007), os alunos de ciências naturais, em geral, tem um conhecimento relativamente limitado sobre história e filosofia e a organização de grupos de pesquisa ou disciplinas curriculares que abordem conteúdos epistemológicos na área de ciências naturais não são comuns no contexto de Ensino Superior. Assim, na maioria das vezes, o estudo do conhecimento biológico fica restrito ao conjunto de disciplinas discriminadas no currículo, sem que haja um espaço para discussão e integração das diferentes áreas desse conhecimento.

O estudo do conhecimento biológico por meio de subáreas sem o devido crivo e suporte epistêmico prescinde a ideia de totalidade dos fenômenos e da própria Biologia como ciência. As pesquisas sobre concepções de natureza da ciência na formação de professores indicam a necessidade da incursão das discussões de caráter epistemológico na Formação Inicial como possibilidade de subsidiar uma compreensão dinâmica e contextualizada da ciência (SCHEID *et al*, 2007).

Nesse sentido, o grupo de pesquisa é um importante espaço de formação cujo mote está nas dificuldades da área, no levantamento de hipóteses e na tentativa de obter soluções, sustentado por discussões sobre a Epistemologia da Ciência e Biologia. A participação em um grupo de pesquisas pode trazer contribuições, tanto para a formação prática dos pesquisadores em ensino, quanto para uma compreensão da Biologia como uma ciência integrada (MEGLHIORATTI, *et al*, 2008). Para tanto, é necessário entender como a Biologia constitui-se enquanto ciência, bem como a pluralidade causal envolvida nos processos biológicos.

Embora atualmente a Biologia seja bem estabelecida como uma ciência autônoma- mesmo considerando as áreas de sobreposição com a física e a química-, a formatação dessa ciência como campo específico do conhecimento é recente, uma vez

que até o início do século XX, a construção do conhecimento sobre os fenômenos do mundo vivo, ou seja, a Epistemologia da Biologia fora baseada nas Ciências Físicas e Químicas (MAYR, 2005).

Essa influência da Física e da Química sobre a estrutura do corpo teórico da Biologia, contribuíram para uma tendência à molecularização das explicações biológicas, a partir das quais, a Biologia poderia ser suficientemente explicada e/ou entendida por meio da perspectiva molecular (EL-HANI, 2002). É exatamente a partir dessa aclamação “molecular-centrista” que iniciamos nosso “trânsito epistemológico”, cujo intuito é explicitar porque o reducionismo- que imperou até a metade do século XX- inviabiliza a plausibilidade e o funcionamento das predileções e explicações biológicas.

Esse arcabouço teórico e conceitual atribuiu um sentido mecanicista aos processos biológicos, reforçando a concepção geral de que a biologia poderia ser entendida sob um enfoque reducionista, principalmente quando associada à dimensão molecular. A biologia molecular ganhou tamanha autonomia dentro da Biologia que tornou-se uma maneira geral e imprescindível de entender os fenômenos biológicos (EL-HANI, 2002).

As conquistas derivadas desse campo de investigação são uma das razões para a aceitação veemente do programa reducionista nas ciências biológicas: mapeamentos de vias bioquímicas, descrições detalhadas das interações DNA-proteína, segmentação de cromossomos em genes definidos, sequências de nucleotídeos decifradas pelo Projeto Genoma, as mudanças nas frequências gênicas das populações (EL-HANI, 2002).

Deste ponto de vista, as ciências biológicas podem ser consideradas um pouco ou nada mais do que uma aplicação da química e da física ao domínio dos sistemas vivos. No entanto, há peculiaridades relevantes que ratificam a autonomia da Biologia, principalmente no que é concernente as propriedades do próprio organismo: Tendo-se em vista que as restrições que a organização biológica impõe às reações químicas nos sistemas vivos, pode-se afirmar que a biologia não é uma mera extensão da química aos sistemas biológicos, mas uma ciência em eu próprio direito, na qual é preciso considerar-se as leis e os princípios organizacionais da química e da física em uma perspectiva genuinamente biológica (EL-HANI, 2002).

Não obstante as considerações acima mencionadas há ainda de considerarmos a própria complexidade dos sistemas vivos e a inter-relação da informação adquirida historicamente e das respostas desses programas genéticos ao mundo físico. O

equipamento explanatório das ciências físicas é insuficiente para explicar tal complexidade. (MAYR, 1982).

Caso compreendamos a noção de que um sistema vivo restringe as atividades das moléculas que o compõe a padrões definidos, atribuindo-lhes um significado que elas não tem como entidades isoladas (EMMECHE, 1998; EL-HANI E PEREIRA, 1999; EL-HANI, 2000), concluiremos, de forma subjacente, que a tradução de uma sentença biologicamente significativa numa sentença química e /ou fisicamente significativa não captura tudo que há de significativo numa sentença biologicamente significativa (EL-HANI E PEREIRA, 2000, p. 140).

Já que a Biologia tem características peculiares, derivadas da própria organização e constituição dos seus conceitos, como podemos traçar uma breve relação tanto teórica quanto empírica- ou do próprio sentido de funcionamento biológico- sobre a integração e /ou organização e ação epistemológica desses conceitos?

Os estudos em Biologia englobam uma heterogeneidade de fenômenos os quais perpassam desde os níveis molecular e celular, até os níveis das populações, dos ecossistemas e da biosfera, constituindo-se, portanto, por fenômenos integrados, complexos e dinâmicos, coesos por uma atividade sistêmica interdependente em vários níveis- desde o celular/molecular ao ecológico (MEGLHIORATTI, *et al*, 2008).

Para Mayr (2005), uma das peculiaridades da Biologia é que essa ciência não pode responder suas questões fomentando-se em leis universais – como comumente recorrem os ramos da lógica, matemática e das ciências físicas.

O biólogo tem de estudar todos os fatos relacionados com aquele problema particular, inferir toda sorte de consequências a partir da reconstrução de uma miríade de fatores e, então, tentar construir um cenário que possa explicar os fatos observados naquele caso particular. Em outras palavras, ele constrói uma narrativa histórica. (MAYR, 2005, p.97).

O cerne dessa questão é, no entanto, que essa narrativa histórica, embora possa ser representada pela causalidade, exceto nos níveis molecular e celular, torna-se praticamente impossível- sob a lógica do retrospecto- termos certeza de que recorreremos aos passos “verdadeiros” para reconstrução do fenômeno ou processo considerado, uma vez que quando estudamos com atenção um problema biológico, podemos atribuir ao mesmo, naturalmente, mais do que uma explicação causal.

Em Biologia, uma pluralidade de fatores causais, combinado com o probabilismo na cadeia de eventos, geralmente torna muito difícil, quando não impossível, determinar a causa de um dado fenômeno (MAYR, 2005, p.102).

Por exemplo, uma espécie pode estar extinta devido à competição com outra espécie, a ações antrópicas, a mudanças no clima, a eventos catastróficos ou ainda devido a uma combinação randômica ou fortuita desses fatores (MAYR, 2005).

Essa questão ainda pode ser explicada pela paleontologia, no que faz referência ao motivo que justificaria uma fila dupla de placas ósseas em forma de folhas no dorso do dinossauro *Stegosaurus*. Por que essa estrutura fenotípica tão característica está presente nesses dinossauros? Diversas respostas já foram dadas, mas nunca poderemos escolher, definitivamente, uma delas. Em uma das versões, as placas seriam sinal de conhecimento sexual da espécie. Em outra, aumentariam a silhueta desse animal herbívoro, inviabilizando os ataques de predadores carnívoros. Diz-se ainda que as placas poderiam contribuir para o comportamento de defesas físicas contra mordidas. Talvez, a hipótese mais razoável seja a de que auxiliariam o resfriamento para regular a temperatura interna, explicação consonante com a forma e localização no corpo e com o número aparentemente grande de vasos sanguíneos que as serviam (LEWONTIN, 2002).

Ainda apropriando-se dos objetos de estudo das Ciências Biológicas, se pensarmos nas conjunturas empíricas e/ou científicas do século XVIII, as pesquisas em ciências foram alicerçadas no paradigma cartesiano. Essa concepção analítica propugnava a necessária decomposição dos objetos de estudo em suas partes para que o entendimento das propriedades de cada uma dessas partes pudessem fornecer subjacentemente, a compreensão do todo. Assim, os encaminhamentos teóricos-científicos, as pesquisas empíricas e epistemológicas e, a constituição dos conteúdos das ciências acabaram por balizar-se nesse pressuposto, o qual refletiu na organização dos conteúdos biológicos em áreas específicas, sem trânsito entre eixos comuns, contemplando certa hierarquização dos conceitos ou processos biológicos. Com base nessa organização do conhecimento, uma questão fundamental colocada por Lewontin no que se refere à Biologia (2002) foi: “Como decompor o mundo natural dos objetos e dos processos de maneira a lograr o entendimento adequado da história e da operação dos fenômenos naturais?” (p.75).

De maneira análoga a esse questionamento, como delegar uma função totalmente específica para cada agente causal integrante de um processo biológico, se a Biologia é uma ciência de abordagem sistêmica que se ocupa de objetos de estudos que podem ter suas atividades/funções alteradas, mediante a interferência de um agente causal que pode atuar no mesmo nível do objeto considerado ou ainda em nível diferente? Como determinar que um único agente causal seja totalmente responsável por determinado processo biológico se esse agente, provavelmente, estará submetido a influências e/ou intercorrências de outros agentes?

Ao atribuímos à causalidade dos processos biológicos aos níveis exclusivamente celular, genético ou molecular, prescindimos a ocorrência do fenômeno de emergência, característico dos sistemas biológicos. A partir desse fenômeno há possibilidade do surgimento de propriedades que dependam da interação de outros níveis, o que inviabiliza a atribuição de funções independentes para os níveis biológicos. Ao mencionar a analogia de rede para interpretação dos processos biológicos, recorreremos ao fato de que há uma interdependência entre os níveis – majoritariamente tratados como hierárquicos- celular e /ou molecular, organismico e ecológico para entendermos a regularidade ou ação de determinados processos. Mas como exemplificar essa integração entre os níveis biológicos?

O conceito de evolução biológica organiza-se, potencialmente, como um eixo unificador da Biologia (MEGLHIORATTI, 2004; FUTUYMA, 1992; BIZZO, 1991), e, portanto, deveria sumarizar a natureza integrada dessa ciência, tal como estamos tentando especificar. A Biologia Evolutiva é uma área do conhecimento biológico que procura compilar resultados oriundos de várias áreas adjacentes como a biologia molecular, a genética de populações, a paleontologia, a sistemática de plantas e animais, a ecologia (CALDEIRA E SILVEIRA, 1998), o que evidencia o pluralismo de processos que participam e enveredam os encaminhamentos evolutivos.

No entanto, a partir da segunda metade do século XX, a Biologia Evolutiva também passou a enfatizar os processos engendrados no nível molecular, principalmente em relação ao funcionamento e regulação do gene (CALDEIRA E SILVEIRA, 1998); (EL-HANI, 2002).

Essa ênfase na perspectiva molecular orientou os estudos sobre evolução da época e fundamentou a edificação da Teoria Sintética, a qual foi estruturada sob os conceitos de mutação, recombinação e seleção natural, além de ratificar a tendência de conceber o organismo como um objeto meramente passivo, sem qualquer influência

ativa sobre o seu meio ambiente. (CALDEIRA E SILVEIRA, 1998); (ALMEIDA E EL-HANI, 2010; EL-HANI, 2002).

Embora essa tendência DNA-centrista tenha caracterizado o pensamento evolutivo desde 1920, a mesma não nos forneceu subsídios- principalmente no que se concerne as vertentes filosófica e epistemológica- para entendermos a biologia evolutiva como um todo, bem como as especificações de controle causal do processo evolutivo. Perguntas do tipo “O que determina o surgimento de uma estrutura morfológica”? ou “Por que essa estrutura manteve-se na população”? foram reduzidas ao poder de alcance da seleção natural, bem como a retrospectos evolutivos que buscavam o processo seletivo responsável pela utilidade corrente de determinado traço fenotípico. Cada estrutura morfológica era então, oriunda de uma história de seleção natural específica, que ocorria de forma independente de outros processos seletivos.

Atualmente, muitas lacunas epistemológicas são impostas ao caráter genocentrista da Síntese Moderna, suscitando questionamentos, principalmente entre filósofos e biólogos evolutivos (PIGLIUCCI, 2007), (CAPONI, 2011), (CAPONI, 2005), (ALMEIDA E EL-HANI, 2010).

O que estamos a defender sobre a fundamentação da própria estrutura do conhecimento biológico é a compreensão integrada da Biologia e, portanto, precisamos elucidar como os componentes que fazem parte dessa ação sistêmica estabelecem relações entre si, principalmente no que se refere ao trânsito entre as perspectivas macroespacial e microespacial.

O conceito de gene, por exemplo, é alvo de uma crise epistemológica caracterizada pela inviabilidade da interpretação desse conceito como uma unidade de estrutura ou função. Essa caracterização muito demarcada e pontual do gene é derivada da definição do conceito molecular clássico, segundo a qual um gene é um segmento de DNA que codifica um produto funcional (polipeptídio ou RNA). (JOAQUIM E EL-HANI, 2010, EL-HANI, 2007, JOAQUIM *et al*, 2007). A partir dessa definição, entendemos que o gene seja uma unidade hereditária que possui estrutura, função e localização definidas.

Essa linearidade processual- um gene= uma proteína-, no entanto, esbarra em situações empíricas já bem descritas na literatura como, por exemplo, a proposição do modelo operon *lac*. A partir desse modelo, passou-se da ideia, que havia dominado a genética clássica, de que os genes simplesmente agiam, para a ideia de que os genes

deviam ser ativados, podendo encontrar-se, portanto, em estado inativo na célula (Keller, 2002). Nesse caso, essa ativação ou desativação da expressão gênica é dependente da concentração de glicose (a via metabólica é ativada por uma enzima específica quando a concentração de glicose é elevada). Além disso, sequências nucleotídicas não contínuas atuam na mesma via metabólica, referente à hidrólise da lactose, o que inviabilizou a questão de começo e fim definidos e bem demarcados caracterizados pelo gene molecular clássico.

Outro exemplo que também impõe desafios ao conceito molecular clássico é o processo de *splicing* alternativo. A remoção dos íntrons durante o processamento pode ocorrer de formas alternativas, o que possibilita a geração de mais de uma proteína por gene. Esse fenômeno é denominado *splicing* alternativo. A variabilidade em padrões de *splicing* aumenta o número de proteínas expressas por uma região codificante de DNA eucarioto e, portanto, permite que esse processo seja um dos responsáveis pela complexidade funcional do genoma humano, já que uma grande diversidade proteica coexistirá em um número relativamente limitado de genes (JOAQUIM E EL-HANI, 2010; PITOMBO, ALMEIDA E EL-HANI, 2007). Neste caso, as seqüências transcritas no RNA não são as mesmas mais tarde traduzidas nas proteínas, impondo, assim, outro problema para o conceito molecular clássico, que apoia-se na unidade de transcrição para demarcar o que é um gene (PITOMBO, ALMEIDA E EL-HANI, 2007).

Assim, no *splicing* alternativo, várias unidades de mensagem são construídas antes da formação do produto e, portanto, antes de a seqüência de DNA exercer sua função. Nesse sentido, a seqüência transcrita atua como várias unidades de estrutura e função. Se diferentes proteínas podem ser geradas, é difícil sustentar a ideia de que genes seriam unidades estruturais e/ou funcionais. A relação entre gene, produto gênico e função não é de 1:1:1 (JOAQUIM E EL-HANI, 2010, p.99)

Embora não tenhamos mencionado todos os desafios recentes direcionados à percepção do gene como unidade bem demarcada do genoma, é possível perceber que a natureza da expressão gênica está vinculada ao contexto celular, bem como às interações engendradas nesse contexto, o que inviabiliza a ideia de que o gene produz um polipeptídeo que, por sua vez, tem uma função singular. Dessa forma, os genes tornaram-se objetos epistêmicos, como argumenta Rheinberger (2000), dada a natureza dos próprios genes e dos processos de expressão gênica frente à complexidade do genoma e da maquinaria celular. A partir da complexidade da expressão gênica, Keller, argumentou,

Virtualmente toda propriedade biologicamente significativa convencionalmente atribuída ao DNA – incluindo sua estabilidade – é, de fato, uma propriedade relacional, uma consequência das interações dinâmicas entre o DNA e muitos processadores proteicos que convergem sobre ele. O próprio significado de qualquer sequência de DNA é relacional – para o propósito de compreender o desenvolvimento ou a doença, são os padrões de expressão gênica que realmente importam, e esses padrões estão sob o controle de um aparato regulatório muito complexo, e não podem ser preditos apenas a partir do conhecimento sobre a sequência (KELLER, 2005, p. 4).

Essa compreensão epistêmica dos genes é fomentada pela dependência do DNA em relação a processos de expressão gênica e complexas redes regulatórias encontradas no ambiente celular e supracelular. Essas redes funcionais inviabilizam a ideia de genes como unidades estruturais e/ou funcionais do DNA, em detrimento a uma nova forma de conceber a função biológica, por meio da qual a função não é encontrada em genes particulares, seja no DNA ou no RNA, mas em redes comunicativas, informacionais, encontradas nos sistemas vivos (KELLER, 2005).

Dessa forma, a expressão gênica é um processo contexto-dependente atrelado a uma sincronização espaço temporal, que pode resultar em fenótipos bastante distintos, mesmo quando nos referimos a uma sequência nucleotídica semelhante ou idêntica. A crucialidade da ação gênica está no modo como os genes são usados, na regulação da expressão gênica.

Diferentes animais usam os mesmos genes em tempos e lugares diferentes no desenvolvimento, resultando em formas corporais também distintas. Isso é possível porque cada um dos genes envolvidos no processo de desenvolvimento pode ter vários interruptores diferentes. Isso permite que um mesmo gene seja usado em tempos e lugares distintos, porque conjuntos diferentes de proteínas capazes de acionar ou desligar os genes do desenvolvimento estão presentes em diferentes momentos e em diferentes tecidos em formação. (EL-HANI E MEYER, 2009, p. 03).

Sean Carroll (2006) propôs uma metáfora interessante para tais genes: Os mesmos seriam componentes de uma “caixa de ferramentas genéticas” para o desenvolvimento. Como é possível fazer animais muito diferentes com base nas mesmas ferramentas? O segredo está na maneira como os genes são usados, na regulação da expressão gênica. Jablonka e Lamb (2010) argumentam que as sequências gênicas operam de formas diferentes dependendo do que é “ligado” e “desligado” ao

longo da sequência nucleotídica considerada. Para essas autoras, diferenças morfológicas consideráveis podem surgir a partir de sequências idênticas.

Bateson (*apud* CARROL, 2006), constatou que muitos dos grandes animais eram formados por elementos repetidos que, por sua vez, também podiam ser constituídos por unidades recorrentes. Ao analisar determinados grupos de animais, a quantidade e o tipo de estruturas repetidas pareciam definir as principais diferenças entre as espécies. Por exemplo, embora todos os vertebrados possuam uma coluna vertebral modular, há uma variação bastante considerável no número de vértebras entre a cabeça e a cauda dos distintos animais. Os sapos possuem menos de uma dúzia, os seres humanos têm 33 e, as serpentes podem chegar a algumas centenas. Também existem vários tipos de vértebras, como cervicais, torácicas, lombares, sacrais e caudais. As principais diferenças entre elas, em qualquer animal, estão no tamanho, no formato e na presença ou ausência de estruturas adjacentes como costelas. Diferentes vertebrados possuem quantidades distintas de cada tipo vertebral (CARROL, 2006).

Um exemplo ajudará a entender esse mecanismo. Estudos do desenvolvimento dos vertebrados revelaram que há um gene (chamado de *Hoxc6*), que é expresso na coluna vertebral. A fronteira de sua expressão na coluna sinaliza onde deverá ocorrer a transição entre vértebras cervicais e torácicas. Portanto, a origem de um plano corporal com um pescoço mais longo ou curto pode ser produzida pelo deslocamento da região em que o gene *Hoxc6* é expresso. As cobras representam um caso extremo: a região de expressão do *Hoxc6* foi tão deslocada anteriormente (em direção à cabeça) que nem há formação de vértebras cervicais: seu corpo longo resulta de perda do pescoço e aumento do tórax. É importante notar que o gene *Hoxc6* é muito semelhante em cobras e gansos. O que muda é a região em que ele é expresso e isso ocorreu porque os interruptores que o regulam mudaram ao longo da evolução. Em cobras, o interruptor só é acionado nas vértebras perto da cabeça. Já em gansos, ele é expresso longe da cabeça e o pescoço se estende até a 22ª vértebra (EL-HANI & MEYER, 2009, p. 03).

Um padrão semelhante aplica-se a morfologia e a diversidade dos artrópodes. Esses animais são formados por módulos repetitivos que, na região do tórax (atrás da cabeça), podem variar de 11 segmentos, em insetos, até dezenas em centípedes e milípedes. Os grupos de segmentos distinguem-se um dos outros (por exemplo, torácicos e abdominais) pelo tamanho e a forma - mas principalmente pelos apêndices que deles se projetam (de cada segmento torácico dos insetos projeta-se um par de patas, o que não ocorre nos segmentos abdominais) (CARROL, 2006).

Da mesma maneira que procuramos exemplificar a multiplicidade causal do contexto que envolve a atividade gênica, podemos constatar a coerência e necessidade de uma interpretação sistêmica no que se refere ao conceito de organismo. Embora esse conceito pareça ser o eixo de derivação das questões biológicas, a partir da década de 1920, a biologia passa a ser estruturada, tanto empírica quanto teoricamente sob a perspectiva molecular (grandes avanços empreendidos pela genética, biologia celular, bioquímica e biologia molecular) (EL-HANI, 2002).

A revelia de uma análise epistemológica cuidadosa, essa tendência histórica de molecularização dos fenômenos biológicos não considera as controvérsias/ embates epistemológicos subjacentes ao próprio contexto molecular- como foi descrito na discussão sobre as nuances do conceito molecular clássico de gene.

A perspectiva molecular, embora seja aclamada em diversas explicações de ação biológica, reduz esse nível biológico a uma autonomia quase inexistente na natureza da Biologia. Os níveis biológicos- molecular, orgânico e ecológico- embora alternem a posição pelo status de representação sincrética do conhecimento biológico; sozinhos, nenhum deles, pôde representar esse conhecimento de forma independente, não obstante a um reducionismo conceitual e processual.

Os fenômenos biológicos só podem ser compreendidos em sua totalidade quando interpretados sob o viés de uma integração hierárquica, um estruturalismo hierárquico (essa abordagem caracteriza não só a interdependência processual dos níveis biológicos, como a emergência de propriedades dada pela perspectiva sistêmica-interacional) No entanto, para que essa interpretação esteja imanente aos processos biológicos, é necessário entender a ação sistêmica de cada unidade biológica (MEGLHIORATTI *et al*, 2008).

Dada à tendência da molecularização dos fenômenos biológicos, o organismo passou a ser entendido como uma entidade passiva, decorrente da interação entre gene e ambiente.

“Os seres vivos são vistos como sendo organismos determinados por fatores internos, ou seja, os genes. [...] O mundo fora de nós coloca certos problemas, que não criamos, mas que apenas experimentamos como objetos. Os problemas são: encontrar um cônjuge, encontrar alimento, vencer as competições com os rivais, adquirir uma grande parte dos recursos do mundo, e se tivermos os tipos certos de genes, seremos capazes de resolver os problemas e deixar mais descendentes. Portanto, com essa visão, são realmente nossos genes que estão se propagando através de nós mesmos.” (LEWONTIN, 2000, p. 17).

Assim, é recorrente nas formulações teóricas e empíricas da Biologia contemporânea, não pensar o organismo em sua totalidade, prescindindo dessa forma a investigação de propriedades que emergem no nível orgânico de complexidade (MEGLHIORATTI, EL-HANI E CALDEIRA, 2012). Webster e Goodwin (1999) enfatizam a necessidade de interpretarmos o organismo como “um objeto real, existindo em seu próprio modo e explicado em seus próprios termos” (p.495).

Uma das propriedades características dos organismos quando associadas à perspectiva evolutiva é a auto-organização. A partir dessa percepção, podemos entender porque o paradigma cartesiano não funciona para estudos e caracterizações dos fenômenos biológicos, uma vez que todas as partes são ao mesmo tempo finalidade e meio, ou seja, ao mesmo tempo em que as partes contribuem para a organização do todo, também são consequências desse modo de organização (MEGLHIORATTI, EL-HANI E CALDEIRA, 2012).

Assim, a partir da emergência de propriedades não previstas subsidiadas pelo caráter sistêmico do organismo, ou seja, “sistemas nos quais as relações funcionais de suas partes integrantes formam um todo com um maior grau de integração funcional do que a existente entre os sistemas que formam a unidade superior” (Etxeberria e Moreno, 2007, p. 34), a palavra “organismo” adquire aspectos de autonomia e a capacidade do sistema de criar significado (Ruiz-Mirazo et al, 2000, p. 210). Portanto, quando se utiliza o termo, fica subentendido que os seres vivos se diferenciam da matéria inanimada pela forma como seus componentes (ou seja, as partículas físico-químicas), estão organizados e não pelos tipos de componentes (MEGLHIORATTI, EL-HANI E CALDEIRA, 2012).

A ideia de que o organismo é um ente passivo que recebe as pressões seletivas erigidas pelo meio ratifica a falta de co-dependência entre os níveis biológicos. Essa concepção de que apenas o ambiente age sobre o organismo, impondo condições de sobrevivência- ditadas pelas pressões seletivas- é equivocada, uma vez que essa relação é marcada por uma ação recíproca, a partir da qual ambos são agentes ativos de transformações que poderão engendrar e interferir nos caminhos evolutivos.

Há, portanto, uma preocupação em conceber o organismo como totalidade, como unidade autônoma que age em seu ambiente, entendendo as interações internas de maneira sistêmica, sendo essas dependentes de uma multiplicidade de fatores (MEGLHIORATTI, 2009).

Por exemplo, o processo de mutação gênica originaria um número suficiente das variantes corretas nos momentos apropriados a fim de que as espécies logrem sobreviver às alterações ambientais sem a seleção natural? (LEWONTIN, 2002). Se essa variedade fosse possível, poderíamos imaginar uma relação independente entre organismo e ambiente, uma vez que o caráter teleológico das alterações gênicas permitiria ao organismo uma ação totalmente independente e intrínseca. No entanto, sabemos que as mutações não podem predizer e/ou prospectar condições ambientais e responder sempre positivamente a essas condições. Dessa forma, o habitat de um organismo é construído a partir de uma ação sincrônica e imprevista entre ele e o ambiente.

É preciso explicar, também, como organismos que cavam buracos, tecem teias, constroem ninhos e tocas ou aqueles que decompõem outros organismos, afetam o habitat que os circundam, uma vez que suas atividades estão alterando, de forma específica, o meio em que vivem (alteração de pH do solo e outros fatores edáficos, concentração de determinados gases, estreitamento de outros nichos em decorrência da construção das teias e tocas, entre outros).

Para Hoffmeyer devemos enfatizar a atividade do organismo na construção de seu ambiente, o nicho ecológico tal como o animal o apreende (Hoffmeyer, 1996, p. 54). Receitas para a construção de ambientes são incluídas no genótipo e transferidas seletivamente às gerações futuras. O processo seletivo não contemplaria simplesmente mudança na forma dos organismos, mas notadamente uma mudança em suas relações com o mundo.

A própria Síntese Moderna enfatiza a ação da seleção natural sobre as variedades genéticas e quase ignora as relações do meio com o organismo. A perspectiva DNA- centrista desse paradigma aborda o organismo como resultado de um “rol” gênico a partir do qual, emergirão as possibilidades de variabilidade genética sob as quais a seleção natural fará uma triagem- consonante às pressões evolutivas.

LALAND, ODLING-SMEE e GILBERT (2008) e PIGLIUCCI (2007) ressaltam essa falta de espaço teórico e empírico para a área da ecologia na Síntese Moderna, argumentando sobre a existência de uma lacuna na biologia evolutiva. Essa lacuna é resultante da falta de referência ao papel desempenhado pelo ambiente na evolução orgânica. Essa participação do ambiente, a partir da qual, devemos identificar uma relação de influência recíproca com os organismos, para muitos autores, pode ser explicada por meio da “Teoria de Construção do nicho”.

Segundo a TCN, os organismos modificam o ambiente por meio das atividades metabólicas e comportamentos próprios. (LALAND *et al*, 2008). Os organismos constroem buracos, ninhos, teias e tocas; modificam os níveis de gases na atmosfera; decompõem outros organismos; fixam nutrientes, participando ativamente das determinações seletivas entre organismo e ambiente (BRANDON, 1992; LALAND *et al*, 2008).

Assim, essa perspectiva sobre a função ativa exercida pelo ambiente na evolução, acrescenta às proposições evolutivas, a noção do mecanismo de herança ecológica. Com base nessa herança, os organismos descendentes herdam as ações de seus antepassados, por meio da modificação efetuada pelos últimos em seu ambiente. Essa herança ecológica não é um sistema de cópia de modelo, logo não depende de replicadores, mas do tipo de ação dos organismos, os quais serão responsáveis pelas características do ambiente “transmitido” aos seus descendentes (ODLING-SMEE, LALAND e FELDMAN, 2003; JABLONKA E LAMB, 2010).

A incorporação da concepção de herança ecológica em Biologia evolutiva tem consequências para a Biologia do desenvolvimento, uma vez que em cada geração, a prole herdará um ambiente local seletivo que, de certa forma, já foi modificado, ou escolhido, dada a ação da construção do nicho de seu ancestral. Assim, de forma análoga aos mecanismos evolutivos centrados na herança genética- que subsidiam a estrutura da Síntese Moderna- por meio dos quais, o desenvolvimento dos organismos começa com a herança de um “kit de partida” de genes; a teoria de construção de nicho começa com a herança de um “nicho de partida” (LALAND, ODLING-SMEE e GILBERT, 2008).

Dessa forma, as ações e escolhas dos progenitores determinam as características do local em que os descendentes serão originados. Por exemplo, os insetos fitófagos, geralmente escolhem plantas hospedeiras específicas para depositarem seus ovos, que, subsequentemente, poderão ser fonte de alimento para sua prole. Nas aves e insetos, cujo ovo é um dos principais componentes do “nicho de partida”, a gema é fornecida para a nutrição embrionária e larval. Além disso, muitos organismos fornecem produtos químicos de proteção no seu “kit de partida” (LALAND, ODLING-SMEE e GILBERT, 2008).

A TCN subjaz, portanto, a ideia de herança ecológica que amplia a concepção de herança, já que um organismo herda uma ampla variedade de recursos que interagem na construção do ciclo de vida desse organismo (OYAMA, GRIFFITHS E GRAY, 2001).

A partir desse entendimento integrado que concebe a mudança do sistema como uma constante, a significância de qualquer causa é contingente em relação ao restante do sistema. Dessa forma, as características apresentadas pelos sistemas biológicos são resultados de interações constantes que modificam e determinam propriedades biológicas não reduzidas a um só nível.

A revelia dessa concepção sistêmica da relação organismo e ambiente, que (re) interpreta ambos como agentes ativos e participantes das interações entre diferentes níveis e, portanto, interferem na organização ecológico-evolutiva, o conhecimento biológico exemplifica a passividade atribuída ao organismo na estrutura teórica da própria Síntese Moderna, cuja tendência é conceber o organismo como um objeto meramente passivo, sem relevar qualquer influência ativa sobre seu ambiente. Esta tendência está relacionada, ao menos em parte, com a estrutura do darwinismo como uma teoria variacional da mudança, em contrapartida a teorias anteriores, como as de Lamarck e Chambers, que eram transformacionais (LEWONTIN, 2002).

Essas teorias, objetivam explicar como os organismos de um determinado tipo chegaram a ter a forma que de fato eles têm, enfatizando as alterações morfológicas do indivíduo (CAPONI, 2005).

A partir das compilações darwinianas, as populações substituíram os organismos e a perspectiva fisiológica enquanto objetos das ciências da vida (CAPONI, 2005). De acordo com a teoria darwiniana, o processo evolutivo não precisa ser explicado a partir de processos individuais de transformação, uma vez que uma população “modifica-se, não porque cada indivíduo passe por desenvolvimentos paralelos durante a vida, e sim porque existe variação entre os indivíduos e algumas variantes produzem mais descendentes do que outras” (LEWONTIN, 2002, p. 9); e, por isso, pode afirmar-se que, segundo tal ponto de vista, o organismo, como diz Lewontin (1985, p. 85), aparece “como objeto, e não como sujeito, das forças evolutivas”.

O grande embate entre o darwinismo e a biologia precedente recaiu sobre a oposição entre a perspectiva fisiológica, prevalente em todo o campo das ciências da vida desde Aristóteles até Cuvier, e a perspectiva populacional, que emergiu com a explicação darwiniana dos processos evolutivos (ALMEIDA E EL-HANI, 2010). Essa perspectiva populacional é fomentada pela seleção natural, na medida em que prevê que a ação da mesma, atuando sobre indivíduos variantes em populações, é capaz de explicar grandes mudanças observadas ao longo do tempo (ALMEIDA E EL-HANI, 2010).

A ênfase atribuída à seleção natural e as mudanças populacionais em detrimento das transformações ocorridas no indivíduo, endossa a lacuna sobre conteúdos da embriologia e das áreas correlatas (morfologia e anatomia) e subestima o papel da fisiologia no processo de evolução biológica (ALMEIDA E EL-HANI, 2010).

Essa percepção é consolidada pelos pressupostos da Teoria Sintética, os quais delinearam um novo formato para o entendimento da hereditariedade- a teoria cromossômica de herança- desvinculando a mesma dos processos de desenvolvimento embriológico (ALMEIDA E EL-HANI, 2010).

No entanto, embora a embriologia e a perspectiva fisiológica tenham sido excluídas dos pressupostos da Síntese Moderna, a partir da década de 1980, os engendramentos das pesquisas empíricas (CARROL, 2006) restituem os questionamentos acerca do papel do desenvolvimento no processo evolutivo, apontando aspectos que só poderiam ser explicados a partir do desenvolvimento. De fato, esse viés epistemológico, embora não prevalente na literatura a partir de 1940, com a edificação da Síntese, nunca deixou de relevar aspectos sobre explicações causais que complementassem a seleção natural ou que até mesmo emergissem como uma teoria genuinamente alternativa (CAPONI, 2005, ALMEIDA E EL-HANI, 2010). Essas teorias transformacionais da evolução retomam as prerrogativas fisiológicas, sem, no entanto, sucumbir ou duvidar da existência da seleção natural. Embora, de acordo com as teorias transformacionais, a seleção natural ainda seja o mote dos desmembramentos evolutivos e das mudanças nas frequências gênicas nas populações ao longo das gerações, essa perspectiva questiona a capacidade desse mecanismo em produzir e *guiar* as *grandes mudanças* evolutivas, o que indica a existência de outras forças causais participantes do processo evolutivo.

Em síntese, se nem tudo pode ocorrer no desenvolvimento de um organismo individual, nem tudo pode ocorrer na história evolutiva da espécie, de modo que estudar os limites e os caminhos possíveis desse desenvolvimento é, em última instância, o mesmo que estudar os limites e os caminhos possíveis da evolução. O desenvolvimento de um organismo está limitado e orientado por certas pautas morfológicas e essas pautas limitam e orientam o próprio caminho da evolução. A postulação de constrições ou de coerções, que limitariam e pautariam os possíveis caminhos da evolução, surge, como dissemos no começo, da própria adoção de uma perspectiva transformacional (ALMDEIDA EL-HANI, 2010).

Esse re-ordenamento epistemológico regido pela consolidação de um campo de pesquisa mais recente- a Evo Devo- prospecta a possibilidade de articulação entre a perspectiva variacional e a transformacional, de modo que o organismo seja (re) posicionado como parte fundamental das especificações e/ou intercorrências evolutivas.

O que tentamos exemplificar, a partir dessa breve argumentação epistemológica acerca de alguns conceitos da Biologia é a ideia de que os focos da pesquisa biológica articulam-se por meio das ações entre gene, organismo e ambiente. Essa separação teórica e explicativa –mais próxima a uma tentativa ingênua de representar um fenômeno- entre os níveis biológicos está alicerçada na bagagem de organização cartesiana, cuja influência preponderante nos encaminhamentos das pesquisas determinou a compartimentalização dos conteúdos, dificultando um entendimento sistêmico da ciência. Somos levados, mesmo que não explicitamente, a escolhermos um eixo biológico (celular, orgânico ou ecológico) como determinante para os estudos teóricos e as pesquisas empíricas e a elegermos um nível como responsável por todas as derivações causais dos processos biológicos.

Por exemplo, os entraves teóricos traçados entre as teorias transformacionais e variacionais, acabaram por alternar a prevalência de um desses enfoques como regentes ou orientadores do conhecimento referente à evolução. Sabemos da importância das duas perspectivas para que o fenômeno evolutivo seja entendido como um todo (tanto em aspectos microevolutivos quanto em macroevolutivos). Uma articulação entre perspectivas distintas (variacional, cujo objeto de pesquisa seja a população e o objeto de ação seja a seleção natural e transformacional, cujo objeto de pesquisa seja o organismo e o de ação o desenvolvimento) não é sinônimo de um sincretismo de concepções distintas reunidas sob a necessidade de cumprirmos especificações epistemológicas do conhecimento, mas um caminho para o entendimento sistêmico do processo biológico.

Os exemplos acima embasam a complexidade causal-explicativa dos processos biológicos e enviesam para percepção sistêmica e pluralista característica desse conhecimento. No entanto, para Teoria Sintética, a seleção natural constitui um paradigma suficiente para explicar tanto a micro quanto a macro evolução, sendo necessário apenas o complemento de mecanismos que expliquem a separação de populações e a interrupção do fluxogênico, para dar conta da origem de novas espécies (ALMEIDA E EL-HANI, 2010).

Embora a seleção natural seja fundamental no processo evolutivo, nem a mesma, nem o DNA conseguem explicar diretamente como as diferentes formas foram geradas ou evoluíram (CARROLL, 2006).

As pesquisas relativas à evolução e a embriologia e, como decorrência a base empírica na qual podemos balizar as conclusões relacionadas ao quadro evolutivo e as suas prováveis lacunas conceituais, não permitiam a construção da relação entre essas duas áreas biológicas e uma vez que os estudos em embriologia permaneceram estagnados durante muito tempo, os pressupostos da embriologia não constituíram a denominada “Síntese Moderna” do pensamento evolucionista.

A biologia molecular priorizava o estudo das sequências nucleotídicas, sem atentar-se para comparação dessas sequências entre espécies filogeneticamente distantes. Até que os experimentos com drosófilas fossem realizados, os biólogos acreditavam que não haveria possibilidade de organismos não aparentados tivessem sequências gênicas semelhantes operando de maneiras distintas (CARROL, 2006).

No entanto, a partir de 1980, os avanços na biologia do desenvolvimento e na biologia da evolução fomentaram constatações importantes sobre os genes invisíveis e alguns eixos comuns que configuram a forma e a evolução animais (CARROL, 2006). Os dados derivados dessas pesquisas apontaram reformulações sobre o quadro proposto pela Síntese Moderna: “jamais poderíamos prever, por exemplo, que os mesmos genes que controlam a formação do corpo e dos órgãos de um inseto também coordenam a formação de nossos organismos” (CARROL, 2006, p.14).

Não obstante a explicação das inovações morfológicas e expansão da diversidade e ainda da similaridade nucleotídica existente em espécies distintas, há ainda de considerarmos as leis físicas que restringem as possibilidades de formação dos seres vivos. Estas restrições- que também podem decorrer de restrições atreladas ao processo de desenvolvimento- resultam em um afunilamento na diversidade de formas vivas que podem ser produzidas e, em vista disso, diminui a variedade disponível para a triagem pela seleção natural. A seleção não opera a partir de uma diversidade infinita de organismos variantes, mas com base em uma série limitada de variedades possíveis (EL-HANI, 2002; MEYER E EL-HANI 2005). Nesse sentido,

A seleção natural seria pouco informativa no que concerne à diversidade dos seres vivos: aprenderíamos mais estudando seu desenvolvimento e as regras físicas responsáveis por sua construção, bem como seus elos de parentesco, do que por meio de explicações adaptacionistas, baseadas na operação da seleção natural. Este deslocamento do problema do processo evolutivo não implica que a herança e a seleção natural devam ser postas de lado como elementos importantes para a explicação da evolução. Numa interpretação mais equilibrada, pode-se perceber que não se trata de propor uma ruptura paradigmática completa com a síntese neodarwinista, mas antes de defender a necessidade de uma extensão desta síntese, de modo a ter na devida conta o papel dos organismos e de outros fatores importantes no processo evolutivo, como as restrições associadas ao desenvolvimento, à natureza histórica das linhagens de seres vivos e às leis da física (EL-HANI, 2002, p.10).

Mayr, um dos edificadores da Síntese Moderna, já argumentava sobre a necessária interpretação pluralista para entendimento dos processos de evolução biológica. “Por diversas vezes, um problema evolutivo pareceu contraditório quando somente a causa próxima ou última era considerada, enquanto na verdade ela era resultado da ocorrência simultânea de ambos os tipos de causa”. (MAYR, 2008, p. 272). “A lição que se deve tirar desse pluralismo é que, em biologia evolutiva, generalizações irrefutáveis raramente estão corretas” (MAYR, 2008, p.272). A partir da afirmação de Mayr, podemos estender essa irrefutabilidade não só a biologia evolutiva especificamente, mas a todo corpo teórico dessa ciência: pensar de forma sistêmica e integrada leva-nos a considerar causas múltiplas aos fenômenos biológicos e, então, aproximar-nos de uma representação mais verossímil acerca dos processos biológicos.

Essa problemática referente à falta de entendimento e abordagem sistêmica dos elementos constituintes da Biologia reflete também na concepção do sistema genótipo e fenótipo: essa relação é dada como um processo de interação unívoca e direta, decorrente da própria concepção de gene- concepção molecular-, da ação do ambiente e da passividade característica do organismo nessas relações.

Os seres vivos são considerados produtos da interação entre o genótipo e o fenótipo, sendo o genótipo compreendido pelo conjunto de genes e o fenótipo a partir da expressão de características no organismo decorrente da relação entre seus genes e o ambiente (JUSTINA, MEGLHIORATTI E CALDEIRA, 2012).

Essa interpretação de herança lastreia-se na ideia de que todas as características ou traços fenotípicos do organismo provêm de uma molécula de DNA, isentando assim,

a possibilidade de que esses traços ou características sejam construídos e/ou (re) modelados ao longo do desenvolvimento orgânico, como resultado da ação e/ou interação sinérgica de uma multiplicidade de fatores (JUSTINA, MEGLHIORATTI E CALDEIRA,2012), além de não considerar a herança ecológica, já discutida nesse capítulo.

Os recursos herdados não estão restritos apenas à dimensão genética e as ações da expressão gênica. A teoria de construção de nicho contempla a problemática envolvida na herança, uma vez que passamos a pensar sobre uma herança ecológica, que também intervirá nas características do organismo. O “kit de partida” derivado do micro-habitat construído pelo organismo pode determinar condições efetivamente determinantes para vida de seus descendentes, inclusive referentes à própria sobrevivência. A maioria dos animais que bota ovos não possui cuidado parental; no entanto, quando o filhote nasce do ovo, tem a possibilidade de alimentar-se da própria reserva vitelínica existente no micro-habitat em que nasceu. Quantos animais não tem acesso a essa “vantagem alimentar” ao nascer? E quais pressões seletivas organismos que possuem heranças ecológicas distintas podem estar sujeitos? Pressões seletivas distintas determinarão caminhos evolutivos, na maioria das vezes- pois há casos em que a plasticidade fenotípica pode propiciar redundância genética- distintos, mesmo que, a bagagem genética entre esses organismos seja bastante similar.

Além disso, a própria expressão gênica está envolvida em uma pluralidade de mecanismos, mesmo se considerarmos apenas o ambiente celular: sequências de DNA; sistemas estáveis baseados em ciclos de retroalimentação autossustentável; estruturas celulares que são usadas como guia ou molde para a construção de estruturas similares; marcas da cromatina que afetam a expressão gênica; entre outros (JABLONKA E LAMB, 2010). Portanto, o genótipo é flexível e pode ser considerado como o conjunto de indicativos do desenvolvimento, interno ao organismo, que permitem a sua construção em caminhos nos quais ele se assemelhe às gerações anteriores – genótipo potencial.

O fenótipo corresponde às características aparentes de um organismo em um determinado momento do desenvolvimento, fruto das interações entre herança genotípica, aspectos aleatórios do desenvolvimento, herança ambiental, aspectos aleatórios do ambiente e ação do organismo sobre seu meio (JUSTINA, MEGLHIORATTI E CALDEIRA, 2012, p.70).

A herança biológica, comumente referida como herança genética, pode ser entendida a partir de uma perspectiva muito mais ampla: o organismo ao longo do desenvolvimento biológico é resultado das interações com ele próprio, do fenótipo anterior, do genótipo potencial e do seu ambiente. Assim, além das especificações carregadas pelas moléculas de DNA, os padrões de herança são afetados fatidicamente, também, pelo ambiente físico incluindo a herança ambiental e os fatores ambientais aleatórios (JUSTINA, MEGLHIORATTI E CALDEIRA, 2012).

Nota-se que a Biologia é uma ciência de estruturação sistêmica, cujos processos, raramente restringem-se apenas a dimensão molecular e/ou genética. As perspectivas genética, organísmica e ecológica (todas submetidas ao processo evolutivo), estão envolvidas em uma dinâmica processual integrada que deveria estar contemplada nas tentativas de definições e/ou explicações dos processos biológicos. Entender a rede na qual estes conceitos estão envolvidos é conceber a Biologia a partir de sua real natureza e funcionamento. É atribuir um sentido interpretativo coerente a um campo de conhecimento que não pode ser reduzido a níveis independentes.

Dessa forma, essa interpretação sistêmica e integrada dos processos biológicos deve ser trabalhada nos cursos de Formação Inicial, impondo, portanto um grande desafio à Epistemologia e à Didática da Biologia. É a partir de uma articulação sólida entre essas áreas, fomentada por exemplos biológicos factíveis de serem visualizados e entendidos pelos alunos, que prospectamos a possibilidade de uma percepção biológica integrada. Assim, o professor precisa recorrer a fontes bibliográficas atualizadas, as quais apontam os avanços da pesquisa empírica, discutindo a inserção das mesmas no campo epistemológico, na (re)estruturação do conceito em questão e, em última instância, as possibilidades de uma reflexão Didática para abordagem em sala de aula.

Essa atenção à dimensão epistemológica do conhecimento, regida pela plêiade de controvérsias filosóficas, permite que identifiquemos uma possível articulação entre os avanços das pesquisas empíricas e a abordagem teórica dos conceitos, limitando a definição hermética (e causal única) desses conceitos a contextos de produção específicos. Assim, na tentativa de propormos abordagens atualizadas dos conceitos, as quais ultrapassem um sincretismo de percepções anacrônicas, é necessário investigarmos os contextos a partir dos quais os processos biológicos são engendrados, bem como a incidência das pesquisas empíricas no quadro teórico da Biologia. Para Keller,

(...) caímos em todos os tipos de armadilhas ao tentarmos ser historiadores do presente. Mas, talvez, a mais séria, especialmente em tempos excitantes como o nosso, é que a história pode acontecer muito mais rápido do que um acadêmico (pelo menos, um acadêmico como eu) pode escrever (Keller, 2005, p. 3).

A partir das caracterizações e discussões epistêmicas sobre os conceitos de gene, organismo, nicho ecológico e evolução, pudemos perceber que a interpretação sistêmica é subjacente a todas as tentativas de definições desses conceitos biológicos. Esses níveis biológicos são entidades co-dependentes de um contexto enviesado tanto pela perspectiva micro, quanto pela macro espacial.

Assim, a tentativa de atribuir um eixo único para o conhecimento biológico inviabiliza a pluralidade causal que embasa a própria natureza desse conhecimento. Embora estejamos fazendo referência ao gene, por exemplo, os engendramentos da ação e complexidade desse conceito não emergem apenas a partir do nível molecular/e ou celular. A expressão gênica, o modo de organização e interação do organismo, a ação do ambiente e o processo evolutivo, são efetivamente entendidos, apenas sob uma pluralidade de contextos, que na maioria das vezes, são reduzidos à dimensão visível do conceito.

É necessário que entendamos que a molécula de DNA e toda perspectiva genética é parte necessária da rede das interações orgânicas, mas não é suficiente para, sozinha, determinar todas as características do organismo ou dos caminhos evolutivos. A partir disso, o organismo torna-se resultado das interações com ele próprio, do fenótipo anterior, do genótipo potencial e do seu ambiente (JUSTINA, MEGLHIORATTI E CALDEIRA, 2012).

É preciso conceber o organismo como um sistema em que cada parte atua de maneira correlacionada. Portanto, a caixa-preta do desenvolvimento do organismo precisa ser aberta e seus mecanismos de funcionamento explicitados (JUSTINA, MEGLHIORATTI E CALDEIRA, 2012).

Se nos propusermos a abrir a “caixa preta” do desenvolvimento, decifrando todas as facetas operacionais desse processo, como a Biologia poderia ser compreendida de forma mais sistêmica? De que forma, os modos operacionais da ontogenia contribuem para um entendimento sistêmico dos caminhos evolutivos? Por que entender o desenvolvimento que, aparentemente, tem sua ação restrita à dimensão molecular, viabilizaria a visualização da integração dos fenômenos biológicos?

A partir de um trânsito entre os diferentes contextos de produção de conhecimento referente à evolução biológica, ensejamos explicitar as lacunas conceituais que propulsionaram as discussões sobre a necessária integração do conhecimento biológico e como a retomada de algumas objeções teóricas e empíricas denunciam a proximidade epistêmica entre o Darwinismo, a Teoria Sintética e as abordagens evolutivas contemporâneas.

CAPÍTULO 2

1- UM PREÂMBULO INVITATÓRIO: COMPÊNDIOS SOBRE A NECESSIDADE DE (RE) PENSARMOS O PAPEL DA SELEÇÃO NATURAL: “COMO A EVOLUÇÃO FORJOU A GRANDE QUANTIDADE DE CRIATURAS QUE HABITAM O NOSSO PLANETA”?

A paráfrase a um dos mais célebres autores que escreveu sobre a biologia do desenvolvimento, Sean Carroll, é justificada pela nossa atenção a toda diversidade orgânica existente (e as formas já extintas) e suscita especulações acerca da criação e/ou origem de cada uma dessas formas ao longo do tempo evolutivo.

Se pararmos para pensar na quantidade de formas orgânicas existentes no planeta, seria quase impossível não imaginarmos mecanismos que operem de forma atípica mesmo que não saibamos a natureza específica desses mecanismos- para que seja, de fato, possível existir ou terem existido tantas formas. Sugiro que façamos o exercício- para que eu não precise citar ou descrever- de lembrar-se de vários organismos que já nos deparamos, seja pessoalmente, ou em um livro didático, ou em uma página da internet ou ainda em um exemplo dado pelo professor ou colega.

Se nos pronunciarmos acerca desse pensamento entre várias pessoas (colegas de classe, por exemplo), dificilmente citaríamos organismos repetidos. É comum que as experiências tenham sido diferentes e, portanto, a imaginação também.

Pensando assim, seria possível que a evolução fosse concebida a partir de uma perspectiva unívoca? Que a mesma sequência de nucleotídeos sempre originasse a mesma forma? Que a seleção natural fosse o único mecanismo a partir do qual novas formas poderiam ser criadas? Como o processo evolutivo forjou estratégias que possibilitariam um enredo evolutivo tão diverso? De que forma podemos reproduzir a história evolutiva de forma mais verossímil possível com o intuito de resgatarmos incógnitas engendradas há muito tempo?

São essas perguntas que esperamos responder até o final deste trabalho.

1.2 “A seleção natural funciona como mera peneira que deixa passar ou não, sem ter o papel criador que lhe atribui a teoria sintética” (FREIRE-MAIA, 1988, p.56).

Freire-Maia, já em 1988, nos alertava sobre o limite de ação da seleção natural na evolução biológica por meio de um questionamento acerca do papel de criação desse processo. A revelia dessa crítica, o conceito de seleção natural continuou a exercer

papel causal preponderante (se não único) nos encaminhamentos evolutivos durante muitos anos. Atualmente, o debate referente à possibilidade de expansão do quadro conceitual da Síntese Moderna fundamenta as argumentações epistemológicas na crítica ao DNA-centrismo, na falta de uma interpretação pluralista e sistêmica aos percursos evolutivos e na (de) sincronização entre o quadro teórico apresentado pelo paradigma evolutivo e os avanços das pesquisas empíricas decorrentes, por exemplo, da Evo-Devo.

Por que a seleção natural não tem todo poder de criação que lhe fora atribuído por Darwin e pela Teoria Sintética? Quais as fundamentações epistêmicas e empíricas dos filósofos e biólogos evolutivos para interpelarem reformulações na Síntese ou ainda solicitar a expansão desse paradigma? Por que a diversidade de formas orgânicas incita a existência de um caminho oponível para função criativa da seleção natural?

Darwin atribuiu um papel bastante audacioso à seleção natural ao designar tamanha responsabilidade criatória a esse mecanismo: a seleção natural explicaria tanto a geração de adaptações quanto a de diversidade. Dessa forma, a operação dos processos micro evolutivos ao longo do tempo geológico desencadearia todo espetáculo da história da vida por meio do acúmulo de variações geração após geração. A seleção natural inevitavelmente produziria adaptação; e nas devidas circunstâncias, a adaptação acumulada criaria a especiação. Para o naturalista, o processo evolutivo ocorria de forma gradual. No entanto, a partir de um processo de evolução gradual, como poderiam surgir novas espécies sem que fossem produzidas formas intermediárias? Teria Darwin prospectado sobre a ação da ontogenia nos desmembramentos evolutivos?

1.3 *“Para mim, a embriologia, é, sem sombras de dúvidas, o conjunto de fatos mais contundente sobre a mudança das formas, mas os que estudaram minha teoria não parecem aludir essa ideia” (Charles Darwin, carta a Asa Gray, 10 de setembro de 1860 apud CARROL, 2006).*

Embora Darwin tenha mencionado sobre a importância do desenvolvimento ontogenético na evolução, seria impossível que ele tivesse previsto todo caminho da pesquisa empírica nessa área e, portanto, como o desenvolvimento, de fato, contribuiria para elucidar algumas questões evolutivas que permaneciam controversas. Não sabíamos como as transformações embrionárias ocorriam e nem que as mesmas poderiam operar grandes mudanças morfológicas. A Síntese Moderna explica as grandes diferenças morfológicas diagnosticadas no registro fóssil pela ação da seleção natural sobre as pequenas alterações genéticas ao longo de muito tempo, produzindo as variações interespecíficas. Dessa forma, a inovação morfológica, propiciada pela

macromutação, fora associada a um acúmulo de micromutações sucessivas ao longo do tempo evolutivo.

Assim, a obscuridade relativa ao campo de pesquisa da embriologia não permitia que os pesquisadores da época inferissem sobre a ideia de que a própria ação dos genes que regulam o processo de desenvolvimento poderia gerir a criação de novas morfologias ou ainda restringir a existência de outras. Em contrapartida, para explicar as origens de grandes novidades morfológicas, a Teoria Sintética acabou delegando o poder de criação à seleção natural e a somatização dos sucessivos processos microevolutivos.

É interessante notar que o raciocínio teórico-científico evolutivo não é tão controverso desde Darwin. No entanto, as pesquisas empíricas que forneciam subsídios para as bases teóricas evolutivas eram incipientes e a falta de aprofundamento de estudos em alguns processos configurou condições teóricas hoje desafiadas pela consolidação da Evo-Devo.

Uma (re) visita aos contextos de elaboração da teoria darwiniana, da edificação da Teoria Sintética e das arguições proclamadas pela Evo-Devo nos revela que a diversidade das formas sempre foi uma questão relevante no contexto evolutivo. No entanto, o aprofundamento com que essa questão foi tratada acomodou-se sobre o estágio em que as pesquisas empíricas encontravam-se.

Ninguém sabia melhor do que Darwin a importância de ancorar uma teoria revolucionária nos alicerces de **fatos empíricos**, e ele sabia que só poderia especular, com raras esperanças de conseguir, em sua época, algum retorno substantivo. Afinal, ele nem tinha o conceito de Mendel quanto ao gene, muito menos um dos mecanismos moleculares que o sustentavam. Darwin foi um intrépido dedutor, mas ele também reconhecia quando não tinha premissas suficientes para ir mais adiante (DENNETT, 1988, p.156, grifo nosso).

Darwin já nos atentava sobre a infinidade de formas orgânicas existentes no planeta. Embora essa diversidade morfológica e adaptativa tenha sido mencionada pelo naturalista, haveria ele imaginado que, tantos anos depois, a origem dessas formas aludiria objeções conceituais ao quadro teórico evolutivo? Que a própria diversidade de formas orgânicas seria um indício plausível para que os biólogos evolutivos e filósofos da biologia contemporâneos questionassem o poder de criação atribuído à seleção natural?

Carrol (2006) retoma a relevância da diversidade orgânica e as alusões evolutivas sobre essa diversidade no início de um dos capítulos do livro “Infinitas

Formas de Grande Beleza”, a partir da seguinte citação de Ross Harrison (1913): “É o mistério e a beleza da forma orgânica que nos coloca o problema”. A frase denota a especulações epistemológicas e empíricas atuais e nos convida a uma (re)leitura do darwinismo e da Síntese Moderna, a partir da qual, alguns apontamentos emergem e culminam em argumentações favoráveis a expansão da Síntese. Não houve uma incursão apenas contemporânea acerca do mistério envolvido no surgimento de tantas morfologias distintas. Embora a seleção natural e suas bases empíricas não sustentassem toda explicação acerca do surgimento das formas, era um mecanismo que podia explicar parte do rol fenotípico existente e, portanto, até que as pesquisas empíricas avançassem, foi o grande responsável pela origem das formas até então conhecidas.

A seleção natural foi e ainda é considerado um mecanismo microevolutivo altamente corroborado (ALMEIDA E EL-HANI, 2010; SEPÚLVEDA, MEYER E EL-HANI, 2011). No entanto, para o darwinismo e a Teoria Sintética, esse mecanismo é suficiente para explicar tanto a micro quanto a macroevolução, sendo necessário apenas o complemento de mecanismos que expliquem a separação de populações e a interrupção do fluxogênico, para dar conta da origem de novas espécies (ALMEIDA E EL-HANI, 2010).

Dessa forma, mesmo quando nos referíamos ao surgimento de novos planos corporais ou ainda a alterações fenotípicas repentinas, essas novidades e/ou explosões morfológicas eram atribuídas à ação da seleção natural.

Essas questões serão tratadas ao longo da tese de forma que consigamos estruturar um arcabouço teórico que falicite a compreensão da perda de credibilidade criativa da seleção natural e porque essa perda influenciou a tendência de uma expansão na Síntese Moderna. É fato que estamos diante de uma plêiade de complilações teóricas, ou como chamou Caponi (2005) de uma “obstinada hidra epistemológica” (p.234) e precisamos analisar com cautela porque uma (re)visão na Biologia evolutiva tem sido tão aclamada sem, no entanto, romper com toda teoria já proposta. Sobre evolução, muito do que se pensava há décadas foi acrescido com dados de pesquisas mais recentes, enquanto algumas ideias basais permaneceram inalteradas. O trabalho de Darwin, por exemplo, deixou um legado fundamental para biologia evolutiva, balizado em evidências sobre a transformação das espécies ao longo do tempo, principalmente a partir da teoria da seleção natural. Ainda hoje, para subsidiar explicações evolutivas mobilizamos muitos argumentos propostos por Darwin (MEYER E EL-HANI, 2005). Dessa forma, é notório que não pretendemos romper com o passado, mas (re) visita-lo

com o intuito de resgatar lacunas e/ou obscuridades que não puderam ser respondidas com tanta clareza e, então, prospectaram reverberações em pesquisas futuras.

A interface entre o passado e o presente pode ser estabelecida se buscarmos em que momento a falta de dados empíricos impossibilitou que a pesquisa teórica e epistemológica fosse estruturada tal como é hoje e tal como será no futuro. O que seria da ciência se não fosse contingente? Se o passado não formatasse inferências e possibilidades? Se o presente não carregasse o legado de responder e desafiar o que já está “consolidado”? E se Darwin tivesse feito sua pesquisa na década de 1980?

Não admira que Darwin não tenha encontrado um mecanismo detalhado de hereditariedade. Como você imagina que seria a atitude dele diante da especulação de que dentro do núcleo de cada uma das células do seu corpo havia uma cópia de um conjunto de instruções, escrita em enormes macromoléculas, na forma de hélices duplas firmemente enroscadas em espirais formando um conjunto de quarenta e seis cromossomos? (DENNETT, 1998).

O naturalista não sabia nada sobre genes, leis de Mendel ou DNA, uma vez que esses conceitos só se tornaram parte da teoria evolutiva no século XX. Apesar disso, a teoria de Darwin dependia da presença de diferenças herdáveis entre os indivíduos (JABLONKA E LAMB, 2010). A falta de uma boa teoria da hereditariedade e de uma explicação para a variação era uma frustração constante para Darwin e seus seguidores e o naturalista tentou propor uma teoria para amenizar essa lacuna.

Darwin defendia que caracteres adquiridos transformavam-se em hereditários, afirmação que caracteriza a aproximação do darwinismo ao lamarckismo. O naturalista sustentava a hereditariedade de caracteres ganhos durante a vida do indivíduo por meio da teoria da pangênese, a partir da qual as partes do organismo enviariam partículas representativas (gêmulas) para compor os gametas. Assim, se uma região do corpo se alterasse, as partículas que as representavam também se modificariam. A pangênese surgiu por pura especulação, sem experimentação alguma e foi amplamente rejeitada no momento em que o mendelismo ganhou reconhecimento. (FREIRE-MAIA, 1988)

É claro, Darwin é o homem que a duras penas descobriu um exército de complexidades assombrosas nas vidas e corpos de cracas, orquídeas e minhocas e as descreveu com óbvia satisfação. Se, em 1859, ele tivesse tido um sonho profético sobre as maravilhas do DNA, sem dúvida teria se divertido muito (DENNETT, 1998).

Hoje, muitos biólogos e filósofos discutem acerca da complexidade da teoria evolutiva e da necessidade de um entendimento mais sistêmico dos fenômenos

evolutivos, indicando que outros fatores- sem prescindir a ação dos subsequentes- além da reprodução, hereditariedade e variabilidade também possam responder/ e ou participar sinergicamente das questões evolutivas. Ao recorreremos apenas à seleção natural para determinar a história de alguns traços observados entre os seres vivos, algumas lacunas aparecem e a explicação poderia ser encontrada, por exemplo, na influência desenvolvimento ontogenético do organismo ou na mudança ambiental em sua história evolutiva. A biologia evolutiva do desenvolvimento ou Evo-Devo -uma área de estudo relativamente recente- explica tanto processos de restrições ao aparecimento de certos traços, como a possibilidade do aparecimento de outros e, portanto, pode responder a muitas questões evolutivas controversas já consolidadas pelos pressupostos da Teoria Sintética e pelo darwinismo.

É de suma importância que estudantes de Ciências Biológicas tenham conhecimento sobre as relações da biologia evolutiva com outros fatores além da seleção natural, dada à relevância da natureza integrada para a estrutura das Ciências Biológicas.

Assim, armando-se de uma (re) leitura epistemológica sobre o contexto de ação da seleção natural, esperamos prospectar subsídios para posteriores inferências sobre como a biologia evolutiva sobre uma abordagem sistêmica e integrada deve ser tratada e/ou inserida em aulas da disciplina de evolução no Ensino Superior.

2- DARWIN E A SELEÇÃO NATURAL: UM ENSAIO SOBRE UMA EXPLICAÇÃO ACERCA DA DIVERSIDADE ORGÂNICA.

“Darwin precisou formular um tipo totalmente diferente de explicação, que fosse compatível com a abundância de variação encontrada na natureza. Isso o levou à teoria da seleção natural, que se baseava no pensamento populacional” (MAYR, 2009, p.112).

A incógnita darwiniana sobre a diversidade orgânica encontrada na natureza, certamente suscitou no naturalista devaneios e inferências sobre o que teria originado tamanha diversidade. Entretanto, em meio a tantas dúvidas e possibilidades, o que levou Darwin a formular a ideia de seleção natural? E por que, para Darwin, a seleção seria o mecanismo capaz de gerar todas as formas?

Darwin preocupava-se em explicar como as espécies surgiriam na natureza. Como ocorreria o aperfeiçoamento de todas essas adaptações maravilhosas que vão

modificando o organismo parte por parte, em função das condições de vida que ele suporta, acabando por transformá-lo num ser diferente de seus ancestrais? (DARWIN, 1985, p.85).

A partir do princípio de Malthus, Darwin encontrou fundamentação para explicar como algumas características selecionadas passariam a ter a frequência aumentada em um grupo. A teoria malthusiana descreve que o crescimento populacional excede a capacidade de produção de alimentos que a terra proporciona. Assim, a população tenderia a crescer além dos limites de possibilidades viáveis à sobrevivência (FREIRE-MAIA, 1988).

A luta pela sobrevivência resulta inevitavelmente de maior ou menor velocidade de reprodução dos organismos. Os seres vivos que durante a sua vida normal produzem diversos ovos ou sementes devem ser destruídos durante algum período de sua existência, durante determinada estação, durante um certo ano. Caso contrário, com base no princípio de progressão geométrica, seu número acabaria por tornar-se tão absurdo que nenhum local teria a capacidade de contê-los. Portanto, como nascem mais indivíduos do que o número dos que poderiam sobreviver, sempre haverá uma luta pela existência, seja entre os da mesma espécie, seja entre eles e o de outras espécies distintas, ou seja os indivíduos e as condições e as condições de vida existentes em seu habitat. Trata-se da doutrina de Malthus aplicada com redobrada força a todo o reino vegetal e animal, uma vez que nesse caso não pode ocorrer o aumento artificial dos alimentos ou a restrição prudente dos acasalamentos. Embora algumas espécies possam estar atualmente aumentando em números de maneira mais ou menos rápida, tal fato não poderia ocorrer com todas, uma vez que o mundo não teria condição de sustenta-las (DARWIN, 1985, p.87).

Não há exceção à regra segundo a qual todos os seres vivos aumentam naturalmente numa velocidade tão alta que, se não forem destruídos, logo a terra seria coberta pela descendência proveniente de um único casal (DARWIN, 1985).

Lineu calculou que se uma planta anual produzir apenas duas sementes- e não existe planta que seja assim tão pouco produtiva- e seus renovos de maneira idêntica, produzirem anualmente outras duas sementes a assim, sucessivamente, ao final de vinte anos haveria um milhão de espécimes daquela linhagem. Considera-se o elefante como animal de multiplicação mais lenta. Dei-me ao trabalho de calcular sua provável velocidade mínima de crescimento natural. Calculando-se por baixo sua capacidade de procriação e sua fase de fecundidade, parti do princípio de que cada fêmea poderia dar à luz 3 casais de filhotes, iniciando sua vida fértil aos 30 anos e encerrando- a aos 90. Assim sendo, ao final de cinco séculos, haveria vivos 15 milhões de elefantes, descendentes de um único casal primitivo (DARWIN, 1985, p.88).

Devido a essa luta, algumas características e/ou variações, desde que se apresentem úteis no que se refere aos mais complexos contextos de interações entre as espécies e o meio ambiente, deverão ser herdadas e, portanto, manifestadas por gerações seguintes. “A esse princípio através do qual toda variação, por menor que seja, deve preservar-se, desde que apresente utilidade para o indivíduo, denominei Princípio de Seleção Natural” (DARWIN, 1985, p.86).

A seleção natural apenas possibilitaria o aumento da frequência dos fenótipos favorecidos à determinada pressão seletiva ou também criaria formas orgânicas inéditas?

De fato, Darwin achou que esse mecanismo explicaria tanto a diversidade e a manutenção das características quanto o surgimento de novas espécies. A geração de adaptações e a geração de diversidades são aspectos diferentes de um único fenômeno complexo e a visão unificadora, ele dizia, era o princípio de seleção natural. A seleção natural inevitavelmente produziria adaptação; e nas devidas circunstâncias, ele argumentou, a adaptação acumulada criaria a especiação (DENNETT, 1998).

Ao afirmar que a seleção seria responsável tanto pela geração de adaptações quanto pela geração de diversidade, Darwin, abriu possibilidade para as mais consolidadas críticas a sua teoria: a crítica ao gradualismo (que fez-se de forma mais veemente a partir da teoria do equilíbrio pontuado) e a crítica ao programa adaptacionista. Essas críticas- tratadas com maior aprofundamento em partes subsequentes- endossadas pelo desenvolvimento da pesquisa ontogenética são pontos cruciais do debate que, atualmente, proclama a necessidade de expansão da Teoria Sintética.

Para Darwin, a diversificação maior em espécies ocorreria devido à variedade de habilidades ou atributos herdáveis em uma população (de uma única espécie). Tais habilidades ou atributos diferentes tenderiam a ter desfechos diferentes para diferentes subgrupos de população, e essas subpopulações, portanto, tenderiam a divergir, cada uma buscando seu tipo preferido de excelência, até que, por fim, os caminhos se separariam totalmente. No entanto, por que essa divergência levaria à separação ou aglomeração das variações, em vez de permanecer como um leque mais ou menos contínuo de ligeiras diferenças? O simples isolamento geográfico era parte de sua resposta; quando uma população separa-se devido a um evento geológico ou climático maior ou por emigração acidental para um âmbito isolado, como uma ilha, por exemplo, essa descontinuidade no ambiente acabaria propiciando essa descontinuidade nas

variações úteis observáveis nas duas populações. E uma vez que a descontinuidade se consolidasse, culminaria na separação em espécies distintas (DENNETT, 1998).

Embora a seleção natural não explicasse a origem das formas repentinas, mas apenas o acúmulo gradual das micromutações, que muitas vezes não apareciam nos registros fósseis, o raciocínio dos oponentes seguia-se da seguinte forma: “não vejo ainda como refutar essa objeção, ou superar esta dificuldade, mas visto que não consigo imaginar outra coisa, a não ser a seleção natural como a causa dos efeitos, terei de admitir que a objeção é espúria; de alguma forma a seleção natural deve bastar para explicar os efeitos”(DENNETT, 1998, p. 49).

Esse trecho é um indício quase evidente da forma que a pesquisa teórica consolida-se e está, também, suscetível a refutações e questionamentos engendrados em contextos posteriores. Se arriscássemos prospecções acerca dessas reverberações, certamente poderíamos afirmar que a seleção natural seria o cerne disso, uma vez que, embora fosse uma contribuição laudável para biologia evolutiva, não sustentaria toda semântica causal que lhe fora atribuída. Mas por que então, toda essa capacidade criativa lhe fora dada?

Em qualquer ramo da ciência, a estrutura de uma teoria nunca será permanente. Ao longo do tempo, os potenciais heurísticos mudam de foco, engendram novos questionamentos e “desmascaram” conceitos já consolidados. Essa vulnerabilidade, embora não tangível, pode ser justificada, principalmente, pela inviabilidade de uma sincronia perfeita entre a pesquisa teórica e a empírica. Embora quase totalmente interdependentes, essas pesquisas não são produzidas na mesma velocidade. Quando, em algum momento, a pesquisa empírica avança, os pressupostos oriundos desse avanço desafiam aquilo que, teoricamente, está posto. Foi exatamente assim com o conceito da seleção natural e sua função no processo evolutivo: um papel preponderante e quase único por muitos anos; o âmago dos debates epistêmicos contemporâneos.

3- TEORIA SINTÉTICA, SELEÇÃO NATURAL E APONTAMENTOS EPISTEMOLÓGICOS.

O esquema neodarwinista representa uma teoria obviamente sujeita a mudanças futuras. No entanto, é bom lembrar que se esse esquema funciona muito bem para os níveis inferiores da evolução (micro e mesoevolução), ele apresenta dificuldades para explicar a origem dos grandes grupos sistemáticos (megaevolução). Na origem de uma raça estariam os mesmos fatores que atuaram para formar os vertebrados, os mamíferos, os primatas, o homem? O neodarwinismo moderno diz que sim. (FREIRE-MAIA, 1988, p.66)

Embora nosso texto exponha algumas objeções tanto teóricas quanto empíricas aos conteúdos apresentados pela Teoria Sintética é reiteradamente claro que não defendemos a obsolescência desse paradigma ou invalidamos os pressupostos já consolidados por ele. O objetivo é resgatar as transições epistêmicas cuja natureza impõe uma (re)leitura de conceitos consolidados, mas que precisam ser entendidos em outros contextos de produção, sob perspectivas de pesquisas mais recentes.

Se estivermos sugerindo uma expansão dos pressupostos consolidados pela Teoria Sintética, precisamos entender que pressupostos são esses e, por que, as (re)leituras contemporâneas sugerem essa expansão.

Entre os anos de 1930 e 1940, é acrescida ao quadro teórico da biologia evolutiva, a construção e fundamentação das ideias de Fisher, Haldane e Wright, no âmbito da genética de população, as quais foram cristalizadas na Síntese Moderna. Embora vários autores e livros sejam usualmente citados em consonância à Síntese Moderna, para Pigliucci (2007), as três maiores contribuições, foram as de Dobzhansky, Mayr e Simpson. O livro do primeiro, e a sua famosa série de artigos “genética de populações naturais”, traduzia as novas ideias da genética de população para uma prática empírica, subjacente a demonstração da existência de uma ampla variação genética na natureza. O livro de Mayr (1942) trouxe uma sistematização das novas ideias, principalmente no que se concerne ao conceito biológico de espécie a estruturação de um pensamento evolutivo centrado na população. Finalmente, Simpson (1944), argumentou que o tempo e o modo da evolução entendidos na genética de populações eram compatíveis com o que os paleontologistas chamavam de escala geológica, assim, eliminava qualquer distinção controversa entre micro e macro evolução, com conotação saltacionista (PIGLIUCCI, 2007).

A edificação da Síntese Moderna ocorreu nos anos de 1930 e 1940 e fora constituída por contribuições de geneticistas, sistematas e paleontologistas. O principal conteúdo da Síntese debruçou-se sobre uma (re) conciliação entre os princípios

darwinianos (que careciam de uma explicação sólida hereditariedade, já que Darwin desconhecia os genes), e as contribuições genéticas.

Ronald A. Fisher e John B.S. Haldane na Inglaterra e Sewall Wright nos Estados Unidos, tomando como base os dados da genética, desenvolveram uma teoria matemática da genética de população, que mostrou que é a conjunção de mutação e a seleção natural (entre outras coisas) que causa evolução adaptativa: a mutação não é uma alternativa para seleção natural, mas é quase sua matéria prima. Pesquisadores como Sergei Chetverikov e Theododius Dobzhansky mostraram que populações naturais não são uniformes; elas contêm variantes genéticas que incluem os mesmos tipos de variantes que tinham aparecido por mutação em linhagens de laboratório (FUTUYMA, 199, p.25).

Os principais pressupostos referenciados pela Síntese Moderna são os seguintes: (1) as populações evoluem por mudanças nas frequências gênicas resultantes da deriva genética, do fluxo gênico, e especialmente, da seleção natural; (2) a maior parte das variantes genéticas adaptativas apresenta pequenos efeitos fenotípicos individuais, de tal modo que as mudanças fenotípicas são graduais, (3) a hereditariedade ocorre pela transmissão de genes de linhagens germinativas com informações sobre os caracteres, (4) a variação se origina da combinação entre alelos gerados na reprodução sexuada, que apresentam efeito fenotípico (5) mutações surgem de alterações acidentais não causados pelo desenvolvimento do indivíduo (6) a seleção natural ocorre entre os indivíduos, por meio de seus fenótipos mais adaptados ao ambiente em relação aos outros indivíduos, de modo que alguns alelos se tornam mais frequentes em uma população. (JABLONKA; LAMB, 2010)

Embora esses pressupostos estejam muito bem estabelecidos até os dias atuais, Freire-Maia (1988), já havia prospectado a vulnerabilidade do esquema neodarwinista a algumas objeções futuras. Esse esquema subsidia os processos em níveis de microevolução, mas apresenta dificuldades para explicar a origem dos grandes grupos (macroevolução).

Tanto para Darwin quanto para Teoria Sintética, a evolução ocorre por meio de um processo cumulativo e gradual, sem saltos, com diferenças que alteram a população numa escala de tempo longa, gerando ao longo de um tempo ainda maior, a diversidade de formas existente (MEYER; EL-HANI, 2005).

Julian Huxley, em 1942, afirma que a evolução gradual está nas pequenas alterações genéticas que originam as variações sobre as quais atua a seleção natural,

enquanto a evolução de níveis taxonômicos superiores é explicada também pelo processo gradual, só que após longos períodos (CARROLL, 2006). Assim, também na Teoria Sintética, a evolução ocorre pelos mesmos fatores em todos os níveis: espécies, gêneros, famílias, ordens e outros.

Antes da Teoria Sintética, os estudos referentes à macroevolução foram preocupação exclusiva de paleontólogos. No entanto, o cunho desses estudos não tinha conexão alguma com genética ou especiação, uma vez que muitos paleontólogos nem eram darwinistas. Devido à falta de continuidade entre os fósseis, o esteio da paleontologia foram as teorias saltacionistas, que confrontavam com o gradualismo proposto por Darwin e mais tarde, reafirmado pela Teoria Sintética (MAYR, 2011).

Se os registros fósseis não continham toda diversidade de formas orgânicas já descritas, como Darwin e a Teoria Sintética explicaram esse “gradualismo” evolutivo?

Para justificar essa mudança gradual das populações ao longo do tempo, os pressupostos da Teoria Sintética situaram a seleção natural sobre um papel causal exclusivo: apenas esse mecanismo seria responsável pela acomodação das estruturas orgânicas às exigências da luta pela existência. A seleção natural, então, mostrou-se como mecanismo produtor de diversidade, como possibilidade única para explicar a diversificação de formas a partir de um ancestral primitivo comum (CAPONI, 2011).

A Síntese Neodarwiniana foi então, resultado de compilações e contribuições teóricas e empíricas, principalmente advindas da genética de populações. A consolidação dessa área permitiu que a evolução fosse descrita e medida como mudanças nas frequências gênicas das populações. Essas mudanças, para os geneticistas de populações, são resultantes da interação de quatro mecanismos evolutivos: mutação, deriva genética, migração (fluxo gênico) e seleção (BRZOZOWSKI, 2007). Esses elementos sustentaram a possibilidade de toda ocorrência evolutiva e esse é, também, um ponto crucial do raciocínio que estamos tentando traçar até aqui.

A mutação, a deriva genética, a migração e a seleção natural explicariam qualquer mudança evolutiva, fosse ela microevolutiva ou macroevolutiva. Essa concepção é o que, mais tarde, culminaria em necessárias intercorrências e reformulações acerca dos mecanismos evolutivos.

Uma vez que a ciência é estabelecida, o quadro conceitual da mesma tem uma tendência maior a se expandir do que a ser substituído, uma vez que o novo modelo não é incomensurável com o mais antigo, mas pode ser interpretado como um caso limitante ou ainda mais amplo do que o antigo (PIGLIUCCI, 2007).

O darwinismo é uma teoria complexa, um pensamento ratificado na história da biologia a partir do qual, estruturou-se um dos grandes paradigmas dessa ciência. Mas, como qualquer programa de pesquisa, ao longo do tempo, pode ser continuamente modificado e incrementado. Isto já era verdade antes da Síntese Moderna e continua sendo ainda hoje (MAYR, 2006).

Embora a Teoria Sintética seja um alvo oponível para epistemólogos e filósofos da biologia, não podemos dizer que, a elaboração dessa teoria não foi e é fundamental até hoje e que todo esteio necessário para sua formulação foi consonante ao que poderia ser realizado na época. Assim, as lacunas enxergadas (a começar pela crítica ao gradualismo e ao programa adaptacionista na década de 1970), são resultados de pesquisas que contemplam algumas vertentes empíricas inexistentes na época.

Por exemplo, Mayr (2006) não concorda com a crítica realizada à Teoria Sintética no que se concerne as questões ontogenéticas. “Qualquer Darwiniano fica confuso quando lê, na crítica de um embriologista, que o “desenvolvimento... ainda é um problema ininteligível dentro do neo-darwinismo”(p. 148).

O desacordo de Mayr (2006) está lastreado na argumentação de que traduzir o programa genético em cadeias de eventos moleculares durante o processo ontogenético não é trabalho para um evolucionista e, portanto, não podemos falar de uma “lacuna”.

Além disso, outros aspectos do desenvolvimento estão articulados com o pensamento evolutivo, desde Darwin, uma vez que cada estágio do desenvolvimento é um alvo da seleção, particularmente quando os estágios larvais são de vida livre; esses estágios embrionários são como “programas somáticos” no desenvolvimento. Esses estágios guardam uma alta tendência à conservação durante a evolução (por exemplo, o estágio do arco branquial no embrião dos tetrápodes), o que colabora para reconstrução da filogenia.

Nenhum Darwiniano questionaria a importância do desenvolvimento para evolução, mas a interpretação evolutiva é limitada pelo grau com que as causas imediatas do desenvolvimento tem sido elucidadas pelos embriologistas. Empreender um estudo de tais causas não é tarefa para um evolucionista (MAYR, 2006, p.148).

Mayr (2006) ainda argumenta que não há como anteciparmos determinados pontos teóricos, quando não há dados empíricos para isso. Assim como no contexto de edificação da Teoria Sintética não havia estudos referentes à biologia molecular, natureza química do material hereditário ou a arquitetura dos cromossomos eucariotos, na primeira revolução Darwiniana a genética não havia sido descoberta e ambas as

teorias contribuíram muito para a consolidação dos pressupostos evolutivos durante muitos anos (MAYR, 2006).

Dada a natureza da ciência, o contexto de produção científica, o dinamismo da atividade científica e como consequência do próprio conceito, quase toda teoria científica requer uma revisão e, possivelmente alguma suplementação, mesmo que essas mudanças não atinjam, necessariamente, o núcleo da teoria (MAYR, 2006). Não obstante as revisões e os acréscimos da teoria de Darwiniana, o núcleo dessa teoria não fora refutado ou reformulado.

Para Mayr (2006), algumas objeções poderiam interpelar a Síntese Moderna, uma vez que como toda teoria, essa não “guarda” todos os encaminhamentos da pesquisa futura. Para o autor, essas compilações teóricas que ora refutam, ora complementam as premissas desse paradigma, nada mais são do que o curso natural de uma ciência. No entanto, nenhum contraponto seria consistente e/ou oponente o suficiente para derrubar o que já foi consolidado pela Síntese.

É possível fazer uma análise prospectiva dos eixos temáticos que estão sujeitos a avanços empíricos. No entanto, esses avanços só confirmarão ou aperfeiçoarão as perspectivas já existentes:

Se alguém me perguntar quais fronteiras da biologia provavelmente deverão sofrer os maiores avanços nos próximos dez ou vinte anos, eu diria que deve ser a elucidação da estrutura do genótipo e o papel do desenvolvimento. A visão reducionista e simplista da relação entre genótipo, desenvolvimento e evolução é que cada gene é trazido dentro de um correspondente componente do fenótipo e que as contribuições de cada um desses componentes para aptidão do organismo resultante determina o valor seletivo dos genes. Existe alguma verdade nesta visão, mas ela simplifica demais as atuais conexões. Isso já era em compreendido, desde os tempos de Darwin (MAYR, 2006, p.150).

Estamos em pleno acordo com o autor, uma vez que a sincronização entre pesquisa teórica e/ou epistemológica e empírica é um eixo fundamental para o caminho e produção de uma ciência. Devemos sim, preocupar-nos em ampliar o quadro conceitual apresentado pela Síntese. No entanto, devemos atentar-nos para as articulações e prospecções que a própria síntese já tinha indicado no momento de sua formulação.

Apenas para darmos continuidade a nossa argumentação, é importante que recapitulemos as premissas basais da Teoria Sintética que pode ser resumidamente definida pela fusão da teoria darwiniana e dos avanços da genética posterior. A partir da

seleção natural e da adaptação, essa teoria afirma que a evolução é lenta e gradual e pode ser explicada por meio de pequenas mudanças genéticas e recombinações, seguidas do ordenamento dessas variações pela seleção natural cujo intuito seja a otimização da adaptação dos organismos ao meio em questão. Para os defensores da Teoria Sintética, o gene é o locus privilegiado de transformação das espécies. (FELIZARDO, 2005).

Esses pressupostos começaram a ser alvo de intercorrências empíricas e teóricas a partir de 1970 e a ênfase das críticas recaiam, principalmente sobre os mecanismos responsáveis pelo processo evolutivo,

Os maiores responsáveis pelas críticas foram Eldredge e Stephen Jay Gould, e dentre essas críticas, três são fundamentais: I - A primeira foi empreendida pelo autor em 1972 e levou à teoria do equilíbrio pontuado; é uma crítica dirigida ao ritmo gradual da evolução, conforme sustentam os adeptos da nova síntese; II - A segunda é conhecida como crítica ao programa adaptacionista, foi empreendida em 1979, e é focada sobre a noção neodarwinista de que todas as características dos organismos resultam do modo como eles se adaptam para sobreviver e gerar descendência; III - A terceira crítica é uma retomada detalhada dos pontos anteriores, na tentativa de demonstrar como algumas das noções da biologia evolutiva contemporânea levam à idéia de contingência do processo evolutivo e, onseqüentemente, à necessidade de revisão naquilo que deve ser explicado pela teoria evolutiva contemporânea (FELIZARDO, 2005, p 42.).

A síntese neodarwiniana foi um consenso limitado (GOULD, 2002) já que algumas disciplinas biológicas, como a biologia do desenvolvimento e o estudo da macroevolução não integraram essa teoria. No entanto, a partir da década de 1970, há esforços renovados em integrar esses campos à biologia evolutiva (BRZOZOWSKI, 2007).

A Teoria Sintética é capaz de responder pelas características gerais da evolução, e “nenhum dos eventos evolutivos descobertos até agora é incompatível com a teoria”. Ainda assim, a teoria geral dos mecanismos evolutivos pode ser considerada incompleta e não faz previsões para a maioria dos eventos evolutivos individuais “Em outras palavras, ela requer uma teoria da biologia do desenvolvimento” (FUTUYMA, 2009, p.649).

Assim, o cenário de debates e modulações teóricas contemporâneas referentes à biologia evolutiva tem como proponente principal a estruturação de uma Síntese Estendida embasada na unificação entres teorias de gene e forma (PIGLIUCCI, 2007).

Diferentemente do que ocorreu ao legado transformacionista e transmutacionista, todas as tentativas de refutar as premissas básicas do darwinismo foram invalidadas e esse paradigma permanece inalterado até os dias atuais.

Além disso, não houve proposições de novas teorias evolutivas nos últimos cinquenta anos, ou nenhuma proposta alcançou de forma significativa o âmbito científico de forma a desafiar as premissas até então estabelecidas pela Síntese Moderna. A falta de teorias desafiadoras é um indício de que o processo de evolução biológica foi completamente entendido? Que todos os detalhes processuais foram bem esclarecidos?(MAYR, 2009).

Esses questionamentos apontados por Mayr também acentuaram nossas especulações investigativas acerca dos caminhos da pesquisa em evolução, uma vez que os avanços nas pesquisas empíricas fomentaram uma perspectiva mais pluralista para o entendimento do processo evolutivo. Esse pluralismo não é um indício de que a Teoria Sintética não fora bem elaborada ou compreendida, mas retoma questões referentes à forma, de acordo com objeções bastante delhadas e plausíveis.

O ponto relevante em nossa discussão é que a primeira versão da teoria evolutiva começou como uma teoria da forma. E o que estamos a fazer é retomar essa perspectiva, restituir a importância das formas no contexto das explicações evolutivas (PIGLIUCCI, 2007). Ou seja, estamos a confabular sobre um percurso epistêmico coerente, a partir do qual, consigamos entender como a perspectiva transformacional “voltou” a ser parte fundamental das questões evolutivas, dessa vez ao lado da perspectiva transformacional.

Embora Mayr não mencionasse explicitamente o termo Evo-Devo, já prospectava alguns possíveis entraves associados a respostas evolutivas, principalmente no que se concerne a ações referentes ao genótipo, “especialmente em casos extremos como a evolução rápida e a estase completa, precisamos admitir que muita coisa nos escapa” (MAYR, 2009, p.130)

Meyer e El-Hani (2005) justificam essa “lacuna” da ação genotípica por meio do seguinte questionamento: “Aceitamos que a seleção natural explica as pequenas alterações evolutivas, mas ela também é capaz de explicar grandes mudanças na árvore da vida”? (p.79).

Para Darwin, as grandes mudanças evolutivas ocorreram por meio de sucessões de mudanças menores que se acumulariam, ou seja; nas palavras do naturalista, a natureza não dá saltos.

Esse aspecto da teoria de Darwin era audacioso. Ao defender um processo evolutivo gradual e baseado na conversão de diferenças entre indivíduos de uma população em diferentes espécies, ele oferecia uma única teoria capaz de explicar todos os níveis de diversificação das formas vivas. Mas o gradualismo de Darwin abria um flanco para críticas: há grandes lacunas na diversidade do mundo natural; nem sempre encontramos os intermediários que explicam a transição entre espécies. Essas lacunas foram atribuídas por Darwin, entre outras razões, a falhas do registro fóssil: um organismo parece surgir abruptamente na história da vida na Terra, mas na realidade, o que ocorre é que não foram encontrados vestígios de seus antecessores, os quais relevariam os passos intermediários, percorridos até chegar a ele (MEYER E EL-HANI, 2005, p.37).

O gradualismo ressaltado por Darwin e a incipiente pesquisa sobre genes e desenvolvimento não permitiu que questionamentos acerca da conservação e origem dos planos corporais fossem acrescidos à evolução. A seleção natural foi suficiente para explicar todos os fenômenos de mudança evolutiva. Para Mayr (2009), a estrutura do genótipo é talvez o mais desafiante dos problemas remanescentes da biologia evolutiva.

Para Pigliucci (2007), a teoria evolutiva mudou de uma teoria das formas para uma teoria de genes e agora, há necessidade novamente de referências consistentes relativas à teoria da forma, coerente aos avanços de pesquisas que possibilitaram a consolidação do campo de estudo da Evo- Devo. Notemos, portanto, que o autor menciona a necessidade de referências veementes acerca da perspectiva transformacionista, sem, no entanto, sucumbir com a seleção natural ou a perspectiva transformacionista. Como essa articulação e/ou fusão de teorias poderia ser possível e/ou factível a partir de uma abordagem pluralista?

4- UMA TENTATIVA DE SINCRONISMO ENTRE O “NOVO” E O “VELHO”: UM PRIMEIRO INDÍCIO DE QUE A EVO-DEVO GUARDA ORIGENS NO PASSADO.

“Que limites podem ser dados a esta força, agindo durante longas eras e rigidamente investigando toda a constituição, estrutura e hábitos de cada criatura-favorecendo o bom e rejeitando o mau? Não vejo limites para essa força, ao adaptar harmoniosa e lentamente cada forma às relações mais complexas da vida” (Charles Darwin, Origem, p. 469 apud CARROL, 2006).

As evidências empíricas sobre as quais Darwin apoiava-se para ostentar sua hipótese sobre a ocorrência da evolução, foram, primeiramente, os registros dos criadores de variedades domésticas de vegetais e animais e, secundariamente, certas

observações biogeográficas que pareciam reforçar a idéia de luta pela existência. No entanto, essas evidências pareciam fracas e indiretas quando comparadas com as fundamentações apresentadas pelos fisiólogos- e esse era um embate bastante reiterado entre as perspectivas transformacional e seletional: Qual dessas apropriava-se de dados empíricos mais convincentes? Qual dessas poderia fazer-nos visualizar as bases evolutivas? (CAPONI, 2005).

A prova definitiva da existência de uma força ou de um mecanismo tinha que ser experimental, de modo que um experimento biológico não podia ser outra coisa do que um experimento fisiológico- e nesse momento a fisiologia ganhava muita credibilidade junto aos teóricos evolucionistas (CAPONI, 2005).

A primazia da fisiologia propugnada pelas teorias transformacionais também parecia ancorada em razões de cunho metodológico, uma vez que, por operar em nível individual, caso não pudesse ser experimentalmente manipulada, poderia ter sua ação verificada por procedimentos de observação consagrados, tais como as viviseções do fisiólogo ou as dissecações do anatomista. Essa validação empírica estava muito longe de ocorrer com as forças aceitas pelo darwinismo (CAPONI, 2005).

É só a partir da década de 1940 que as pesquisas empíricas fundamentam, de fato, a perspectiva seletional- mais precisamente a seleção natural. O uso das caixas de população, orientado pelos modelos matemáticos da genética de populações, viabiliza o desenho de experimentos biológicos não fisiológicos capazes de mostrar a eficácia e o possível alcance da seleção natural como agente da mudança evolutiva (CAPONI, 2003). “Só então, quando as populações se transformaram em objeto de experimentação, é que os direitos e os poderes da seleção natural foram definitivamente reconhecidos” (CAPONI, 2005, p.238).

Mesmo após a edificação da Síntese Moderna, muito do caminho da seleção natural continuou obscuro. Uma vez que esse mecanismo é o âmago da teoria evolutiva darwiniana, deveríamos compreender muito mais detalhadamente a ação seletiva do que o fazemos. No entanto, muitos estudos sobre seleção natural tendenciam a focar em estatísticas preliminares de uma avaliação da covariância da característica- adaptável, mesmo que isso seja inadequado pelo seu próprio padrão interno de replicação e poder estatístico. Estudos sobre seleção natural cuja ênfase seja dada às interações ecológicas são difíceis de encontrar e nós temos quase nenhum entendimento de como essas interações/relações atuam na evolução das novidades fenotípicas ou durante as principais transições na evolução (BELL, 1997).

É preciso explicar, por exemplo, em quais situações ecológicas organismos muito diferentes da média morfológica de suas populações podem levar vantagem, relativamente a outros organismos, tendo mais sucesso na obtenção de recursos e, assim, na sobrevivência e reprodução (ALMEIDA E EL-HANI, 2010).

Este também é um ponto bastante relevante na história evolutiva que estamos elaborando e/ou tratando, uma vez que contempla a dicotomia entre as perspectivas transformacional e seletional ou variacional, estigmatizadas respectivamente a Lamarck e Darwin. Essa dicotomia foi marcada, inicialmente, pela ênfase na perspectiva transformacional, dado todo subsídio empírico que validava essa perspectiva.

No entanto, mesmo com a forte influência dos fisiologistas e das pesquisas empíricas que os amparavam, em muitos contextos, devido às múltiplas e difusas formas que a perspectiva transformacional adotou, a unidade subjacente dessa tradição não-darwiniana ou passou despercebida ou foi erroneamente identificada (CAPONI, 2005).

Assim, talvez, pelo fato de atribuir ao organismo à unidade da evolução, essa perspectiva foi, pejorativamente, associada aos pressupostos Lamarckistas, cujo caminho traçado pela evolução, necessariamente, culminaria em um aumento linear de complexidade do organismo. De fato, Lamarck não abriu espaço para uma interpretação contingencial da evolução, e seria uma claudicação, pensarmos que a perspectiva fisiológica requerida atualmente, também atribui um sentido teleológico para as vias evolutivas.

Caso não nos propusermos a investigar como, de fato, essa perspectiva transformacional contribuiu para o entendimento do processo evolutivo como um todo, possivelmente, não encontraremos argumentos contrários à afirmação de que a ação da seleção natural é responsável por toda propriedade evolutiva (CAPONI, 2005).

Como, atualmente, a perspectiva transformacional adquiriu um status relevante, se não fundamental frente à contribuição para o contexto evolutivo? O que nos faz retomar essa vertente epistemológica e empírica e (re) posicioná-la dentro da teoria evolutiva?

Na teoria lamarckiana, tal como em qualquer outra teoria transformacional da evolução que se possa oferecer o que em definitivo se explica é como os organismos de um determinado tipo chegaram a ter a forma que de fato eles têm. Na teoria darwiniana, ao contrário, o que se procura explicar é a composição da população. Ou, dito de outro modo, aquela explica perfis orgânicos, esta explica perfis populacionais. A dimensão ou a perspectiva populacional não é, nesse sentido, um mero recurso metodológico da biologia evolutiva, não é uma estratégia à qual se apela perante a inviabilidade de outras alternativas. A perspectiva populacional é a própria condição de possibilidade dessa ciência e constitui sua característica definidora (CAPONI, 2005, p. 236).

A consolidação do darwinismo eximiu a perspectiva transformacional- e a fisiologia- dos caminhos evolutivos e atribuiu a ação da seleção natural sobre as populações como primazia do fenômeno evolutivo. A fisiologia precisaria retomar sua posição, impor sua autoridade empírica e epistemológica, fosse por meio de uma articulação, por uma teoria da evolução definitivamente alternativa ao darwinismo, ou pelo acréscimo de conteúdos capazes de restituir as prerrogativas transformacionais.

Foi isso o que, em geral, procuraram sem sucesso as teorias transformacionais da evolução. Elas não punham em dúvida a existência da seleção natural, mas tendiam a minimizar seu papel e sua capacidade para produzir e guiar as grandes mudanças evolutivas. Outras forças deveriam ser apontadas e elas deveriam ser visíveis para o fisiólogo (CAPONI, 2005, p.236).

A dicotomia entre essas perspectivas é marcada, também, pelo foco que caracteriza o objeto sob o qual recai toda ação evolutiva: para os transformacionistas, a evolução atua sobre o organismo, nas modificações individuais desse. Já para os selecionistas, a evolução atua em uma variedade pré-existente em uma população e, a partir das pressões seletivas e da seleção natural, (re) modela, em termos de frequência fenotípica essa população. Mais uma vez, nos deparamos com uma dualidade propiciada pela falta de interpretação integrada da biologia. Não há necessidade de uma verdade processual populacional ou organísmica imperar dentro do quadro da biologia evolutiva. Por isso, quando procuramos argumentos para retomar a perspectiva fisiológica, não estamos rompendo com a populacional: a Biologia é uma ciência sistêmica, de interação múltipla, de elementos cuja ação é sinérgica e, portanto, essas duas perspectivas podem coexistir para que uma interpretação mais tangível e próxima realidade biológica seja possível dentro das especificações evolutivas.

Essa dualidade é apenas o corolário da profunda (re) formatação que a biologia evolutiva está submetida. Uma vez eu nos referimos a uma ciência cuja natureza é

sistêmica- e isso foi bem reforçado em nosso primeiro capítulo- por que insistir em viabilizar apenas uma interpretação ao fenômeno evolutivo? Por que não enxergá-lo por meio de uma dimensão mais plural e integradora?

Em síntese, se nem tudo pode ocorrer no desenvolvimento de um organismo individual, nem tudo pode ocorrer na história evolutiva da espécie, de modo que estudar os limites e os caminhos possíveis desse desenvolvimento é, em última instância, o mesmo que estudar os limites e os caminhos possíveis da evolução. O desenvolvimento de um organismo está limitado e orientado por certas pautas morfológicas e essas pautas limitam e orientam o próprio caminho da evolução. A postulação de restrições ou de coerções, que limitariam e pautariam os possíveis caminhos da evolução, surge, como dissemos no começo, da própria adoção de uma perspectiva transformacional (CAPONI, 2005, p.239).

É fato que as propuganações teóricas referentes ao limite do alcance da seleção natural devem estar ancoradas a alguma fonte empírica rigidamente formulada. Não haveríamos de retomar uma perspectiva já tão criticada pelos anti-lamarckistas, caso não houvesse recursos sólidos para sua fundamentação ou se não quiséssemos responder arguições empiricamente impostas pelos limites de ação da seleção natural. Assim, “essa obstinada hidra epistemológica a qual nunca cessou em insinuar-se como uma genuína alternativa ou um necessário complemento da teoria da seleção natural” (CAPONI, 2005, p. 234), atualmente proclama acerca da incursão da perspectiva transformacional em uma atuação conjunta à seleção natural.

E é exatamente essa complementariedade que enxergamos na Evo-Devo e no que esse campo de pesquisa tem a função de fazer: Retomar a perspectiva transformacional sem prescindir a ação da seleção natural atuando em nível populacional.

A TEORIA SINTÉTICA E MACROMUTAÇÃO: COMO EXPLICAR AS GRANDES E REPENTINAS MUDANÇAS MORFOLÓGICAS?

Para a teoria sintética, a seleção natural constitui um mecanismo suficiente para explicar tanto a micro quanto a macroevolução, sendo necessário apenas o complemento de mecanismos que expliquem a separação de populações e a interrupção do fluxo gênico, para dar conta da origem de novas espécies. (ALMEIDA & EL-HANI, 2010, p.11).

A teoria da seleção natural explica alguns fenômenos como a mudança da composição de uma população, a resistência bacteriana a antibióticos, de pragas agrícolas a inseticidas, e explica ainda, a dificuldade no controle de pandemias como a

AIDS. No entanto, na década de 1960, críticas dirigidas ao poder explicativo da seleção natural começam a incorporar debates na biologia evolutiva. O âmago dessas críticas pautou-se no seguinte questionamento: seria esse processo suficiente para explicar todos os fenômenos evolutivos? (SEPULVEDA & EL-HANI, 2007).

Não há dúvidas de que a partir da seleção natural haverá mudanças evolutivas. No entanto, precisamos atentar-nos a natureza das mudanças evolutivas propiciadas pela ação da seleção natural. É notório que a ação desse mecanismo afeta as populações, alterando promovendo a mudança das frequências gênicas ao longo das gerações e do tempo evolutivo. Mas de que modo as transformações que ocorrem dentro de populações- comumente reconhecidas como processos “microevolutivos” – podem explicar as “infinitas formas de grande beleza” existentes no mundo? (CARROL, 2006). “De que modo, os processos operando dentro de populações explicam os padrões de mudança que enxergamos em grandes escalas de tempo (muitas vezes denominados “padrões macroevolutivos”)”? (MEYER E EL-HANI, 2005, p. 87). A seleção, um mecanismo que explica tão bem as mudanças evolutivas dentro de uma população de organismos- fornece também uma explicação satisfatória para as grandes mudanças que vemos na árvore da vida? (MEYER E EL-HANI, 2005).

A resposta de Darwin era sim. Para ele, o poder explicativo da seleção natural poderia ser extrapolado para além da escala populacional, para abranger todo leque de mudanças evolutivas. A própria ação do acúmulo dos processos microevolutivos ao longo do tempo geológico explicaria todo espetáculo da história da vida (MEYER E EL-HANI, 2005).

No entanto, a observação da natureza impõe desafios para essa assertiva darwiniana acerca da mudança evolutiva: Se as mudanças são graduais e, a partir do acúmulo dessas mudanças, morfologias inéditas podem ser geradas, como explicar a ausência, nos fósseis, das formas intermediárias? É bastante comum encontrarmos seres vivos (ou fósseis de seres extintos) que não são muito semelhantes a nenhum outro ser vivo conhecido. Ou seja, nem sempre é possível unir, por meio de várias formas intermediárias, duas espécies diferentes: formas novas parecem surgir abruptamente no registro fóssil. Esse padrão parece não ser consonante à visão de mundo gradualista, característica do pensamento de Darwin (MEYER E EL-HANI, 2005).

Afinal de contas, em um processo de evolução gradual, como poderiam surgir novas espécies sem que fossem produzidas formas intermediárias? Darwin tinha uma resposta a esse impasse: como o registro fóssil é cheio de lacunas (uma vez que nem

todos os seres vivos que já existiram deixaram vestígios), as transições abruptas seriam consequência da ausência do registo de formas intermediárias, as quais, entretanto, de fato, teriam existido (MEYER E EL-HANI, 2005).

Para Teoria Sintética, a acumulação gradual de diferenças genéticas, principalmente devido à atuação da seleção natural, resulta em novos táxons acima do nível de espécie pelos mesmos processos atuantes neste nível. Dessa forma, a macroevolução poderia ser entendida como a microevolução desenrolada em longos períodos de tempo (RIDLEY, 2006).

A macroevolução pode ser resumida como uma mudança muito rápida em períodos curtos de tempo (MAYR, 2011). São passos evolutivos de maior amplitude que originam novos táxons (como um gênero, uma família ou um filo) a partir de órgãos novos, por exemplo (FREIRE-MAIA, 1988).

A explicação para macromutações por saltos teve respaldo de geneticistas como DeVries e Goldschmidt, que argumentavam que em apenas um passo a partir do processo de mutação, uma modificação seria capaz de originar um organismo novo (JABLONKA & LAMB, 2010).

Ernst Mayr (2011), no entanto, insistia que a macroevolução precisaria ser descrita como um fenômeno populacional, não decorrente de processos extraordinários e diretamente derivada de eventos cumulativos da microevolução. Em 1945, esse autor propõe uma explicação para as lacunas do registo fóssil ao afirmar que populações fundadoras em especiação tendem a não serem encontradas no registo fóssil, mas as populações isoladas e periféricas, sim. E afirma ainda que essas populações periféricas têm maior possibilidade de passar por mudanças evolutivas rápidas.

Eldredge e Gould propuseram, na década de 1970, o Equilíbrio Pontuado. Essa teoria explica a especiação não como um processo gradual ancorado em mudanças cumulativas, mas como rápidos episódios de modificações significativas. Interpondo-se entre os momentos de especiação, encontram-se os momentos de estase. Assim, novos táxons apareceriam sem formação de estágios intermediários (ARAÚJO, 2006). Concluíram ainda que uma espécie que tenha passado pelo processo de mudança, sendo este um processo bem-sucedido, passa por uma fase de estase com permanente ausência de mudanças até a extinção. Quando a modificação ocorrida não é vantajosa, a população pode ser extinta antes mesmo da especiação. Mas se após um período de seleção natural, o genótipo permitir a sobrevivência, a espécie se multiplica e passa a fazer parte do registo fóssil. Essa teoria trouxe aos paleontólogos o respaldo necessário

para a relação entre o registro fóssil e a especiação (MAYR, 2011, MEYER E EL-HANI, 2005).

A primeira ideia do Equilíbrio Pontuado é a de que o registro fóssil reflete o processo de diversificação da natureza, revelando longos períodos sem mudanças na forma das espécies, pontuados por períodos comparativamente curtos em que há mudança intensa no repertório das formas existentes. A segunda ideia do equilíbrio pontuado é a de que a imensa diversidade de formas vivas não resulta da transformação de espécies por seleção natural, mas sim, de mudanças genéticas relativamente abruptas, que ocorrem quando uma espécie dá origem a novas espécies. (MEYER E EL-HANI, 2005).

Assim, essa teoria, confronta as premissas da Teoria Sintética no que tange e/ou caracteriza o ritmo da evolução. Segundo os neodarwinistas, o ritmo evolutivo seria lento e gradual, ou seja, as espécies evoluiriam passo a passo por meio de pequenas mutações ao acaso, orientadas pela seleção natural; a soma das mutações eleitas pela seleção natural ao longo do tempo daria origem a novas espécies. O equilíbrio pontuado contesta a Teoria Sintética e afirma que a vida não evoluiu lenta e gradualmente, porém aos saltos, de forma súbita (FELIZARDO, 2005).

Para realizar esta crítica, os autores se basearam nas lacunas que aparecem no registro fóssil, os buracos fenotípicos, que a teoria sintética não consegue explicar com base no pressuposto gradualista. Se a vida evoluiu de maneira gradual, então deveríamos encontrar também no registro fóssil a lenta transformação das espécies, que seriam um pouco parecidas com as espécies das quais descenderam, e também com as espécies que originaram, o que forneceria um registro gradual das criaturas transicionais. Porém não existem registros de criaturas transicionais. Essa questão levanta a polêmica de que a maior parte das evidências fósseis encontradas até agora negam a transformação gradual de um organismo em outro - o gradualismo evolutivo defendido pela teoria sintética e que é um dos pilares dessa teoria - pois não existem dados paleontológicos que permitam observar a evolução gradual das espécies. O que a nova interpretação dos fósseis nos mostra, pelo contrário, é a transformação súbita de umas espécies em outras (FELIZARDO, 2005, p.43).

A explicação sugerida pelo Equilíbrio Pontuado para entendermos a existência desses “buracos fenotípicos” nos registros fósseis é decorrente do que, de fato, ocorreu na história evolutiva da vida sobre a terra, não a consequência de um registro fóssil imperfeito: o fato de não existir registro fóssil de uma forma, pode ser indício de que essa forma realmente não existiu, mesmo que seja intermediária. Esta ausência de formas transicionais é exatamente o que deveria ser esperado: uma dada espécie de fato

evoluiu de uma forma ancestral aos saltos, sem oferecer nenhuma prova a partir do registro fóssil (FELIZARDO, 2005).

Darwin também se deparou com esse problema em sua obra *A Origem das Espécies*: a disparidade e o descontínuo dos fósseis encontrados nunca permitiram a confirmação da lenta modificação dos traços, prevista por sua teoria (FELIZARDO, 2005).

Nos registros conservados, muitas espécies pré-históricas surgem repentinamente, sem que fossem encontrados os fósseis de organismos transicionais que confirmassem a evolução gradual. De modo geral, as espécies aparecem de forma súbita nos arquivos geológicos, sem o menor sinal de estágios intermediários ou elos relacionados às espécies precedentes (FELIZARDO, 2005).

Darwin argumentava que o registro fóssil era imperfeito e incompleto: vemos as mudanças abruptas porque nos faltam os dados das etapas intermediárias. Ele atribuiu a falta extremamente freqüente desses elos intermediários à imperfeição dos documentos fósseis, ou seja, muitos desses estágios não teriam sido fossilizados ou não teriam, ainda, sido descobertos pelos paleontólogos (FELIZARDO, 2005).

Apesar das muitas evidências paleontológicas divergentes dessa ideia, a Teoria Sintética continua, em grande medida, a sustentar o gradualismo como o ritmo efetivo da evolução (FELIZARDO, 2005).

No entanto, mais de cem anos depois, os cientistas ainda não podem constatar o gradualismo com base nos atuais achados paleontológicos. Ao contrário, as novas interpretações dos registros fósseis, denunciam ainda mais fatidicamente, a inconsistência acerca dos mecanismos evolutivos consolidados pela teoria sintética, já que as evidências paleontológicas mostram-se em desacordo com a perspectiva gradualista. O equilíbrio pontuado emergiu da necessidade de adequação da teoria evolutiva aos fatos, e não o contrário: as evidências do registro fóssil estão corretas: os fósseis de criaturas intermediárias, simplesmente, não existem (FELIZARDO, 2005).

Mas como a partir dessas teorias explicaríamos a origem tanto mudanças pequenas, e muitas vezes imperceptíveis, como também de mudanças drásticas que chegam a originar um novo filo?

Por explicação de que mutações drásticas com monstruosidades são muito raras.

Sobre a origem de novos órgãos e estruturas, Freire-Maia (1988) ressalta que a passagem de uma pata anterior de um réptil para uma asa de pássaro é um processo

certo, simples, mas questiona: como a Teoria Sintética explica esse fenômeno? Qual fator seria empregado como causa? Como ocorreria a criação de novas estruturas?

A explicação de Mayr propõe uma resposta com base nos processos já mobilizados pela Teoria Sintética: (1) a partir do fenômeno de pleiotropia resultante de um gene compartilhado, um fenótipo seria selecionado acidentalmente pelo valor adaptativo de outro fenótipo, (2) por modificações tais como fusões, mudança de proporção, perdas ou duplicações, uma estrutura preexistente se torna uma nova sem alterar o plano todo, (3) por mudança de função também podem surgir novas estruturas, uma vez que uma função nova pode dar uma utilidade diferente da finalidade que a estrutura tinha antes (MAYR, 2005).

Outro aspecto relevante colocado pelo equilíbrio pontuado é a noção de que a seleção atua sobre a espécie como um todo, não apenas sobre o complexo genético de organismos individuais. O locus da evolução é a espécie, não o indivíduo ou apenas o gene, como sugere a teoria sintética. Isso significa que a evolução resulta de eventos que acontecem em múltiplos níveis hierárquicos, dos genes aos ecossistemas. Segundo Gould, as espécies devem ser consideradas entidades individuais, verdadeiros indivíduos, na medida em que se supõe que a seleção faça a triagem (sorting) de umas espécies em relação às outras, da mesma forma que no modelo neodarwinista, a seleção natural faz a triagem dos indivíduos dentro de uma população. Essa triagem entre as espécies supõe que haja uma macroevolução (a evolução acima do nível das espécies), à medida em Gould considera como microevolução a triagem de indivíduos no interior das espécies (FELIZARDO, 2005).

De acordo com o equilíbrio pontuado, é preciso ceder mais espaço aos fenômenos macroevolutivos: a história real da vida, tal como aparece nos arquivos paleontológicos não se resume à microevolução e, a macroevolução não pode ser explicada por qualquer extrapolação da microevolução, com base em mecanismos e fenômenos genéticos e moleculares. Uma das principais contribuições de Gould e Eldredge para o debate evolutivo neste momento foi a de constatar uma autonomia ou separação entre micro e macroevolução. Gould e Eldredge sublinham que a macroevolução é um fenômeno cujos mecanismos devem ser estudados principalmente por paleontólogos e paleobiólogos e que a análise de fenômenos genéticos não é tão relevante (FELIZARDO, 2005).

É nesse momento que começamos a denunciar e ensaiar explicações para uma das lacunas explicativas presentes no contexto da Teoria Sintética. A relação entre

seleção natural e a criação de fenótipos inéditos fica duvidosa e obscura diante do gradualismo e, portanto, suscita uma reflexão referente à origem de novas formas orgânicas: A seleção natural cria, a partir de processos microevolutivos sucessivos, novos planos corporais? A diversidade orgânica existente é sempre resultante de um processo de seleção natural?

4- O PAPEL DA SELEÇÃO NATURAL NA CRIAÇÃO DE NOVAS ESTRUTURAS.

“A teoria da seleção natural é capaz de explicar por que uma população muda de composição, mas até recentemente sabíamos muito pouco sobre como surgiam as novas características de uma espécie, inclusive aquelas sobre as quais a seleção natural atua. Em particular, o surgimento de organismos com grandes modificações em relação aos seus ancestrais representava um imenso desafio aos evolucionistas. Nas últimas décadas, entretanto, a compreensão do processo de desenvolvimento e de sua regulação está mudando esse quadro” .(EL-HANI E MEYER, 2009, p. 03).

Mesmo com as incoerências do gradualismo denunciadas- principalmente, pela Teoria do Equilíbrio Pontuado- até meados de 1960, as críticas à capacidade criativa da seleção natural não incidiram tão fortemente sobre as assertivas da teoria evolutiva. Embora houvesse especulações, refutações e questionamentos sobre o alcance da seleção natural, a fundamentação empírica necessária para fomentar essas críticas ainda era um ponto fraco para os críticos. Se não fosse pela seleção natural, pelas mutações, pela deriva genética e pelo acúmulo de mudanças microevolutivas, como explicaríamos o surgimento de novas formas orgânicas?

Para Darwin, a seleção natural é a força criativa da evolução, pois cria os aptos, constrói adaptações em estágios e conserva variações favoráveis. Partindo da premissa de que as variações não são dirigidas, poderíamos aceitar que a seleção natural é criativa, pois as variações se dão ao acaso e os efeitos da seleção natural são decorrentes de necessidades (GOULD, 1999). Mas a atuação criativa da seleção natural deve ser definida com bastante cuidado para evitar equívocos.

O autor Freire-Maia (1988) tenta mensurar o poder explicativo da seleção, ao fazer considerações relevantes acerca do possível papel criador desse mecanismo. Primeiramente coloca que para alguns autores “A seleção natural funciona como mera

peneira que deixa passar ou não, sem ter o papel criador que lhe atribui a teoria sintética” (FREIRE-MAIA, 1988, p.56). Neste primeiro momento, o poder criativo da seleção natural é questionado, já que por meio desse mecanismo não poderíamos explicar o aparecimento de novas estruturas, cuja origem pode ser explicada por outros processos, tais como mutações. A seleção natural funcionaria então “como mera peneira, deixando passar os mais adaptados e eliminando os que não se mostram como tal [...] sendo destituída de poderes de ordem criadora” (FREIRE-MAIA, 1988, p.117). Em um segundo momento, o autor acrescenta que a seleção natural tem algum papel criativo uma vez que pode criar sistemas genéticos integrados que não existiriam sem a seleção, que vai aos poucos organizando genótipos cada vez mais adaptados. Assim, não se trata apenas de peneirar características isoladas, mas de “criar” por peneiramentos sucessivos, comunidades de genes.

Em um último momento, Freire-Maia (1988) afirma que a seleção natural não cria um cérebro ou uma asa a partir de nada, pois não possui poderes preditivos e nem age providencialmente, ou seja, caracteriza-se por ausência de teleologia.

Segundo Ridley (2006), uma importante objeção em relação ao darwinismo trata do fato de formas existentes na natureza apresentarem lacunas que não poderiam ser superadas se a evolução fosse dirigida apenas pela seleção natural. Por exemplo: uma asa completamente formada é vantajosa para um pássaro, mas uma asa em seus estágios evolutivos iniciais, uma proto-asa, poderia não ser. Assim, a proto-asa não poderia surgir por seleção natural, uma vez que é desvantajosa.

Os biólogos que aceitaram as críticas buscaram contornar a dificuldade imaginando que outros processos, além da seleção, poderiam operar durante os estágios iniciais da evolução de um novo órgão (RIDLEY, 2006, p.36).

Essa consideração sobre as limitações da credibilidade criativa da seleção natural resume-se em considerar que a seleção pode aperfeiçoar algo já existente em pleno funcionamento, mas não cria, por si só, estruturas complexas tal como as asas. Além disso, segundo Freire-Maia (1988) a seleção natural ao atuar na forma adulta dos seres vivos levaria a linhagem a um “beco-sem-saída”, do qual parece não haver escape para uma próxima fase e, então “apenas a seleção que aproveitasse mutações em nível de embrião seria capaz de abrir novas possibilidades evolutivas”.

Essas citações demonstram objeções de alguns autores sobre a ação da seleção natural, especificamente sobre a capacidade de criação desse mecanismo dentro das

especificações evolutivas. A origem de novas estruturas desafia o poder de ação da seleção natural e, portanto, incita uma reflexão sobre quais outros mecanismos possibilitariam essas origens repentinas e inéditas.

O problema mais difícil em toda a teoria da evolução é a origem de órgãos novos: a asa laminar dos insetos, a bexiga natatória dos peixes, a asa com penas das aves, o ouvido médio e a mama dos mamíferos, e tantas outras “novidades” que foram criadas ao longo da evolução (FREIRE-MAIA, 1988, p. 353).

A Teoria Sintética é destituída de conteúdos/explicações de cunho ontogenético, uma vez que, no momento da edificação desse paradigma, a embriologia esteve restrita à manipulação de óvulos e embriões e a biologia evolutiva estudava a variação genética das populações, sem considerar a relação entre genes e estrutura corporal (CARROL, 2006).

Seriam então, as questões ontogenéticas uma possibilidade de solucionar algumas críticas realizadas até o momento? O subsídio empírico que pode fornecer explicações para entendermos que a seleção natural tem poder criativo limitado é o padrão de desenvolvimento e as possibilidades de ação e bricolagem gênica desse processo?

Com o intuito de retomar a gênese das críticas, os tópicos a seguir contextualizam a origem de alguns pontos controversos sobre a Teoria Sintética.

O PROGRAMA ADAPTACIONISTA: POR QUE NEM TODA CARACTERÍSTICA DE USO CORRENTE É DERIVADA DE UM PROCESSO SELETIVO ESPECÍFICO? RATIFICANDO OS LIMITES PROCESSUAIS DA SELEÇÃO NATURAL.

Desde o final da década de 1970, persiste na biologia evolutiva um debate acerca do alcance da seleção natural para explicar a diversidade de formas do mundo vivo. De um lado, pensa-se que a produção direta de adaptações através da seleção natural é a causa primária da maioria das características biológicas relevantes, constituindo a chamada visão adaptacionista. De outro lado, dá-se ênfase à influência de outros fatores causais não-adaptativos na evolução da forma orgânica, como a deriva gênica, o reaproveitamento de estruturas pré-existentes (exaptações) e as restrições ao processo evolutivo. Este debate conduz naturalmente a uma controvérsia acerca do poder explicativo da seleção natural e do papel epistemológico

do conceito darwinista de adaptação na biologia (SEPÚLVEDA E EL-HANI, 2008, p.01).

O adaptacionismo foi derivado diretamente dos postulados iniciais da Teoria Sintética: a seleção natural e o gradualismo. Uma das maiores críticas dirigidas ao adaptacionismo tornou-se pública em 1979, quando Stephen Jay Gould e Richard Lewontin publicaram um polêmico artigo intitulado “The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme” (Os Tímpanos de São Marcos e o Paradigma Panglossiano: Uma Crítica ao Programa Adaptacionista). A partir dessa publicação, os autores aprofundam as objeções dirigidas ao papel preponderante concedido ao conceito de seleção natural no estudo da evolução (FELIZARDO, 2005).

Os autores descrevem uma analogia entre arquitetura e biologia para investigar o que acontece na evolução dos seres vivos. Segundo a teoria sintética, a seleção natural age sobre a variação hereditária, preservando as características vantajosas aos organismos. Conseqüentemente, todas as características dos organismos são resultado de sua adaptação ao meio. A metáfora da arquitetura tem o intuito de ilustrar o ponto de vista de Gould e Lewontin de que algumas das características e designs corporais podem ser resultado de processos não-adaptativos (FELIZARDO, 2005).

O conceito de adaptação precede o darwinismo. O fenômeno da adaptação era o foco central da teologia natural do século XVII, e fora interpretado de maneira a sustentar o argumento do desígnio ou planejamento. De acordo com este argumento, cada organismo teria sido meticulosamente projetado para um papel definido na economia da natureza, pela ação criadora inteligente de Deus, de modo que cada uma de suas estruturas se encontraria perfeitamente ajustada à sua função (EL-HANI E SEPÚLVEDA, 2007). Na Origem das Espécies, as adaptações foram tratadas como o aspecto mais importante do mundo orgânico e a seleção natural, apontada como o principal fator causal (mas não único) para a mudança evolutiva. A seleção natural era, portanto, uma força adaptativa, já que todo traço fenotípico advindo de um processo seletivo, seria, necessariamente, uma adaptação (AMUNDSON, 1999).

A partir da década de 1940, em decorrência da consolidação da Síntese evolutiva, a idéia de que as adaptações são o resultado da seleção natural foi reafirmada e bastante reiterada entre os biólogos evolutivos (Mayr, 1988), e, portanto, o fenômeno da adaptação passou a ocupar o centro da biologia evolutiva moderna (AMUNDSON, 1996).

De acordo com os pressupostos estabelecidos pelo quadro teórico da Síntese Moderna, a seleção natural continuou sendo o único mecanismo a partir do qual poderiam surgir as adaptações. Essa concepção foi tão pungente que muitos biólogos evolutivos do século XX passaram a investigar o significado funcional e valor adaptativo de uma variedade de traços biológicos conspícuos, que até então não haviam sido explicados mediante a ideia de que, obrigatoriamente, foram resultados de processos seletivos. (AMUNDSON, 1996; MAYR, 1988). Esses biólogos precisariam encontrar justificativas pertinentes para a existência dos traços a partir de histórias adaptativas: a existência desses traços deveria ser explicada como resultado da ação da seleção natural.

Gould e Lewontin (1979) chamaram esta abordagem da biologia evolutiva de ‘programa adaptacionista’.

O programa adaptacionista recebe críticas fatídicas desde 1970, quando as evidências empíricas e avanços teóricos denunciaram os limites da seleção natural para explicar a organização estrutural das formas vivas. Essa limitação foi enfatizada, especificamente, por conta das descobertas acerca do papel do acaso nas mudanças evolutivas (deriva gênica) e da ênfase sobre o papel das restrições históricas (filogenéticas), estruturais e do desenvolvimento sobre a evolução da forma orgânica.

Não obstante a relevância da seleção natural na explicação dos processos evolutivos, é preciso combiná-la com outros mecanismos para a construção de modelos explicativos mais consistentes. Esta visão pode ser chamada de ‘pluralismo de processos’ (MEYER E EL-HANI, 2005; SEPÚLVEDA E EL-HANI, 2008).

Stephen Jay Gould e Richard Lewontin (1979) elaboraram críticas bastante consistentes ao adaptacionismo (MEYER E EL-HANI, 2005). A crítica desses autores incide sobre o exercício de propor histórias adaptativas para explicar a existência de características funcionais que são consideradas válidas apenas se contemplarem o critério de consistência com a seleção natural.

Qualquer traço que apresentasse um valor adaptativo ou uma utilidade corrente deveria ser submetido a um “retrospecto” histórico, cujo principal caminho seria deduzir a natureza do processo seletivo que propiciou a existência e a manutenção da característica em questão. Seria possível, voltarmos ao tempo para fazermos atribuições unívocas entre característica presente e processo seletivo que propiciou essa existência? A seleção natural seria, de fato, o caminho único para a origem de características adaptativas?

Assim, diante de qualquer traço aparentemente útil, os adaptacionistas assumiriam sua funcionalidade e criariam uma hipótese acerca de seu significado adaptativo, validando e creditando sua existência a partir de um modelo seletivo. Há dois pressupostos subsidiando esta prática: (1) os organismos podem ser concebidos como coleções de características unitárias, as quais poderiam ser consideradas independentes umas das outras; (2) as restrições ao poder da seleção natural podem ser consideradas mínimas, de modo que a adaptação por seleção natural seria a causa primária de toda forma, função ou comportamento exibido pelos seres vivos (SEPÚLVEDA E EL-HANI, 2008, p.05).

Gould e Lewontin (1979) discutem sobre a natureza sistêmica dos organismos, uma vez que muitas das características constituintes desses organismos são resultantes de restrições estruturais que afetam as interações dos elementos que formam este todo integrado. Essa integração das características dos seres vivos impõe uma contingência entre as partes, e, possivelmente, alterações em qualquer parte de um organismo, acarretariam mudanças em outras partes. Portanto, não podemos pressupor que os traços evoluem de forma independente uns dos outros; que cada seleção natural- como se houvesse tantas seleções quanto características-, atua e culmina independentemente em um traço determinado, nem tampouco que as mudanças evolutivas possam ser explicadas exclusivamente pela ação da seleção natural, sem levar em conta a influência de outros processos, como as restrições estruturais, ou a deriva genética, ou, ainda, restrições relacionadas aos processos de desenvolvimento e à história filogenética dos grupos (SEPÚLVEDA E EL-HANI, 2008).

A defesa dessa interpretação mais pluralista do processo evolutivo, a partir da qual, a seleção natural atua sincronicamente a outros fatores para explicar a existência de certos aspectos de um traço, não rompe totalmente com a perspectiva adaptacionista. No entanto, propugna a referência a hipóteses alternativas e ainda requer que hipóteses adaptacionistas plausíveis sejam consideradas, testadas e rejeitadas sistematicamente. O pluralismo de processos valida a importância de se propor modelos adaptacionistas, lado a lado com outros modelos, não- adaptacionistas. (SEPÚLVEDA E EL-HANI, 2008).

Gould e Lewontin (1978) propugnam a ideia de que é necessário pensarmos em outras questões envolvidas na história evolutiva de uma característica. Por exemplo, as restrições históricas e do desenvolvimento podem explicar a permanência de alguns traços, especialmente no caso daqueles traços conservados em grandes grupos de organismos filogeneticamente relacionados. Outro problema metodológico das análises

adaptacionistas apontado por Gould e Lewontin (1978), herança de um modo cartesiano de fazer ciência, consiste em conceber os organismos como um mosaico de partes separadas, cada uma delas com uma explicação evolutiva independente para sua existência. Essa objeção torna-se pertinente se pensarmos que o organismo é formado por partes que, quando juntas, engendram propriedades resultantes da própria interação entre as partes. As propriedades emergentes, embora imprevisíveis, são características fundamentais dos objetos biológicos e inviabilizam a ideia de que o todo pode ser resultado apenas da soma de cada parte.

Os autores chamam a atenção para dois aspectos: (1) a impossibilidade de se definir com segurança qual parte do organismo deve ser tomada como um traço adaptativo que remete à determinada história evolutiva própria; (2) a impossibilidade de que uma otimização de qualquer parte que seja de um organismo não demande mudanças em outras.

Gould e Lewontin (1978) argumentam ainda que as narrativas apresentadas pelo programa adaptacionista acerca de porque um traço foi selecionado no passado evolutivo, a despeito de serem úteis para contrapor a ideia comum de que a existência de certos traços conspícuos nega a teoria da seleção natural, não constituem uma explicação científica testável e empiricamente corroborada, mas apenas uma inferência de como um traço poderia ter evoluído. Estas e outras ponderações em relação às imprecisões empíricas e aos problemas metodológicos e epistemológicos do programa adaptacionista levaram alguns autores a questionarem a pertinência do conceito de adaptação para a compreensão do darwinismo e do seu papel na organização da pesquisa biológica

De acordo com os pressupostos da Teoria Sintética, as adaptações são resultado do processo de seleção natural, gradualmente, de forma cumulativa- por isso o gradualismo Darwiniano também foi tratado como um dos pontos cruciais de nossa reflexão epistemológica. Dessa maneira é possível deduzir o caminho pelo qual as espécies evoluíram, analisando como cada novo traço facilitou a adaptação ao ambiente (FELIZARDO, 2005). Essa dedução acerca do processo seletivo que originou o traço em questão é conhecida na ciência como engenharia reversa.

Dennett (1998), argumenta que a engenharia reversa é uma artefato de investigação bastante relevante para explicação, a partir da análise de **partes isoladas** dos organismos, de como e para que determinadas estruturas foram construídas. (FELIZARDO, 2005, grifo nosso).

A tarefa da engenharia reversa na biologia é um exercício de imaginar ‘o que a Mãe Natureza tinha em mente’. Essa estratégia conhecida como adaptacionismo, tem sido um método surpreendentemente poderoso, gerando muitos saltos espetaculares de inferência que foram confirmados – juntamente com alguns que não foram, é claro” (DENNETT, 1998, p. 237).

Dentro da biologia, mais especificamente do neodarwinismo, a engenharia reversa é proposta como uma possibilidade de entendimento de toda estrutura orgânica, (DENNETT, 1998), cujo caminho e as dificuldades são análogos aos apresentados pela análise de um arqueólogo ou de um historiador que tenta reconstruir a finalidade de uma ferramenta ou de uma máquina antiga. Assim, para os adaptacionistas os organismos podem ser entendidos tais como as máquinas: ao entendermos cada parte e o propósito que justifica a existência de cada uma delas, poderemos compreender o todo e a maneira de “funcionamento” desse organismo. (FELIZARDO, 2005).

Aqui é o momento de retomarmos a importância da elaboração e das reflexões originadas e/ou construídas já em nosso primeiro capítulo. A biologia não é uma ciência cujo corpo teórico ou a estruturação empírica permite que desmontemos partes individuais para deduzir o que, seja no passado ou no presente, acontece e/ou aconteceu com o todo. É improvável que ao separarmos histórias evolutivas, cada qual sendo unicamente responsável por um traço específico, consigamos (re) costuir a história evolutiva de um organismo todo, muito menos de uma população toda. A evolução é um objeto biológico tal como o gene, o organismo e o nicho ecológico, e, portanto, exige uma interpretação sistêmica, mesmo que isso signifique a impossibilidade de manipularmos algumas situações. No entanto, é exatamente isso, essa atribuição compartimentalizada das partes, que o programa adaptacionista sugere em suas investigações acerca dos processos seletivos.

Não obstante as críticas ao programa adaptacionista, precisamos discernir, que ao estruturamos essas interpelações acerca dessa perspectiva, arquitetamos o propósito de demonstrar e ratificar a inviabilidade de uma interpretação fragmentada para explicarmos fenômenos biológicos, mais especificamente evolutivos. Dessa forma, não estamos obliterando totalmente com a perspectiva adaptacionista, mas argumentando sobre a pluralidade necessária para interpretações evolutivas.

Os próprios defensores do adaptacionismo ponderam sobre a necessidade de complementariedade desse programa,

“O raciocínio adaptacionista não é opcional; ele é a alma da biologia evolutiva. Embora possa ser suplementado, e suas falhas consertadas, acho que deslocá-lo de sua posição central na biologia é imaginar não só a ruína do darwinismo como o colapso da bioquímica moderna e de todas as ciências da vida e da medicina”. (DENNETT, 1998, p.247).

O cerne da inviabilidade do adaptacionismo faz-se ao tentar justificar que a existência de cada traço característico de cada organismo se deve exclusivamente à adaptação guiada pela força da seleção natural. Do ponto de vista de Gould e Lewontin, algumas das características e designs corporais que observamos no mundo vivo, resultam de processos não-adaptativos, tais como as restrições estruturais e as exaptações. Esses processos não adaptativos podem referir-se a fatores contingentes do ambiente, às relações ecológicas, bem como às restrições impostas pela história evolutiva pregressa da espécie (FELIZARDO, 2005).

A explicação gouldiana procura rejeitar o adaptacionismo estrito e trabalhar com a diversidade fundamental dos processos biológicos na busca pelas causas das mudanças evolutivas. Dessa maneira, a evolução resulta tanto de forças aleatórias como seletivas, e as características tidas como as adaptações podem ser subprodutos físicos da seleção por outros atributos. O que os autores propõem é deixar de considerar os sistemas biológicos como uma coleção de traços adaptativos e estudar a evolução por meio de um quadro teórico cujo tipo de raciocínio metodológico aponte para o fato de que os organismos e as circunstâncias estejam integrados em suas transformações ao longo de sua história evolutiva. (FELIZARDO, 2005).

Dessa forma, a ideia de que as restrições ontogenéticas e físicas são fundamentais para determinação das formas orgânicas, precisa ser considerada um aspecto relevante na história evolutiva dos organismos. Gould e Lewontin (1979, p.160), “não negam que a mudança, quando ela ocorre, pode ser mediada pela seleção natural, mas sustenta que as restrições limitam de tal forma os caminhos possíveis e os modos de mudanças que as próprias restrições se tornam o aspecto mais interessante da evolução”.

Já que darwinistas explicitam seus argumentos em favor do gradualismo e da continuidade, obviamente não iriam relevar os grandes desvios fenotípicos, induzidos rapidamente por pequenas mudanças genéticas, que afetam o início do desenvolvimento; mas nada na teoria darwiniana impede esses eventos, pois a continuidade subjacente das pequenas mudanças genéticas permanece (GOULD, 1982).

“Assim, embora não estejamos defendendo algo inédito, precisamos entender que o progresso na ciência muitas vezes exige a recuperação de antigas verdades e a apresentação das mesmas de uma nova maneira”. (GOULD, 1982, p. 343-344).

Embora descrevamos uma (re) formulação epistemológica, acabamos por apresentar, também, de uma (re) volução científica, a partir da qual, entendemos fatos teóricos e empíricos sobre um viés filosófico contemporâneo.

Dois leitores lendo um mesmo texto não interpretarão da mesma forma, e algo semelhante sem dúvida é verdade quando consideramos a relação entre um genoma e o ambiente embrionário- o microambiente químico – sobre o qual ele tem seus efeitos informativos (DENNETT, 1988, p. 118).

Convém reiterar que essas críticas começaram a ser propostas na década de 1970 e, no entanto, a pluralidade necessária para interpretação do processo evolutivo requeria uma fundamentação mais contundente; a noção de que a seleção natural atuava lado a lado a outros mecanismos estava bem estabelecida. No entanto, atualmente, a ideia de quais são esses outros mecanismos e como, empiricamente, eles interferem nos caminhos evolutivos, tem sido muito frequentemente subsidiada pelos pressupostos da Evo-Devo. A partir da definição desse campo de pesquisa fica mais evidente a relação processual-explicativa-evolutiva que estamos tentando tratar e/ou reivindicar.

Sem qualquer pretensão de obliterar com o darwinismo ou a Teoria Sintética, a Evo-Devo respalda o preenchimento tanto empírico quanto epistêmico de alguns buracos epistêmicos derivados de um contexto evolutivo muito consolidado.

Embora, no contexto da Teoria Sintética, os hiatos conceituais apresentados pelo gradualismo e pelo programa adaptacionista estejam muito distantes de sucumbir essa teoria, há necessidade de uma reavaliação teórica desse contexto evolutivo. Trata-se de uma (re) visita epistemológica, de forma a entender como esses hiatos são superados pelas pesquisas contemporâneas e a incidência das proposições teóricas recentes no Ensino de Evolução.

A partir de 1980, o avanço das pesquisas empíricas, principalmente na área da embriologia, possibilitou a organização de um campo novo de pesquisa que passa a contribuir com a ideia do pluralismo requerido para as interpretações evolutivas.

Quando pensamos nas críticas dirigidas ao programa adaptacionista, debruçadas, principalmente na relação entre traço adaptativo e seleção natural, de que forma, explicaríamos que essa relação não pode ser representada por um caminho único? Que um retrocesso histórico não pode culminar em um processo seletivo isolado,

ratificado pela certeza de que qualquer seleção natural resultará em uma característica adaptativa?

Esses questionamentos reforçam a perspectiva pluralista para o entendimento da evolução biológica. Essa perspectiva contempla níveis biológicos diferentes, uma vez que precisamos olhar também, para o ambiente e seu papel nos caminhos evolutivos.

O ambiente induz pressões seletivas que geram, ao longo do tempo evolutivo, mudanças fenotípicas respondentes à pressão determinada? A seletividade imposta pelas especificações ambientais determina padrões unívocos de sincronismo fenotípico? Ou seja, para cada pressão seletiva, há uma resposta fenotípica claramente observável e possivelmente detectada pela relação pressão seletiva/ resposta fenotípica?

Se pudéssemos responder às críticas acima de acordo com as condições das pesquisas atuais, que alternativas ao adaptacionismo Gould e Lewontin sugeririam como componentes do pluralismo recomendado? Por exemplo, como articularíamos a Teoria de Construção de Nicho e a Evo-Devo como objetos subjacentes ao entendimento plural necessário à explicação tanto empírica, quanto epistemológica dos processos evolutivos?

6- TEORIA DE CONSTRUÇÃO DO NICHU: POR QUE A EVOLUÇÃO PERCORRE UM ALVO MÓVEL?

O ambiente está sempre se modificando, tanto em decorrência de processos que não dependem dos organismos, por exemplo alterações geológicas, como por causa da ação contínua dos seres vivos sobre ele. A evolução por seleção natural é um processo que persegue, por assim dizer, um “alvo móvel”: as condições ambientais que estabelecem os desafios aos quais os organismos responderão estão continuamente mudando, em parte por causa das atividades dos próprios organismos (MEYER E EL-HANI, 2005, p. 69).

A ecologia é a ciência cujo objeto de estudo constitui-se pelas inter-relações e interações dos organismos com o ambiente e dos organismos entre si, como definido por Ernst Haeckel em 1866. Essa definição tangencia a reiterada natureza sistêmica da Biologia: trata-se de conteúdos complexos cujo entendimento torna-se inviável apenas pelo estudo de suas partes (BRANDO E CALDEIRA, 2007).

Para Mayr (2005), “as interações dos componentes devem ser consideradas, tanto quanto as propriedades dos componentes isolados” (p. 51). O autor afirma que é

“precisamente essa interação das partes” que fornece as características mais evidentes da natureza (ibid., p. 51).

Posto que o estudo da Ecologia reforça o pensamento sistêmico (BRANDO E CALDEIRA, 2007), de que forma podemos visualizar ou articular essa caracterização sistêmica no cenário evolutivo? Se a ecologia também precisa ser considerada dentro da Biologia Evolutiva, como entender a ação integrada desse campo de pesquisa na evolução? De que forma a ecologia pode estar inserida nos processos evolutivos? A partir da definição de habitat? De nicho ecológico? Da influência do ambiente sobre o organismo? Ou da ação do organismo em seu próprio habitat?

Aprendemos em Ecologia que hábitat de um organismo é o lugar onde o mesmo vive e nicho ecológico o papel que esse organismo desempenha.

As definições de nicho encontradas em alguns livros supracitados de Ecologia perpassam desde o espaço ocupado pelo organismo até os limites de tolerância que o mesmo suporta em determinado ambiente, para as mais variadas características. Para Odum (1988), o nicho ecológico não inclui apenas o espaço físico ocupado por um organismo, mas também o papel funcional na comunidade (ex: sua posição trófica) e a posição em gradientes ambientais de temperatura, umidade, pH, solo e outras condições de existência. Assim, para esse autor, o nicho ecológico de um organismo inclui também, o total das suas necessidades ambientais.

Para Townsend, Begon e Harper (2007), um nicho não é um local, mas uma ideia: um resumo das tolerâncias e exigências de um organismo.

O conceito moderno de nicho foi proposto por Hutchinson em 1957 (*apud* Townsend, Begon e Harper, 2007) e refere-se às maneiras pelas quais tolerâncias e necessidades interagem na definição de condições e recursos necessários a um indivíduo ou uma espécie, a fim de **cumprir seu modo de vida** (grifo nosso).

O trecho destacado, cooptado da própria definição do conceito, é bastante consonante às explicações dadas pelos alunos em nossa coleta de dados- uma vez que os mesmos associam as atividades vitais dos organismos ao nicho, ou seja, estabelecem que as condições subjacentes ao nicho, são limites, entre os quais, o organismo pode viver.

Para Ricklefs (2003), o nicho de um organismo representa os intervalos de tempo **que pode tolerar e os modos de vida que o mesmo possui**, isto é, seu papel no sistema ecológico. Um princípio importante da ecologia é que cada espécie tem um nicho distinto, uma vez que cada uma tem atributos característicos de forma e função

que determinam as condições que a espécie pode tolerar, como se alimenta e como escapa de seus predadores (grifo nosso). Mais uma vez, o trecho grifado, embora de uma definição proposta por outro autor, evidencia aproximações às definições encontradas nas falas dos alunos. Se o organismo está em uma zona de caracterizações bióticas e abióticas que permite a realização de suas atividades metabólicas e reprodutivas, está perfeitamente adaptado a esse meio. Apenas mencionamos a relação das respostas dos alunos com os trechos dos autores; essas análises serão realizadas com devido aprofundamento em outro tópico da tese.

É oportuno notar que nenhuma das três definições de nicho expostas aqui tratam explicitamente sobre a relação entre adaptabilidade do organismo e a especificidade do nicho ecológico. No entanto, estabelecem relações claras entre nicho e modos de vida e/ou nicho e papel ecológico, o que pode, muitas vezes, subjazer e/ou induzir o aluno a forçar essa associação de que se o organismo está realizando seu “papel na comunidade”, ele deve estar **perfeitamente** adaptado.

Embora as definições de nicho ecológico sejam muito bem demarcadas pela literatura referente à Ecologia, essas definições são caracterizadas por descrições específicas dos limites de tolerância de uma espécie, vinculadas ao ambiente em que essas espécies têm capacidade de viver. No entanto, se o ambiente mudasse apenas por meio das condições geológicas ou abióticas, talvez o organismo fosse capaz de responder aos processos seletivos em sincronia com os períodos de estasia do ambiente. De uma forma bem simples, o ambiente demoraria para sofrer alterações e, poranto, quando, por seleção natural, a frequência fenotípica de um traço finalmente fosse representativa na população, o ambiente ainda estaria da mesma forma de quando a pressão seletiva foi erigida e portanto suscitou mudanças na população.

Se esse sincronismo mudança fenotípica - características do meio fosse uma constante, assumiríamos que haveria uma facilidade muito maior de adaptação do organismo ao ambiente. No entanto, parece que a seleção percorre um alvo móvel (o ambiente) e dificilmente alcança um grau “ótimo” de adaptação.

Para Piglucci (2007), a segunda peça que está faltando parece difícil de ser colocada- embora alguns autores têm recentemente proposto o termo eco-evo-devo-, é a perspectiva ecológica. Obviamente, a ecologia estava implícita na Síntese Moderna, mas até hoje, há uma desconfiança entre ecologistas e biólogos evolutivos e, as vezes, dicotomias são estabelecidas, como por exemplo o frequente ditado” escala ecológica” e “escala evolutiva”. Considerando que a seleção natural (que é o resultado de fatores

ecológicos) afeta a população de uma geração para uma muito próxima, é difícil sondar o que as pessoas pensam em relação à distinção da escala ecológica e evolutiva. Talvez, o mais importante é que a teoria ecológica dificilmente aparece nos estudos de evolução, a não ser como um pano de fundo.

Considere o exemplo da seleção natural (Bell 1997): dado que a mesma é o pilar central da teoria evolutiva desde Darwin, deveríamos ter uma compreensão muito melhor desse mecanismo do que temos. Ao invés disso, muitos estudos sobre seleção natural tendem a focar em estatísticas preliminares de uma avaliação da covariância da característica- adaptável, mesmo que isso seja lamentavelmente inadequado pelo seu próprio padrão interno de replicação e poder estatístico. Estudos sobre seleção natural incluindo as interações ecológicas são difíceis de encontrar e nós temos quase nenhum entendimento de como essas interações/relações atuam na evolução das novidades fenotípicas ou durante as principais transições na evolução.

Lewontin (2002) sugere uma definição distinta ao conceber a relação organismo e ambiente e aponta alguns problemas decorrentes da definição arbitrária de nichos ecológicos na ausência de organismos. A arguição do autor incide na crítica de que muitas vezes na Ecologia “nicho ecológico consiste em um termo técnico usado universalmente para denotar o complexo de relações entre uma espécie particular e o mundo exterior” (ibid., p. 49). Acrescenta ainda que a concepção de que “o ambiente de um organismo é causalmente independente dele e de que as alterações no ambiente são autônomas e **independentes das alterações na própria espécie**”, está claramente equivocada (ibid.p. 53, grifo nosso).

A partir dessas objeções, o autor reflete sobre a idéia de que para entender este conceito é necessário pensarmos na ação e natureza dos próprios organismos que o compõem. Nesse sentido o autor esclarece alguns aspectos da relação entre organismo e ambiente:

1. os organismos determinam quais elementos do mundo exterior devem estar presentes para a constituição dos seus ambientes e quais relações entre esses elementos são relevantes para eles; 2. os organismos não só determinam os aspectos do mundo exterior que são relevantes para eles, em função de peculiaridades da sua forma e de seu metabolismo, como também **constroem ativamente** [...] um mundo à sua volta; 3. os organismos não se limitam a determinar o que é relevante e a criar um conjunto de relações físicas entre os aspectos relevantes do mundo exterior [...] também promovem um processo constante de alteração do seu ambiente; 4. os organismos modulam as propriedades estatísticas das condições externas à medida que essas condições se tornam parte do seu ambiente; 5. os organismos determinam, pela sua biologia, a natureza física real dos sinais advindos do exterior [...] transduzem um sinal físico em outro bem diferente, e é o resultado dessa transdução que as funções do organismo percebem como variável ambiental. (Lewontin, 2002, p. 57-68, grifo nosso).

Assim, para entendermos o conceito de nicho, dever-se-ia pensar na história evolutiva de cada uma das espécies que formam a comunidade, analisando a maneira pela qual elas interagem com os componentes bióticos e abióticos do meio e as possíveis maneiras pelas quais cada espécie foi interagindo ao longo do tempo evolutivo. Ao acompanhar este processo poder-se-ia verificar, por exemplo, como as espécies atualmente mantêm determinadas relações e quais são as presumíveis influências pretéritas, bem como, seria possível tentar inferir o porquê de cada espécie utilizar os recursos do ambiente de uma determinada forma e não de outra. Além disso, seria admissível raciocinar de que maneira o ambiente modula o modo de vida dos organismos e, em contrapartida, como os indivíduos poderiam modificar, manipular ou influenciar o ambiente ao seu redor, influenciando até os seus descendentes (CORRÊA et al, 2001).

É preciso explicar, por exemplo, em quais situações ecológicas organismos muito diferentes da média morfológica de suas populações podem levar vantagem, relativamente a outros organismos, tendo mais sucesso na obtenção de recursos e, assim, na sobrevivência e reprodução (ALMEIDA E EL-HANI, 2010). Nesse sentido, atribuído o papel do ambiente (com todo arcabouço ecológico), na participação dos traçados evolutivos dos organismos, Almeida e El-Hani (2010), apontam como a evo-devo deve evoluir naturalmente para uma eco-evo-devo.

LALAND, ODLING-SMEE e GILBERT (2008) ressaltam essa falta de espaço teórico e empírico para a área da ecologia na Síntese Moderna, argumentando sobre a existência de uma lacuna na biologia evolutiva, traçada pela não abordagem do papel

desempenhado pelo ambiente na evolução orgânica. Essa participação do ambiente, o qual estabelece uma relação de influência mútua com os organismos, para muitos autores, pode ser abordada por meio da “Teoria de Construção do nicho”.

Segundo a TCN, os organismos modificam o ambiente por meio das atividades metabólicas e comportamentos próprios (LALAND et al, 2008). Os organismos constroem buracos, ninhos, teias e tocas; modificam os níveis de gases na atmosfera; decompõem outros organismos; fixam nutrientes, participando ativamente das determinações seletivas entre organismo e ambiente (BRANDON, 1992). Nesse sentido, o cerne dessa teoria faz referência à base causal das relações dos organismos e seus ambientes (LALAND et al, 2008).

Assim, essa perspectiva sobre a função ativa exercida tanto pelo ambiente quanto pelo organismo na evolução, acrescenta a noção do mecanismo de herança ecológica. De acordo com essa herança, os organismos descendentes herdam as caracterizações de seus antepassados por meio da modificação efetuada pelos últimos em seu ambiente. Essa herança ecológica não é um sistema de cópia de modelo, logo não depende de replicadores, mas do tipo de ação dos organismos, os quais serão responsáveis pelas características do ambiente “transmitido” aos seus descendentes (ODLING-SMEE, LALAND e FELDMAN, 2003; JABLONKA E LAMB, 2010).

A incorporação da concepção de herança ecológica em Biologia evolutiva tem consequências para a Biologia do desenvolvimento, uma vez que em cada geração, a prole herdará um ambiente local seletivo que, de certa forma, já foi modificado, ou escolhido, dada a ação da construção do nicho de seu ancestral. Assim, de forma análoga aos mecanismos evolutivos centrados na herança genética- que subsidiam a estrutura da Síntese Moderna- por meio dos quais, o desenvolvimento dos organismos começa com a herança de um “kit de partida” de genes; a teoria de construção de nicho começa com a herança de um “nicho de partida” (LALAND, ODLING-SMEE e GILBERT, 2008).

Dessa forma, as ações e escolhas dos progenitores determinam as peculiaridades do local em que os descendentes serão originados. Por exemplo, os insetos fitófagos, geralmente escolhem plantas hospedeiras específicas para colocar seus ovos, que, subsequentemente, servem como fonte de alimento para sua prole. Nas aves e insetos, cujo ovo é um dos principais componentes do “nicho de partida”, a gema é fornecida para a nutrição embrionária e larval. Além disso, muitos organismos fornecem produtos

químicos de proteção no seu “kit de partida” (LALAND, ODLING-SMEE e GILBERT, 2008).

A Teoria de Construção do Nicho está inserida na pluralidade necessária para entendermos o contexto evolutivo. A partir da compreensão dessa relação organismo e ambiente, podemos entender o organismo como ente ativo, modificador do seu entorno, além de entender porque o programa adaptacionista é insatisfatório em alguns casos, já que a evolução percorre um alvo móvel.

7- SELEÇÃO NATURAL E ADAPTAÇÃO: SE UM ORGANISMO É SUBMETIDO A SUCESSIVOS PROCESSOS DE SELEÇÃO, ELE PODE SE TORNAR PERFEITAMENTE ADAPTADO?

Alguns entusiastas têm afirmado que a seleção natural é capaz de tudo. Isso, porém não é verdade. Embora saibamos que “a seleção natural está constantemente examinando, em todo o mundo, todas as variações, mesmo as mais sutis” como afirmou Darwin (1859, p.84), é evidente que existem limites para o que a seleção natural pode fazer. Isso é demonstrado de forma convincente pelo fato de que 99,99% ou mais das linhagens evolutivas estão extintas. Por que a seleção natural, na maioria dos casos, não consegue atingir a perfeição? (Mayr, 2009, p. 172)

De acordo com a lógica Darwinista, o objetivo central da teoria da seleção natural seria explicar a adaptação dos seres vivos às exigências ambientais. Darwin já atentava para o fato de que a seleção natural nunca culminaria em um estado fenotípico perfeito, mas apenas forneceria uma melhor adaptação às condições existentes. Por exemplo, os animais e plantas da nova Zelândia estavam bem adaptados uns aos outros. Quando animais e plantas da Inglaterra foram introduzidos na Nova Zelândia, muitas das espécies nativas foram extintas, porque eram menos “perfeitas” na presença das espécies invasoras (MAYR, 2009, p. 322).

Francisco Ayala (2010, p.379), sugere que a seleção natural foi proposta por Darwin (1859) primeiramente para explicar a organização adaptativa, o desenho dos seres vivos. Ainda assim, se nos remetermos a Origem das Espécies, veremos que a seleção natural foi primeiramente apresentada como uma “explicação para a diversificação das formas vivas a partir de um ancestral comum” (Darwin, 1859, p. 05). Na introdução desta obra, Darwin afirma que há evidências suficientes para fomentar a tese da ancestralidade comum, mas aponta a dificuldade que representa imaginar um

mecanismo de modificação e diversificação capaz de produzir seres cujas partes estão mutuamente adaptadas e, por sua vez, adaptadas às exigências ambientais (CAPONI, 2012).

Deste modo, a seleção natural é introduzida como um mecanismo de transformação e diversificação que, ao mesmo tempo, opera como um mecanismo adaptador. Embora não haja dúvidas de que a seleção natural permita explicar a adaptação dos seres vivos às exigências ambientais e, apesar de ser inegável que essa questão fosse muito importante para Darwin, a explicação do ajuste dos seres vivos às condições de existência não é objetivo central da teoria (CAPONI, 2012).

De acordo com Meyer e El-Hani (2005),

“as características adaptativas, na história evolutiva de uma espécie somente permitiram que os organismos que as apresentavam tivessem mais sucesso, relativamente a outros organismos da mesma população, na sobrevivência e reprodução em um determinado ambiente. Elas seriam perfeitas e seus portadores, organismos ótimos, somente se toda variação possível estivesse presente em uma dada população, em um dado momento da história evolutiva, mas isso é claro, nunca acontece. Assim, as características selecionadas são sempre as mais favoráveis dentro de um espectro de variações disponíveis numa população, e não características que se mostram perfeitas diante de desafios que o ambiente apresenta para os organismos (...) Muitas pessoas pensam que se os organismos estão sendo, continuamente, selecionados de modo a se adaptarem às condições ambientais nas quais vivem, a evolução deverá fazer com que as populações se tornem, com o tempo, cada vez mais capazes de sobreviver nesses ambientes, alcançando por fim, uma condição ótima, na qual os organismos e suas características estariam perfeitamente adaptados à vida nessas condições (p. 69).

Embora as críticas apresentadas ao programa adaptacionista, ao gradualismo e ao gene-centrismo estivessem muito bem descritas e fundamentadas, por que, de fato, não propiciaram debates mais fatídicos em relação à (re)estruturações da Síntese Moderna? Por que essas reverberações prorrogaram-se por tantos anos, para então, erigir-se a possibilidade de expansão da Síntese?

A objeção mais reiterada sobre a Síntese acomodou-se sobre o papel quase exclusivo atribuído à seleção natural. Não obstante ao reconhecimento da importância desse mecanismo, era evidente que ele atuava lado a lado com outros, atribuindo uma perspectiva mais pluralista para os caminhos evolutivos. Dessa forma, a partir da década de 1980, as críticas tornaram-se mais incidentes, pois um dos processos que atuava lado a lado com a seleção engendrava um novo campo de pesquisa - a Evo-Devo - a partir do qual, parte dos hiatos epistêmicos puderam ser preenchidos por explicações empíricas.

Ainda hoje, algumas das idéias básicas do pensamento darwinista são aceitas como elementos fundamentais na estrutura do pensamento evolutivo, tais como: (i) a idéia de que todos os seres vivos são aparentados entre si, ou seja, de que todas as espécies são interconectadas filogeneticamente através de relações de ancestralidade comum; (ii) que as espécies se transformam ao longo do tempo, pois os indivíduos de uma população ao se reproduzirem dão origem a descendentes com modificações; e (iii) o reconhecimento da importância da seleção natural como mecanismo explicativo da mudança evolutiva ao longo das gerações (SANTOS, 2011, p.24).

Embora essas ideias continuem fundamentando os percursos evolutivos, alguns questionamentos contemplam respostas situadas em uma perspectiva mais plural, cuja dimensão começou a ser configurada a partir de 1970.

É muito difícil elaborarmos uma teoria evolutiva resistente a todas as vicissitudes do tempo: sempre haverá uma porfusão de ideias, uma plêiade de novas pesquisas, novos desafios científicos, uma necessidade constante de questionar, de procurar lacunas, de avançar. No entanto, essa dinamicidade característica da ciência não obstina, necessariamente, a obsolescência de todos os paradigmas ou teorias já consolidados. É fato que formular uma teoria evolutiva empiricamente adequada não foi uma tarefa fácil: o sincronismo entre as discussões epistemológicas e o andamento da pesquisa empírica é uma questão crucial do fazer científico. Essas áreas atuam sincronicamente para que possamos endossar a validade e a plausibilidade de um paradigma ou teoria. Assim, articular o corpo teórico de um conceito ao avanço- indubitavelmente inevitável- da pesquisa empírica, não significa sucumbir com os conhecimentos já existentes, romper com o passado e (re) configurar todo conteúdo presente. O grande artefato está em resgatar no passado, lacunas ou perguntas que não puderam ser respondidas pela falta de subsídio empírico.

A falta de sincronismo referida é cerne do debate epistemológico da biologia evolutiva contemporânea e pode ser, entre outros fatores, decorrente do afastamento- tanto epistemológico quanto empírico- da evolução e do desenvolvimento.

8- O PAPEL DA BIOLOGIA EVOLUTIVA DO DESENVOLVIMENTO NA EVOLUÇÃO: A EVO-DEVO ABRINDO CAMINHO PARA A PERSPECTIVA PLURALISTA DA EVOLUÇÃO.

“Não há dúvida de que há restrições de ordem ontogenética (relacionada ao processo de desenvolvimento do indivíduo) que limitam as variações sobre as quais a seleção natural pode atuar, do mesmo modo que o fazem as restrições advindas da história filogenética (relacionada à história evolutiva de um grupo específico de organismos). Além disso, há o acaso, que se acredita ter um papel relevante nas inovações que ocorrem principalmente em pequenas populações. Todos esses fatores participaram na formação do design atual dos organismos e das populações, juntamente com a seleção natural. Certamente, não parece fácil decidir qual entre eles tem papel mais relevante e talvez não se possa decidir isso de forma global” (CHEDIAK, 2008, p.23).

Como mencionado, as reivindicações referentes à organização epistemológica da Biologia evolutiva, embora não obliterem com o paradigma da Síntese Moderna, não são meros ornamentos, uma vez que as interprelações referentes à síntese estendem-se desde “uma abordagem focada em mudanças de frequências gênicas em populações – como nos modelos da genética de populações – a uma abordagem causal-mecanicista da origem da variação e da inovação fenotípica” (SANTOS E EL-HANI, 2013, p.200).

Hoje, a biologia evolutiva passa por uma fase mais pluralista, e está lastreada, tanto à seleção natural como em outros fatores, como as restrições ao processo evolutivo, para explicar a origem de características e espécies de seres vivos; perpassando a ideia de um pluralismo de processos subjacentes a ideia de que a compreensão da evolução requer uma série de mecanismos operando de modo complementar (EL-HANI E MEYER, 2009); (ALMEIDA E EL-HANI, 2010).

Por pluralismo de processos, entende-se o reconhecimento da contribuição de múltiplos mecanismos ou fatores evolutivos que atuam de modo complementar no processo evolutivo, incluindo seleção natural, deriva gênica, plasticidade fenotípica, mecanismos epigenéticos de herança, distintos modos de especiação, construção de nicho, restrições ao processo evolutivo (sejam históricas ou desenvolvimentais), evolvibilidade, simbiogênese, auto-organização, etc. (SANTOS E EL-HANI, 2013).

Esse pluralismo de processos é o pano de fundo de toda interpelação referente à expansão da Síntese Moderna. Caso entendamos, de fato, a natureza sistêmica da Biologia e como essa perspectiva tangencia ou deve inserir na evolução, é notório que a Síntese Moderna precisa ser (re) formulada, de forma a integrar a ação de diferentes fatores biológicos.

No entanto, a menção a uma síntese estendida significa, também, manter os pressupostos basais já existentes. Caso considerássemos as asserções da Síntese

Moderna falaciosas ou abstrusas, proporíamos bases para um novo paradigma, que obliterasse totalmente com o vigente. No entanto, a denotação da extensão da síntese é fomentada na ideia de que a perspectiva pluralista mantém as caracterizações darwinistas, uma vez que mantém a relevância da ação da seleção natural no processo evolutivo (SANTOS E EL-HANI, 2013).

Contudo, abordar os fenômenos evolutivos dentro de uma perspectiva pluralista requer mais do que fornecer, como em uma perspectiva adaptacionista (CAPONI, 2011; EL-HANI; SEPULVEDA, 2008; EL-HANI; MEYER; SEPULVEDA, 2011), explicações para todas as modificações observadas na história evolutiva dos grupos de organismos apenas em termos da ação da seleção natural. Torna-se necessário compreender a possível influência de outros mecanismos ou fatores evolutivos, que podem estar atuando de modo antagonístico ou sinérgico à seleção (SANTOS E EL-HANI, 2013, p.201).

Embora tenhamos mencionado outras questões arraigadas ao entendimento pluralista do processo evolutivo, nosso trabalho irá enfatizar a Evo- Devo e suas contribuições para essas interpretações e/ou visualizações sistêmicas do conhecimento biológico.

A comparação entre os genes do desenvolvimento das várias espécies tornou-se uma nova disciplina, que se localiza na interface da embriologia com a biologia evolutiva – a biologia evolutiva do desenvolvimento, ou apenas “evo-devo” (CARROLL, 2006, p.17).

Como parte fundamental da abordagem pluralista, a Evo-Devo obedece ao mesmo esquema variacional da Teoria da Seleção Natural. Como já mencionado, a plausibilidade que sustenta a coerência dessa forma de conceber a evolução está na complementariedade entre as duas teorias: manter a perspectiva populacional que subjaz a seleção natural e retomar a perspectiva variacional por meio da Evo-Devo. (CAPONI, 2012; CAPONI, 2005).

Na década de 1970, alguns autores começaram a defender a união entre a embriologia e a biologia evolutiva. Stephen Jay Gould lança o livro *Ontogeny and Phylogeny* sobre as modificações que a embriogênese pode causar na evolução. No entanto, foi na década de 1980 que o maior passo da Evo-Devo foi dado, com a constatação da lógica e da ordem na morfologia animal, dadas pelos genes no processo embriológico. Ao contrário do que se pensava antes, que animais pouco relacionados teriam constituições genéticas completamente diferentes, descobriu-se que genes organizadores eram encontrados tanto em drosófilas como em outros animais, inclusive

no homem e que seriam responsáveis pela realização das mesmas funções (CARROLL, 2006).

A biologia evolucionária do desenvolvimento ou Evo-Devo é um capítulo relativamente novo da biologia evolucionária, cuja estruturação remonta ao início de 1980 e a consolidação como área de conhecimento na década seguinte. O objetivo desse campo de estudo é estudar e descrever como os padrões e/ou exigências organizacionais da ontogenia engendram ou limitam os caminhos da evolução, definindo as sequências das mudanças evolutivas (CAPONI, 2012).

Essa junção entre a embriologia e a biologia evolutiva foi propiciada, em grande parte, pela inovação da pesquisa empírica referente à biologia molecular, que possibilitou novas perspectivas de pesquisa e a análise da história e da embriogênese dos animais. A elucidação dos genomas dos seres vivos e do desenvolvimento de embriões permite que observemos a história animal ilustrada no registro fóssil sob um viés inédito, já que podemos traçar novas ideias sobre o que aconteceu e como- decifrando os mecanismos internos da formação da diversidade animal. “Um dos paradigmas fundamentais da geologia moderna era que o presente é a chave para o passado- a ideia de que processos hoje observáveis atuaram no passado e o explicam. Este é também um dos princípios essenciais da evo-devo” (CARROLL, 2006, p.56).

O foco, nesse caso, recai sobre organismos multicelulares nos quais a variação e inovação fenotípicas decorrem de processos de desenvolvimento e, em particular, de morfogênese, de modo que não se pode pôr de lado a relação entre desenvolvimento e evolução e, em particular, entre a variação disponível nas populações e a seleção natural, que atua sobre o repertório (sempre restrito, em maior ou menor grau) de variantes produzidas pelo desenvolvimento, a depender de vias desenvolvimentais herdadas na história de cada clado. Ao mesmo tempo em que o desenvolvimento resulta nas inovações morfológicas submetidas à ação da seleção natural, ele também restringe as possíveis modificações que podem ocorrer nas morfologias dos organismos. Ou seja, o desenvolvimento impõe limites às possibilidades de variação das características que uma população pode expressar, na medida em que não é infinitamente plástico. Os processos de geração da forma ao longo do desenvolvimento resultam, pois, em restrições desenvolvimentais, que enviesam a distribuição de variantes em uma população, uma vez que propriedades entrincheiradas dos sistemas de desenvolvimento, ou seja, que admitem menos variação tornam certas formas de mudança mais prováveis do que outras (SANTOS E EL-HANI, 2013, p.201).

O mecanismo central das pesquisas da Evo-Devo contempla a ideia de que as formas animais evoluem por meio de mudanças na geografia embrionária. Essa evolução e/ou (re) configuração é propiciada por meio dos diferentes usos dados aos genes do kit de ferramentas. A evolução da forma consiste, em boa parte, em dar novas atribuições a genes muito velhos, em precisas alterações genéticas. A evo-devo faz erigir a possibilidade de, finalmente, entendermos como a “infinitude de formas” de Darwin foi e ainda está sendo feita (CARROL, 2006).

Não se pode perder de vista, ainda, que o desenvolvimento, como as demais características dos indivíduos em uma população, também é alvo da seleção natural, da deriva e de outros processos e, portanto, modifica-se no decorrer do processo evolutivo. Uma vez que o desenvolvimento dos indivíduos de uma espécie depende, fundamentalmente, de vias desenvolvimentais herdadas de linhagens anteriores e a seleção tem papel importante (mas não exclusivamente determinante) na distribuição das vias que serão herdadas, a seleção influencia o desenvolvimento tanto quanto este a influencia. Os organismos recebem um legado desenvolvimental por meio da herança, não somente genética, mas também epigenética e; dessa maneira, reproduzem, em parte, os padrões de desenvolvimento dos seus ancestrais (JABLONKA; LAMB, 2010).

Por conseguinte, é essa herança de padrões de desenvolvimento que determina os limites e as possibilidades das inovações morfológicas das futuras gerações. Conseqüentemente, devemos entender os estudos relativos à restrição desenvolvimental como fundamentais para a elucidação da origem e transformação das estruturas morfológicas ao longo da história filogenética dos grupos. Essas restrições desenvolvimentais promovem um enviesamento na produção das variantes fenotípicas, dado que limitam a variabilidade em função da estrutura, do caráter, da composição e/ou da dinâmica do sistema desenvolvimental (MAYNARD SMITH et al., 1985). Contudo, as restrições não cumprem apenas um papel negativo na evolução, na medida em que podem também canalizar processos de mudança evolutiva, acelerando a transformação da forma orgânica nas linhagens e mesmo estabelecendo direcionalidade no processo evolutivo (GOULD, 2002).

A biologia evolutiva do desenvolvimento também desempenha outro papel relevante na reestruturação do pensamento evolutivo, na medida em que contribui para a superação do gradualismo estrito caracterizado pela Síntese Moderna, ao fornecer uma base causal-mecanicista que nos permite explicar mudanças na velocidade das taxas evolutivas, decorrentes de uma dinâmica de inovações morfológicas que podem ser

explicadas com base em alterações regulatórias no desenvolvimento. A evo-devo explica como alterações nos padrões de expressão gênica, decorrentes de mudanças nas sequências regulatórias de genes desenvolvimentais, podem conduzir a mudanças drásticas na morfologia, canalizando o surgimento de novidades evolutivas (WAGNER, 2000). Nesses casos, podem ser originadas grandes mudanças na morfologia dos organismos a partir de pequenas mudanças nas sequências de DNA em regiões regulatórias, com certas estruturas morfológicas surgindo por meio de uma transformação discreta e completa, sem uma série gradual de etapas intermediárias entre uma forma e outra, estendida ao longo de muitas gerações (SANTOS E EL-HANI, 2013).

Essas mudanças, ditas homeóticas, contrastam com o gradualismo da teoria sintética da evolução assim como na teoria darwinista original, sobre o acúmulo lento e gradual de pequenas modificações ao longo de grandes escalas temporais, pela ação da seleção natural. Hoje, é possível entender como mudanças no desenvolvimento podem rapidamente dar origem a indivíduos muito diferentes das médias morfológicas das populações às quais pertencem, por meio de mecanismos estudados pela evo-devo. Se, de um lado, essas mudanças morfológicas são demasiadamente rápidas para serem explicadas apenas pelo poder cumulativo da seleção natural, de outro, não podemos perder de vista que elas, como quaisquer inovações morfológicas, são submetidas à triagem da seleção (SANTOS E EL-HANI, 2013).

A defesa da inclusão dos processos de desenvolvimento nas narrativas evolutivas está alicerçada na possibilidade de podermos responder perguntas que ainda permanecem obscuras mesmo pela ação da seleção natural, deriva genética ou mutações (processos comumente mobilizados em explicações oriundas da Teoria Sintética). A teoria evolutiva atual ainda não é capaz de responder, por exemplo, por que “uma espécie de peixe pode variar no número de escamas ao longo do corpo, mas não no número de par de olhos” (FUTUYMA, 2009, p.651).

Considerar a Evo-Devo como um ponto a ser acrescido à Síntese Moderna não seria um equívoco. No entanto, dicotomizar essas duas teorias e incluir narrativas ontogenéticas somente para casos específicos inviabiliza o entendimento integrado dos fenômenos biológicos. Ainda que tenhamos discutido o assunto superficialmente, acordamos sobre uma real inclusão da Evo-Devo às explicações evolutivas, uma vez que ela não atua de forma isolada, mas simultaneamente a seleção natural, deriva genética, mutações e especiações, por exemplo.

Outro ponto importante que a biologia do desenvolvimento pode acrescentar a evolução trata das restrições embriológicas. As restrições que a embriologia oferece ao processo evolutivo podem explicar, segundo Caponi (2011), o porquê das semelhanças entre os seres vivos, ou seja, a permanência das formas ancestrais.

Aquilo que constitui a primeira e grande novidade da evo-devo é o retorno desse interesse pelas semelhanças, que contrasta com o interesse pelas diferenças, característica tanto do darwinismo clássico quanto do darwinismo neossintético (CAPONI, 2011, p.212).

No panorama da Evo-Devo, as homologias não são apenas resquícios de uma forma ancestral comum, uma vez que são homologias concernentes a restrições desenvolvimentais que culminam na permanência de certas estruturas (CAPONI, 2011).

A Teoria Sintética é capaz de responder pelas características gerais da evolução, e “nenhum dos eventos evolutivos descobertos até agora é incompatível com a teoria”. Ainda assim, a teoria geral dos mecanismos evolutivos pode ser considerada incompleta e não faz previsões para a maioria dos eventos evolutivos individuais “Em outras palavras, ela requer uma teoria da biologia do desenvolvimento”. (FUTUYMA, 2009, p.649).

A teoria neo-darwiniana de mecanismos evolutivos é apresentada em sua maior parte em termos de ação da seleção natural, da deriva genética e do fluxo gênico sobre a variação genética. A resposta à seleção em um caráter depende da existência de variação genética nesse caráter (FUTUYMA, 2002).

Uma segunda teoria que, sem ser contrária a teoria da seleção natural, mas tampouco sem ser a sua auxiliar ou subsidiária, viria explicar aquilo que esta, por sua própria natureza, e não por uma limitação conjuntural, não podia explicar (CAPONI, 2011, p.214).

Embora a biologia do desenvolvimento seja parte importante da Biologia Evolutiva, outras informações são necessárias para explicar tanto as semelhanças como as diferenças entre os organismos. A genética de populações enquadra muitas de suas explicações em termos da operação da seleção natural, da deriva genética e do fluxo gênico na variação genética. Porém, a genética de populações não pode, a priori, prever a fonte ou a forma de seleção natural para a qual podem ser requeridas informações ecológicas ou outras (FUTUYMA, 2002).

A seleção só pode ter efeito a partir de uma variação genética existente, expressada em caracteres fenotípicos. Alguns caracteres fenotípicos, tais como estrutura e atividade de algumas proteínas, têm uma relação direta, quase um para um, com os

genes que as codificam; mas mesmo no caso das proteínas, em geral tal relação é inexata devido às modificações pós-tradução. Para características morfológicas, a relação entre estrutura gênica e fenótipo é muito mais complexa, envolvendo tanto influências ambientais como interações no interior do organismo em desenvolvimento (FUTUYMA, 2002).

Essa complexidade envolvida nos processos gênicos, desde vias metabólicas, até expressões fenotípicas marcadas pelas características visíveis do organismo, guarda uma infinidade de “falcatruas operacionais”. Toda variedade orgânica existente (e aquela que já se extinguiu) só foi viável graças ao resultado dessas “falcatruas”, que possibilitaram caminhos econômicos para a função gênica.

Antes da seleção natural entrar em ação, esses mecanismos já foram ativados durante o processo ontogenético e viabilizaram padrões específicos de organização embriológica, bem como restringiram alguns caminhos de origem de formas.

Dessa forma, uma contribuição importante da perspectiva desenvolvimental é a capacidade de descrever, para vários tipos de organismos, as condições sob as quais prevalecem essas propriedades genéticas. Os estudos desenvolvimentais devem fornecer uma estrutura para a compreensão de quais caracteres irão variar, como irão covariar e, na realidade, se eles podem ou não passar a existir (FUTUYMA, 2002).

A maioria dos biólogos evolutivos compreensivelmente se preocupou em explicar a grande variedade de características exibidas pelos organismos. Só recentemente a atenção se voltou para a questão do por quê linhagens particulares de organismos não são até mais variáveis e diversas do que de fato são. É difícil afirmar, pois não existem estrelas-do-mar fotossintéticas, aves ou tartarugas vivíparas, rãs que se reproduzem no estado de girino, palmeiras no Canadá. Qualquer escritor de ficção científica ou biólogo pode facilmente imaginar criaturas que nunca existiram. Podemos obter entendimento da evolução caso consideremos os tipos de restrições possíveis e tentemos estudá-las (FUTUYMA, 2002, p.670).

É nesse sentido que percebemos porque as críticas ao gradualismo e ao programa adaptacionista parecem estar mais reiteradamente explicitadas na literatura sobre a Evo-Devo.

Dizer que a macroevolução não é um processo decorrente de sucessivos acúmulos de micromutações sempre foi uma objeção plausível; no entanto, não havia tanto conhecimento sobre as descrições ontogenéticas para afirmar que a ação gênica desse processo resultaria ou poderia resultar, rapidamente, em uma forma orgânica distinta, inédita.

Gould já afirmava sobre a participação do desenvolvimento nos caminhos originadores das novas formas. Mas, apesar disso, essa articulação entre a biologia evolutiva e a embriologia ainda precisava de mais dados para fazer-se válida e garantir credibilidade e espaço dentro da comunidade científica.

O que prospectamos responder ao longo da construção/elaboração deste trabalho são perguntas engendradas a partir de hiatos explicativos proeminentes na Síntese Moderna. A partir de compêndios fundamentados pelas análises epistemológicas e empíricas contemporâneas, prospectamos responder como, de fato, os caminhos ontogenéticos convergem e aproximam-se de algumas lacunas evolutivas até então não respondidas.

Futuyma (2002, p.651) elabora algumas questões sobre o papel do desenvolvimento na evolução:

1. Os processos desenvolvimentais podem dar origem a novos fenótipos descontínuos, e tais fenótipos frequentemente contribuíam pra a evolução? O desenvolvimento explica transições evolutivas que parecem não ter estados intermediários?
2. O desenvolvimento pode explicar a origem de novas características?
3. Os processos desenvolvimentais ajudam a explicar a evolução de características complexas?
4. O desenvolvimento pode desviar ou restringir a direção da evolução?
5. Restrições originadas de processos desenvolvimentais poderiam explicar a falta de mudança evolutiva para estase do registro fóssil ou para a uniformidade entre espécies relacionadas?

Até esse momento, o texto buscou explorar um panorama acerca da elucubração epistemológica do contexto evolutivo desde Darwin. Procuramos evidenciar que os diálogos e debates epistêmicos existem há muito tempo junto à comunidade científica: todo conhecimento está sujeito à vulnerabilidade do tempo e do avanço das pesquisas empíricas. Os hiatos conceituais diagnosticados e/ou apontados são corolários de uma constante e necessária (re) formulação nos pressupostos científicos, próprios da natureza do conhecimento, da construção permanente que define uma ciência.

A asserção dos autores, embora bastante contundente, torna-se ponto de partida para futuros incertos no campo da pesquisa. No entanto, é certo que o amparo empírico de cada contexto é diferente e, portanto, é impossível prospectarmos as condições “científicas” futuras. É interessante notar, como as ideias de autores que produziram

conhecimento em épocas diferentes sobrepõem-se e prospectam ilações similares, como se os autores pudessem predizer o que, de fato, ainda não está, faticamente, fundamentado em suas proposições.

Assim, sobre a teoria evolutiva, podemos inferir uma tendência à expansão, marcada não pela inviabilização do darwinismo, mas pela causação única atribuída ao processo de seleção natural. Para tanto, revisitamos o passado, de forma a investigar a origem e consolidação desse processo no contexto evolutivo, de forma a entender quais questionamentos indicam a necessidade de atribuímos uma interpretação pluralista ao fenômeno evolutivo, bem como as nuances que, equivocadamente, dicotomizam o pensamento de célebres autores.

Como exemplo dessa sobreposição e retomada de ideias de autores diferentes, em contextos diferentes, temos que a Evo-Devo não só é um dos componentes fundamentais da Síntese Estendida como as descobertas acerca do desenvolvimento biológico retomam reiteradamente o que Stephen J. Gould escreveu em *Ontogenia e Filogenia*, em 1977 (MORAN, 2013)- o que foi mencionado em trechos anteriores sobre as críticas ao programa adaptacionista e ao gradualismo darwinianos.

9- EVO-DEVO: FINALMENTE A OBTENÇÃO DA RESPOSTA: COMO AS MAIS DIVERSAS FORMAS ORGÂNICAS FORAM FORJADAS PELO PROCESSO EVOLUTIVO?

“A natureza parece gostar de variar o mesmo mecanismo de infinitas maneiras... ela só abandona uma categoria de produção após haver multiplicado seus indivíduos de todas as formas possíveis”. (Denis Diderot, 1753 apud Carrol, 2006, p.129).

A teoria mais simples e por muito tempo a mais aceita sobre as relações entre os genes e a evolução de formas complexas era a de que novos padrões morfológicos e estruturais só surgiriam a partir de sequências gênicas inéditas. A atração intuitiva que essa noção exerce é compreensível. Já que a forma de cada espécie está atrelada a informações genéticas singulares, deduz-se que formas originais precisam de novas informações- novos genes (CARROL, 2006).

A partir desse desmembramento lógico encontramos a resposta? É a partir do surgimento de “novos genes” que a grande quantidade de criaturas que habitam o nosso planeta foi originada? Temos tantas sequências gênicas quanto arquiteturas

morfológicas? E se assim for, por que Carrol (2006) mencionou a palavra forjar? A evolução precisaria forjar mecanismos para a origem de sequências gênicas inéditas?

A Evo-Devo constitui o terceiro grande ato de uma síntese evolutiva ainda em curso (CARROL, 2006). A primeira revolução darwiniana tratou de consolidar dois dos pressupostos de Darwin: evolução como fato e teoria da origem comum. Os outros três: gradualismo, especiação e seleção natural foram amplamente aceitos após a edificação da Síntese Moderna (MAYR, 2009).

Esse campo de pesquisa foi capaz de preencher uma lacuna existente na Síntese Moderna- a embriologia. Uma vez que a Evo- Devo explica, principalmente, a origem repentina de algumas formas e a restrição e/ou inviabilidade morfológica de outras, ela pôde integrar-se e crescer muito à genética molecular e a paleontologia (CARROL, 2006). Entretanto, as especulações quanto à mudança ou obsolescência de paradigma- a Síntese Moderna- residem na “natureza inesperada de algumas de suas principais descobertas e da qualidade e profundidade sem precedentes dos dados que fornece para resolver questões antes sem resposta” (CARROL, 2006, p.250).

As primeiras grandes descobertas postas pela evo-devo revelaram que, apesar das grandes diferenças de aparência e fisiologia, todos os animais complexos- moscas e paapa-moscas, dinossauros e trilobitas, borboletas, zebras e homens- compartilham um “kit de ferramentas” comum contendo genes “mestres”, que governam a formação e a diferenciação de seus organismos (CARROL, 2006, p.17).

Os novos dados e paradigmas da embriologia e da evo-devo eliminam quaisquer vestígios da estagnada retórica antievolucionista sobre a utilidade das formas intermediárias ou a probabilidade do surgimento de estruturas complexas. A partir do avanço da pesquisa empírica, principalmente em relação à ação e expressão gênica, podemos ver como as modificações no desenvolvimento possibilitam o aumento da complexidade e da diversidade. “A riqueza dos novos dados da evo-devo ilustra um retrato vívido dos mecanismos de construção e evolução das formas animais” (CARROL, 2006, p.18).

O questionamento feito acima- “Precisamos de tantas sequências gênicas quanto arquiteturas morfológicas? ”- parece confrontar com a ideia do “kit de ferramentas”. “Se os conjuntos gênicos são tão amplamente compartilhados, como surgem as diferenças?” (CARROL, 2006, p.18). E então, o que seria mais convincente ou plausível para entendermos a existência de tamanha diversidade orgânica: Um número

quase infinito de sequências nucleotídicas ou sequências nucleotídicas que operam de formas diferentes dependendo do contexto e sincronização espaço-temporal?

Como a maioria dos fatores biológicos, o desenvolvimento não opera apenas a partir de uma perspectiva unívoca e pré-determinada: pequenas mudanças no tempo e espaço na ação do processo ontogenético podem desencadear múltiplos efeitos sobre o produto final, uma vez que essas “pequenas” mudanças no tempo de ativação ou no nível da atividade de um simples gene pode, a princípio, influenciar consideravelmente os sistemas de controle do desenvolvimento embrionário e subsequentemente, a expressão fenotípica decorrente desse processo:

Um exemplo ajudará a entender esse mecanismo. Estudos do desenvolvimento dos vertebrados revelaram que há um gene (chamado de *Hoxc6*), que é expresso na coluna vertebral. A fronteira de sua expressão na coluna sinaliza onde deverá ocorrer a transição entre vértebras cervicais e torácicas. Portanto, a origem de um plano corporal com um pescoço mais longo ou curto pode ser produzida pelo deslocamento da região em que o gene *Hoxc6* é expresso. As cobras representam um caso extremo: a região de expressão do *Hoxc6* foi tão deslocada anteriormente (em direção à cabeça) que nem há formação de vértebras cervicais: seu corpo longo resulta de perda do pescoço e aumento do tórax. É importante notar que o gene *Hoxc6* é muito semelhante em cobras e gansos. O que muda é a região em que ele é expresso e isso ocorreu porque os interruptores que o regulam mudaram ao longo da evolução. Em cobras, o interruptor só é acionado nas vértebras perto da cabeça. Já em gansos, ele é expresso longe da cabeça e o pescoço se estende até a 22^a vértebra (EL-HANI & MEYER, 2009, p. 03).

Ainda com relação à possibilidade de entendimento múltiplo do sistema genômico, como as sequências nucleotídicas podem agir de acordo com os padrões epigenéticos?

A coerência e notoriedade da epigenética fundamentam-se na caracterização já bem estabelecida de que as células de um metazotário complexo apresentam diferenciação morfológica e funcional apesar de todas terem idêntico conteúdo de DNA, portanto apresentam diferenças epigenéticas (ARAÚJO, 2006). Uma das ações epigenéticas mais conhecidas trata dos sistemas marcadores de cromatina, “cujo exemplo mais simples é o da conhecida metilação de DNA (um radical metila, CH₃ liga-se a uma das bases nucleotídicas do DNA – frequentemente a citosina – e é capaz de alterar a expressão de certos genes)” (ARAÚJO, 2006, p.14). Outra variante da ação epigenética, ocorre por meio do silenciamento de algumas partes do DNA Ou RNA,

Por exemplo, um gene para coloração da flor de petúnias, o gene púrpura, incorporado a uma planta seria esperado manifestar-se com um incremento na pigmentação da flor; para surpresa dos pesquisadores, a cor resultante da flor foi branca, ou variegada. Estudos posteriores mostraram que este silenciamento na expressão de um gene era devida à ação de pequenas moléculas de RNA. Posteriormente verificou-se que uma das funções dessas pequenas moléculas estaria relacionada a um sistema de defesa celular, sendo, portanto, de natureza adaptativa. A relevância do sistema fica mais evidente quando se sabe que essas moléculas poderiam estar envolvidas em sistemas de proteção da ação de elementos transponíveis, os transposons, objetos de estudo de uma grande parcela de pesquisadores da genética na atualidade (ARAÚJO, 2006, p.14).

As diferenças entre chimpanzés e humanos resultariam, então, principalmente de alterações genéticas em poucos sistemas regulatórios, enquanto a substituição de aminoácidos, raramente seria o fator chave de uma mudança adaptativa (MORAN, 2013).

Diferenças na regulação podem envolver mutações pontuais de genes regulatórios ou rearranjos na ordem dos genes ocasionados por eventos cromossômicos familiares como inversão, translocação, fusão e fissão. Estudos indicam que pelo menos uma fusão e dez grandes inversões e translocações separam chimpanzés e humanos (MORAN, 2013).

O mais importante para a diversidade não é o conteúdo ou a quantidade de variedade sequencial do kit de ferramentas genéticas de um animal e sim, “a maneira como você as usa”. A construção das formas depende da ativação e desativação de determinados genes em diferentes momentos e posições ao longo da embriogênese. Logo, as diferenças na forma também surgem de alterações evolutivas de determinados genes nesses locais e momentos, sobretudo daqueles que afetam o número, o formato ou o tamanho de uma estrutura. As diversas maneiras por meio das quais um gene pode ter sua utilização alterada, criam uma enorme variedade nas arquiteturas corporais e na organização de cada estrutura (CARROL, 2006).

A Evo-Devo reconfigura a forma de ensinar os princípios evolutivos, uma vez que concebe o enredo da evolução a partir das mudanças na embriogênese e nos genes- já que novas descobertas atribuem outras funções aos genes, além da transcrição. Além disso, os padrões de expressão gênica em embriões e os inventários completos de genes do kit de ferramentas em diferentes espécies indicaram a eficácia e imprevisibilidade da

ação gênica. Os genes não atuam independentemente uns dos outros e não produzem apenas um efeito (CARROL, 2006; MAYR, 2009).

No capítulo um defendemos a abordagem integrada da biologia, fundamentando nosso pensamento em exemplos biológicos. Ao acordamos com a inserção da Evo-Devo na abordagem evolutiva, precisamos entender, primeiramente, como a expressão gênica pode elucidar proposições sobre inovações morfológicas repentinas. De que forma, essa expressão pode “forjar” mecanismos de ação que justifiquem a possibilidade da existência de tamanha diversidade morfológica?

Imaginemos as incontáveis características que nos permitem funcionar. Quer consideremos os nossos olhos, o nosso cérebro ou o nosso sistema imunológico, encontramos características complexas, admiravelmente adequadas às funções que desempenham. Considerando a nossa espécie de forma ampla, vemos uma variação quase infinita (FUTUYMA, 2002).

Qual é o responsável por toda essa variação? Ampliando o nosso campo visual e comparando-nos com outros organismos, encontramos uma série de características que compartilhamos com muitas outras espécies. Estamos ligados aos macacos pelas unhas dos dedos; a todos os mamíferos pelos cabelos, pelo leite e pela estrutura dos dentes e das mandíbulas; aos répteis, aves e anfíbios pela estrutura básica de nossos braços e pernas; e a todos os vertebrados, incluindo os peixes, pelas vértebras e muitas outras características do nosso esqueleto. Investigando mais a fundo, vemos que a estrutura das nossas células nos une a todos os animais e que as funções bioquímicas das nossas células são virtualmente idênticas em todo um grupo ainda maior de organismos, os eucariontes: não apenas animais, mas também plantas, fungos e protozoários tais como as amebas. Os elementos mais fundamentais de tudo são o DNA, veículo da hereditariedade, uma variedade de aminoácidos que constituem os “tijolos” das proteínas e o código específico contido no DNA para cada um desses aminoácidos. Todas essas características são as mesmas em todos os seres vivos, desde as bactérias até os mamíferos. Tantas coisas comuns entre espécies exigem uma explicação (FUTUYMA, 2002, p.530)

Qual a explicação para as variações, tanto dentro das espécies como entre elas?

Acredita-se atualmente que todos os organismos conhecidos sejam descendentes de um ancestral comum que existiu há mais de 3,5 bilhões de anos. As provas do parentesco entre todas as formas de vida incluem aspectos comuns tais como a estrutura celular, a composição de aminoácidos das proteínas, o código genético quase universal e a quase-identidade das seqüências de nucleotídeos de muitos genes que têm funções similares em organismos muito diferentes. Por exemplo, os genes que comandam os

primeiros passos no desenvolvimento embrionário, especificando os eixos e as principais regiões do corpo do futuro embrião, têm seqüência, organização e funções básicas similares nos insetos e nos vertebrados; efetivamente, alguns genes de rato, se implantados no genoma de uma mosca, podem “instruir” os genes da mosca a desempenharem suas funções normais no desenvolvimento (FUTUYMA, 2002).

Provas de um ancestral comum também são fornecidas por seqüências não-funcionais de DNA chamadas *pseudogenes*: genes “inativos” que perderam sua função, mas são compartilhados por um grande número de espécies (FUTUYMA, 2002).

Inferências de um ancestral comum baseadas em comparações entre espécies vivas encontraram amplo respaldo em evidências fósseis diretas de transições evolutivas. Toda a evolução dos anfíbios terrestres a partir dos peixes, dos répteis a partir dos anfíbios, das aves a partir dos dinossauros, dos mamíferos a partir dos répteis e das baleias a partir de mamíferos terrestres pode ser seguida pelo registro fóssil (FUTUYMA, 2002).

Entender a interação recíproca dos mecanismos do desenvolvimento e a evolução dos grandes grupos é um caminho que pode e/ou poderá esclarecer muitas das obscuridades concernentes à forma de operação gênica e, subsequentemente as grandes e repentinas mudanças orgânicas engendradas no contexto evolutivo.

Essa compreensão dos processos e mecanismos macroevolutivos que desencadaram o surgimento dos grandes grupos de organismos multicelulares fica difícil quando entendida como mera extensão e/ou acumulação dos processos microevolutivos (HARTFELDER, 2006).

O cerne dessas discussões sobre a natureza da expressão gênica e de seus produtos recai sobre a obscuridade referente ao entendimento dos mecanismos da macroevolução, isto é, quais mecanismos e fatores regem não só a conservação como também a transformação repentina e, possivelmente inédita, das morfologias orgânicas já concebidas.

A própria Síntese Evolutiva sustenta que as transformações pelas quais passaram e passam os seres vivos, no tempo geológico e ecológico, podem ser caracterizadas, dentre outros aspectos pela “acumulação continuada de diferenças genéticas, principalmente devido à atuação da seleção natural que resulta em novos táxons acima do nível de espécie pelos mesmos processos que atuam neste nível”. (ARAÚJO, 2001, p.50) Ou seja, as grandes mudanças morfológicas, comumente identificadas por

macroevolução tratar-se-ia simplesmente da microevolução desenrolada e/ou acumulada sobre longos períodos de tempo (ARAÚJO, 2001).

Essa aproximação tanto processual quanto semântica dos processos de micro e macroevolução abordados por essa teoria reforçou a capacidade de criação da seleção natural para que novas formas orgânicas fossem engendradas. Assim, durante muitos anos, a origem das formas orgânicas foi entendida, na maioria dos casos, como resultado de processos seletivos.

Hoje, dada a notória capacidade de ação sistêmica da maioria dos processos biológicos e o entendimento pluralista do quadro evolutivo, os questionamentos acerca da diversidade orgânica são restituídos. Embora as especulações sobre a quantidade das criaturas existentes ou já extintas sejam objeto de estudo há muitos anos- o próprio Darwin fora motivado pela diversidade orgânica-, os caminhos para a obtenção de respostas, perpassa e/ou requer um enredo pluralista.

Esse enredo pluralista permite que expliquemos, por exemplo, como surgiram, a partir de formas mais simples e em processos de ramificação evolutiva, os diferentes planos do corpo dos atuais 35 filos do reino animal (HARTFELDER, 2006).

Tenho dois pequenos embriões em espírito, para os quais esqueci de anotar os nomes, e não sou muito capaz de determinar a qual classe eles pertencem. Eles poderiam ser lagartos, pequenos pássaros, ou ser mamíferos muito jovens. O desenvolvimento da cabeça e do tronco nesses animais é tão parecida. As extremidades ainda não estão presentes nesses embriões. Mesmo que elas estivessem presentes nos primeiros estágios de desenvolvimento, elas não ensinariam nada já que as patas dos lagartos e mamíferos em desenvolvimento, as asas e patas das aves, como as mãos e pés das pessoas, possuem a mesma forma básica. (Karl Ernst von Baer (1828) apud CRAWFORD, 2013).

Em um primeiro momento o trecho acima poderia denotar uma ideia paradoxal: Se o cerne da organização dessa pesquisa faz referência às “infinitas formas de grande beleza” existentes no mundo e essa diversidade morfológica culmina em objeções relevantes ao paradigma da Síntese Moderna, por que mencionar uma citação, cujo principal objetivo é demonstrar a semelhança ontogenética de alguns embriões?

Embora a contradição pareça evidente, é a partir desses padrões característicos do processo ontogenético – apesar de não unicamente devido a esse processo- que há possibilidades de que as mais diversas formas sejam concebidas e alguns mecanismos originadores de diversidade sejam “forjados”. Estudar o desenvolvimento revela que, em Biologia, atribuir um sentido único aos processos biológicos culmina em uma perda de potencial processual que guarda respostas para muito do que ainda permanece obscuro nessa ciência.

A Evo-Devo é um campo de pesquisa recente e demonstra a participação do processo ontogenético nos encaminhamentos evolutivos, principalmente a partir de elucidações sobre o fenômeno de bricolagem gênica envolvido na evolução. O padrão modular do desenvolvimento e os genes *hox* são exemplos de como o desenvolvimento pode operar, de forma a ampliar o “rol” de formas orgânicas existentes. Imaginemos que se para cada forma orgânica existente do mundo (cerca de 8,7 milhões de espécies), tivéssemos padrões analogamente específicos de programações genéticas. Seria possível existirem tantas combinações distintas? Mesmo considerando interferências abióticas e epigenéticas, seria possível a existência de tantas sequências nucleotídicas e caminhos ontogenéticos exclusivos para cada morfologia concebida?

A Natureza da Biologia opera de forma tão sincronizada que viabilizou a existência de percursos “econômicos”, a partir dos quais, uma infinidade de formas pôde ser criada, sem a necessidade de um caminho completamente inédito. François Jacob fez uma analogia pertinente para referir-se a esses “reaproveitamentos” ou cooptações, afirmando que a evolução pode operar, também, graças ao mecanismo de bricolagem.

A partir desse contexto, faz-se necessário que comecemos a apreciar o imenso trabalho do desenvolvimento embrionário- construir animais grandes e complexos a partir de uma célula diminuta. A embriogênese envolve milhões de detalhes e cada um deles afeta o resultado final. “Um pequeno desvio num processo inicial pode provocar uma sequencia de efeitos posteriores. Que processos podem tanto dar origem a um dinossauro gigantesco como pintar os detalhes sutis dos ocelos em borboletas?” (CARROL, 2006, p.31).

Embora ovos, zigotos e morfologias de adultos (ex: embriões recentes fertilizados e em divisão) assumam diversas formas, tamanhos e estratégias de sobrevivência, em algum momento e/ou fase, essa variedade fenotípica compartilha semelhanças significativas. Essa homologia morfológica é identificada em algum

momento do desenvolvimento, uma vez que todos os embriões vertebrados passam por estágios de desenvolvimento, onde parecem praticamente idênticos (CRAWFORD, 2013).

Por que uma tartaruga, pintinho, cachorro ou embrião humano parecem tão semelhantes em uma determinada fase de desenvolvimento? Qual é a razão e relevância dessa similaridade no projeto de corpo? (CRAWFORD, 2013). E o que essa similaridade tem a dizer sobre a evolução?

O tubo neural com as vesículas cefálicas e as suas respectivas estruturas sensoriais (nariz, olho, ouvido), a musculatura segmentar a partir dos somitos, as extremidades (nadadeiras, pernas ou asas), o coração na região ventral do corpo, e os arcos branqueais na região buccal são órgãos característicos de todos os vertebrados no processo de organogênese (HARTFELDER, 2006). Dessa forma, essas características são visíveis em qualquer vertebrado durante uma determinada fase da organogênese e é nesta fase, portanto, que um embrião de peixe é muito parecido com um embrião de galinha ou porco. Essa fase que peculiariza o filo é denominada de fase filotípica. Em momento subsequente a tal similaridade fenotípica, a diferenciação dos órgãos progride e os embriões dos diferentes vertebrados gradualmente exibem as suas características de família, gênero e espécie. “A fase filotípica de qualquer grupo do reino animal pode ser interpretada como o gargalo de uma ampulheta pelo qual os embriões de um filo devem passar” (HARTFELDER, 2006, p. 94).

Para Gould e Lewontin esse vestígio de herança evolutiva oferece um plano básico de corpo. Pela mesma razão que a morfologia dessa fase do embrião é referida como etapa *filotípica*, o plano genérico do corpo que se estabelece durante esse processo é criado por um programa de desdobramento da expressão do gene, denominado *zootipo* (CRAWFORD, 2013).

Nos últimos 25 anos, a identificação e caracterização de genes que regulam processos de desenvolvimento em organismos-modelo, tais como *Drosophila melanogaster* e o nematódeo *Caenorhabditis elegans*, bem como a comparação destes genes com os seus homólogos presentes em outros organismos têm contribuído muito e modificado significativamente a maneira de se pensar sobre a interação e dependência mútua entre desenvolvimento de um organismo (ontogênese) e a evolução de grupos de organismos (filogênese) (HARTFELDER, 2006).

Obviamente, em termos puramente descritivos, pelo simples fato de a diferenciação espécie-específica iniciar-se mais cedo nos artrópodos do que nos

vertebrados, a fase filotípica dos artrópodos representa uma fase da organogênese bem mais inicial do que a faríngula dos vertebrados. No entanto, podemos comparar diretamente os dois grupos no que é referente aos genes expressos durante a fase filotípica. Os genes relevantes, nesta comparação, não são genes estruturais, que, geralmente, são genes codificadores de enzimas metabólicas ou de actina, tubulina, canais de sódio e outros, mas sim genes que definem o destino de segmentos inteiros do corpo, portanto, genes reguladores, cuja função é desencadear cascatas de outros genes nos processos de diferenciação (HARTFELDER, 2006).

Estes genes homeóticos, que são também conhecidos como genes Hox devido a um elemento característico na sua seqüência de nucleotídeos, a homeobox, são genes de grande importância pois controlam a expressão de milhares de outros genes. Os genes Hox são verdadeiros genes-mestres na construção do corpo e, mutações nestes genes, geralmente, acarretam conseqüências gravíssimas (HARTFELDER, 2006).

Embora todo o kit de ferramentas da arquitetura corporal já estivesse presente, seu potencial foi amplamente subaproveitado por um período considerável. Em boa parte, o potencial desse kit foi utilizado graças à evolução de interruptores e redes gênicas e a deslocamentos das zonas hox no Cambriano e em períodos mais recentes (CARROL, 2006, p.153).

A princípio, muitos paleontólogos defenderam a ideia de que a expansão no número de genes Hox em animais houvesse desencadeado a explosão cambriana. No entanto, em uma pesquisa realizada por Carrol e seus alunos cujo intuito fora conhecer os genes dos ancestrais de artrópodes por meio do estudo dos genes hox de um ancestral- o Onychophora-, determinou que o último ancestral comum de onicóforos e artrópodes possuía todos os genes hox de artrópodes e a morfologias de todos os artrópodes posteriores- aranhas, lacraias, insetos e todo tipo de crustáceo- foram esculpidas pela mesma série de genes hox (CARROL, 2006).

Alguns pesquisadores acreditam que o aumento da complexidade dos planos corporais durante a evolução esteja relacionado diretamente ao aumento da complexidade dos conjuntos de genes Hox. Os invertebrados dispõem de apenas um aglomerado de genes hox e é provável que o ancestral comum de todos os cordados dispusesse de um único conjunto de 13 genes hox (MAYR, 2009).

Acredita-se que as variações no tipo e na expressão dos genes hox sejam, ao menos em parte, responsáveis pelos diferentes planos corporais que distinguem os filos animais. Curiosamente, as funções de muitos genes hox foram muito bem conservadas

durante a evolução, a tal ponto que, por exemplo, certos genes do anfioxo podem substituir com sucesso genes homólogos em embriões de camundongo. Ainda não se sabe se os novos planos corporais surgiram graças a ou apesar de os aglomerados de genes *hox* apresentarem uma arquitetura extremamente conservadora e suas funções terem sido mantidas durante a evolução (MAYR, 2009, p. 141).

Há evidências empíricas de que esses genes desempenhem um papel fundamental na especificação das diferentes regiões no embrião em formação. Os genes *hox* estão dispostos em aglomerados genômicos e codificam uma classe de fatores de transcrição (genes que controlam a expressão de outros genes); além disso, o que é muito importante, esses genes são expressos de forma sequencial, tanto do ponto de vista espacial como do ponto de vista temporal. Os genes situados na parte anterior do aglomerado *hox* são expressos mais cedo e na parte anterior do embrião, enquanto os genes situados na parte posterior são expressos mais tarde e na parte posterior do embrião (MAYR, 2009).

Por exemplo, fica claro que as sequências reguladoras de DNA altamente conservadas do genoma se juntam em blocos maiores de regulação que podem expandir-se para englobar diversos genes. Essa tendência enfatiza o grau no qual a herança ancestral desempenha um papel em direcionar e restringir a genética que sustenta a embriogênese e a evolução, respectivamente. Os esforços recentes de sequenciamento indicaram que há um grande número de RNA transcritos, mas não traduzidos, e que, no entanto, desempenham um papel na regulação da atividade do gene. Muitos deles são transcritos de forma coordenada a partir de sequências que estão próximas a genes importantes (CRAWFORD, 2013).

O padrão de ação desses genes sugere uma possibilidade de revisitarmos as especificações evolutivas e entendermos como a modularidade do genoma tornou-se uma propriedade emergente que trabalha sobre a embriogênese e a evolução (CRAWFORD, 2013).

A célula única de um novo embrião desenvolve-se muito rapidamente em uma variedade de tipos de células e tecidos extremamente complexos e susceptíveis a mudanças repentinas. Os estudos de vertebrados tetrápodes aludem a maneira de origem das novas morfologias, uma vez que os animais desse grupo guardam peculiaridades conspícuas de forma e função do corpo na fase adulta e, no entanto, passam por uma fase embrionária em que são, praticamente indistinguíveis. Uma das causas principais dessa semelhança reside na conservação de genes ancestrais e suas respectivas redes de

sinalização - a chamada "homologia profunda" que subjaz a morfogênese (CRAWFORD, 2013).

Não importa se estamos estudando mosca, rã, peixe ou humanos, os genes semelhantes estão direcionando a formação de órgãos e estruturas análogos (CRAWFORD, 2013).

A importância evolutiva dessa conservação pode ser compreendida com um exemplo. A formação de apêndices em vertebrados inicia-se com a atividade de um conjunto de genes que estimula o desenvolvimento dessas estruturas, mas sem que sejam diferenciadas entre apêndices anteriores e posteriores. De modo concomitante, nos mais diversos animais, ocorre a expressão diferencial de outro conjunto de genes (Tbx5 nos anteriores Tbx4e outros nos posteriores), que culminam na diferenciação entre esses apêndices (MEYER E EL-HANI, 2005).

A etapa final ainda não é completamente conhecida, mas há uma proposta sobre como ela ocorre: em diferentes espécies, o Tbx5 estaria modulando a expressão de genes diferentes. Assim, em aves, ele desencadearia uma cascata de eventos que levam à formação de uma asa, enquanto em mamíferos, ele estimularia outro conjunto de genes, que levariam à formação de um antebraço (MEYER E EL-HANI, 2005).

Esse modo de operação revela que o desenvolvimento se dá de maneira modular: há um conjunto de genes que atua na etapa de formar apêndices, outro que influencia na diferenciação entre os anteriores e posteriores e ainda outros genes que controlam os processos que levam à forma final do apêndice (se ele vai ser uma asa ou uma perna, por exemplo). Essa sincronia gênica tem implicações evolutivas extremamente relevantes: significa que é possível alterar uma parte do desenvolvimento, sem prejudicar outra. O surgimento de asas não exige uma reformulação total do desenvolvimento dos apêndices dos vertebrados: pelo contrário, as asas foram cooptadas a partir de um patrimônio genético preexistente, analogamente a essa sincronia gênica. Além disso, a modularidade significa que há mais "liberdade" para o surgimento de mudanças: por exemplo, o surgimento de asas alterou os apêndices anteriores, mas sem precisar afetar os posteriores ou ainda outras etapas do desenvolvimento (MEYER E EL-HANI, 2005).

As primeiras etapas do desenvolvimento das penas são as mesmas observadas no desenvolvimento dos cabelos e escamas: uma camada da epiderme se torna espessa e cresce para fora, originando um “tubo”, que é chamado de folículo. O destino desse folículo depende dos genes que atuam nas células; no caso das penas, há um par de genes (chamados de Bmp2 e Shh) que produz proteínas que regulam a proliferação das células. É a sequência temporal e espacial em que esses genes são ligados e desligados que condiciona a forma que a pena terá. O que é particularmente fascinante é que esses dois genes não são de modo algum exclusividades do desenvolvimento de penas; eles atuam em várias outras etapas do desenvolvimento em vertebrados, regulando a formação de apêndices (braços, nadadeiras, asas) de dígitos (dedos) e controlando a formação de cabelos e unhas. Mais uma vez, vemos um processo de bricolagem em ação: genes preexistentes participam da construção de uma nova estrutura (MEYER E EL-HANI, 2005, p. 101-102).

A arquitetura modular dos artrópodes e dos vertebrados é, em parte, responsável por seu enorme sucesso. Foi a modularidade dos artrópodes que permitiu o surgimento de diferentes adaptações em uma mesma espécie e invenções que deram origem ao mais diverso grupo de animais do planeta. Nos vertebrados, a concepção modular do corpo permitiu o desenvolvimento do quarto dedo alongado que sustentava as asas dos pterossauros ou dos muitos dedos longos das asas dos morcegos e, também das centenas de vértebras das serpentes ou a redução dos espinhos nos esgana-gata. A modularidade permite a especialização- por vezes extrema- de partes individuais do corpo, sem que as demais sejam afetadas (CARROL, 2006).

Embora todos os vertebrados possuam coluna vertebral modular, há uma grande variação no número de vértebras entre a cabeça e a cauda dos distintos animais. Os sapos possuem menos de uma dúzia, os seres humanos têm 33 e as serpentes podem chegar a algumas centenas. Também existem vários tipos de vértebras, como cervicais, torácicas, lombares, sacrais e caudais. “As principais diferenças entre elas, em qualquer animal, estão no tamanho, no formato e na presença ou ausência de estruturas adjacentes, como costelas. Diferentes vertebrados possuem quantidades distintas de cada tipo vertebral” (CARROL, 2006, p.34).

Um exemplo ajudará a entender esse mecanismo. Estudos do desenvolvimento dos vertebrados revelaram que há um gene (chamado de *Hoxc6*), que é expresso na coluna vertebral. A fronteira de sua expressão na coluna sinaliza onde deverá ocorrer a transição entre vértebras cervicais e torácicas. Portanto, a origem de um plano corporal com um pescoço mais longo ou curto pode ser produzida pelo deslocamento da região em que o gene *Hoxc6* é expresso. As cobras representam um caso extremo: a região de expressão do *Hoxc6* foi tão deslocada anteriormente (em direção à cabeça) que nem há formação de vértebras cervicais: seu corpo longo resulta de perda do pescoço e aumento do tórax. É importante notar que o gene *Hoxc6* é muito semelhante em cobras e gansos. O que muda é a região em que ele é expresso e isso ocorreu porque os interruptores que o regulam mudaram ao longo da evolução. Em cobras, o interruptor só é acionado nas vértebras perto da cabeça. Já em gansos, ele é expresso longe da cabeça e o pescoço se estende até a 22ª vértebra (EL-HANI & MEYER, 2009, p. 03).

Um padrão semelhante aplica-se à morfologia e a diversidade dos artrópodes. Esses animais são formados por módulos repetitivos que, na região do tórax (atrás da cabeça), podem variar de 11 segmentos, em insetos, até dez em centípedes e milípedes. Os grupos de segmentos distinguem-se um dos outros (por exemplo, torácicos e abdominais) pelo tamanho e a forma - mas principalmente pelos apêndices que deles se projetam (de cada segmento torácico dos insetos projeta-se um par de patas, o que não ocorre nos segmentos abdominais) (CARROL, 2006).

“Por trás da modularidade anatômica dos adultos está a geografia modular do embrião e a lógica modular dos interruptores genéticos, permitindo que a modificação evolutiva ocorra somente em uma parte da estrutura, de modo independente nas demais”. (CARROL, 2006, p.178).

Existe uma conexão entre a modularidade e o êxito da diversificação evolutiva. A observação da arquitetura modular e das distintas quantidades e tipos de módulos pode nos fornecer indicações importantes sobre os processos envolvidos na criação de artrópodes e vertebrados (CARROL, 2006).

A partir dos exemplos, fica fácil entender porque dizemos que a evolução opera a partir de processos de bricolagem e como, a partir de um número finito de sequências gênicas, a evolução pôde “forjar” as formas tão distintas e quase infinitas já existentes no planeta.

No entanto, se esse processo de bricolagem é tão potencial para gerar tamanha profusão de formas orgânicas, por que algumas morfologias nunca foram e/ou serão encontradas no planeta? Por que a seleção natural não é capaz, ao longo de seleções

sucessivas, de triar formas que sejam perfeitamente adaptadas a determinados ambientes, em determinado tempo evolutivo? Não poderíamos pensar que a partir dessa bricolagem quaisquer características fenotípicas poderiam surgir?

10- NEM TUDO QUE RELUZ É OURO: O DESENVOLVIMENTO TAMBÉM RESTRINGE. POR QUE NÃO NUNCA ENCONTRAMOS DETERMINADAS FORMAS ORGÂNICAS?

“Se o desenvolvimento não impusesse restrições, poderíamos imaginar que seriam geradas as mais mirabolantes e variadas formas de seres vivos. Como a variação que vemos no mundo que nos cerca revela que nem todas as formas imagináveis existem, temos de oferecer alguma explicação para as formas que faltam” (MEYER E EL-HANI, 2005, p. 103).

Para iniciar esse tópico, fazemos referência, novamente, às formas. Mas, desta vez, a ênfase e questionamentos são relativos à ausência de algumas morfologias e não à grande variedade existente. Embora a consolidada metáfora darwiniana sobre as “infinitas” formas de grande beleza tenha sido parafraseada e eternizada pelo embriologista Sean Carroll, o termo “infinitas” referencia e ostenta a grande diversidade morfológica existente no planeta, a partir de processos de criação interativos que envolvem sincronizações espaços temporais. Já nos debruçamos, no tópico acima, sobre o mecanismo de ação da expressão gênica e as consequências fenotípicas e evolutivas desses padrões.

A paráfrase não denota a palavra infinito em um sentido estrito, uma vez que, embora devamos considerar a grande diversidade, essas morfologias não são e, provavelmente nunca serão infinitas, mesmo com toda imprevisibilidade dos mecanismos de ação gênica, acaso e ainda a interferência e/ou incidência do ambiente.

Por que parece existir um “padrão” determinado nas características de uma espécie? Por que temos 2 pernas e não 3, por exemplo?

Talvez o caminho inicial para traçarmos respostas plausíveis a esse questionamento seja entender que o repertório das formas efetivamente geradas pela evolução é mais restrito do que o universo das formas biológicas funcionalmente viáveis, ou seja, embora tenhamos uma admirável quantidade de diversidade orgânica, se todos os padrões morfológicos fossem viáveis ontogeneticamente, haveria ainda muito mais fenótipos disponíveis (e provavelmente identificáveis por nós) para atuação da seleção natural. O modo como a Evo-Devo explica a restrição ou limitação na

geração de formas vincula-se às exigências organizacionais da ontogenia: há morfologias que a evolução não pode gerar porque exigiriam reprogramações inviáveis da ontogenia. A evolução só pode ocorrer segundo as sequencias e trajetórias permitidas por essas exigências organizacionais (CAPONI, 2012).

Um interessante exemplo de restrição pode ser dado em relação ao ramo dos tetrápodes: neste grupo, podemos notar que não são encontradas, desde os organismos mais plesiomórficos aos mais derivados, uma variação que tenha permitido originar indivíduos com seis ou oito, ou qualquer outro número diferente de quatro patas. Esta constatação de invariância possivelmente poderia ser explicada com base na compreensão de um rigoroso sequenciamento progressivo das etapas durante o desenvolvimento dos tetrápodes, o qual foi herdado de seus ancestrais mais remotos. Tal condição de estabilidade de padrão nos indica que o percurso descrito pelo padrão desenvolvimental desses animais impossibilita uma variação em relação ao número de patas. Este exemplo dado pode nos ajudar a compreender como a seleção natural atua apenas sobre um repertório limitado de possibilidades, as quais são estabelecidas por restrições decorrentes dos processos desenvolvimentais. Entre os tetrápodes, é possível a observação de uma infinidade de formas de patas adaptadas às mais diversas condições, contudo sempre em número de quatro (SANTOS, 2011, p.26).

Wallace Arthur, um dos teóricos mais importantes da Biologia Evolutiva do Desenvolvimento, costuma dar um exemplo particularmente esclarecedor dos direcionamentos que a ontogenia pode impor à evolução. Trata-se de uma família de centopeias, *Geophilomorpha*, cujos segmentos portadores de extremidades locomotoras podem variar entre 27 e 191 nas distintas espécies do grupo. Certamente uma grande variedade. Mas o surpreendente é que, a revelia dessa variação na possível quantidade de segmentos, nenhuma espécie apresenta número par deles. Eis aqui um exemplo de uma regularidade morfológica que não parece fácil de explicar por seleção natural. É difícil imaginar que, dadas as diversas condições ecológicas nas quais vivem as diferentes *Geophilomorpha*, nenhuma população, jamais tenha encontrado condições para passar de 27 para 28 segmentos, ou de 173 para 174, ou de 31 para 30. É difícil imaginar que, em momento nenhum, a transformação de um número ímpar em um par de segmentos possa ter permitido explorar oportunidades ou responder a pressões impostas pelo ambiente, de modo mais eficiente (CAPONI, 2012).

Evidentemente aconteceram muitas mudanças, mas sempre de um número ímpar para outro número ímpar de segmentos (CAPONI, 2012).

Parece casualidade demais. E quando são analisados os processos ontogenéticos envolvidos na constituição de segmentos em *Geophilomorpha*, a casualidade converte-

se em causalidade. Por uma constrição genética, tais segmentos só podem aumentar ou diminuir por duplas. E como não se pode passar de 0 a 2, porque aí nada haveria para duplicar, pode-se passar de 1 a 3, de 23 para 25, nunca 24 (CAPONI, 2012).

Se pensarmos de acordo com a seleção natural, a quantidade de segmentos das centopeias é como um controle de volume ou de sintonia, que pode não encontrar um ponto ótimo de eficiência por não se mover num contínuo, mas pulando, descontinuadamente (CAPONI, 2012).

Nós até poderíamos ter boas razões ecológicas para supor que, para determinada espécie de *Geophilomorpha*, seria bom perder um segmento. Poderíamos chegar à conclusão de que enfrentaria melhor os desafios e as oportunidades ecológicas com um segmento a menos, o que isso implicaria em uma importante economia de recursos. Mas, em virtude da constrição ontogênica a que me referi, essa espécie teria que perder pelo menos dois segmentos e isso poderia comprometer alguns desempenhos biológicos importantes para ela. Assim, permanecerá com seu número atual embora não seja o ótimo em termos ecológicos (CAPONI, 2012).

A interdição do número par de segmentos em *Geophilomorpha* pode não parecer um grande enigma evolutivo. Mas, talvez, analogamente, o fato de não existirem vertebrados exápodos (6 pernas) como os insetos, esteja relacionado a esse tipo de restrição ontogenética (CAPONI, 2012).

A biologia estruturalista enfatiza o papel das restrições no processo evolutivo. A menção as idéias de restrições denota que certas formas de seres vivos simplesmente nunca foram geradas e triadas pela seleção natural. A própria natureza histórica do processo evolutivo resulta em restrições. A seleção atua sobre formas que são variações de formas preexistentes. Novas variações não representam rupturas completas com o passado, mas, geralmente, correspondem a mudanças ligeiras na estrutura e/ou função dos organismos. Isso imediatamente impõe restrições ao processo evolutivo, dado que as novas formas devem ser semelhantes às ancestrais. As restrições históricas são intimamente relacionadas a outro tipo importante de restrição, concernente à natureza dos processos de desenvolvimento numa dada linhagem (MEYER & EL-HANI 2000).

Outra classe de restrições diz respeito às leis físicas que delimitam as possibilidades de construção dos seres vivos. Essa classe de restrições resulta em um afunilamento no universo de formas vivas que podem ser produzidas e, em vista disso, nem tudo pode ser feito pela seleção natural. A seleção não opera a partir de uma diversidade infinita de organismos variantes, mas com base em uma série limitada de

variedades possíveis. As restrições são enfatizadas por Goodwin, que chega a argumentar que o fator mais importante a considerar na compreensão da diversidade das formas dos seres vivos são as leis físicas responsáveis pela sua formação. A seleção natural seria pouco informativa no que concerne à diversidade dos seres vivos: aprenderíamos mais estudando seu desenvolvimento e as regras físicas responsáveis por sua construção, bem como seus elos de parentesco, do que por meio de explicações adaptacionistas, baseadas na operação da seleção natural (MEYER & EL-HANI 2000).

Pode-se argumentar, neste contexto, que é possível compreender a mudança evolutiva contemplando idéias adaptacionistas e selecionistas associadas, ainda, a uma compreensão das restrições ao processo evolutivo (MEYER & EL-HANI 2000).

Não é necessário negar a importância da seleção natural na evolução para reconhecer que a busca de princípios genéricos de auto-organização na morfogênese produziu resultados relevantes e o pensamento estruturalista tem contribuído significativamente para trazer de volta à atenção dos biólogos aos problemas envolvidos na gênese da forma orgânica. É nesse sentido que o próprio processo biológico abre caminho para a Evo-Devo e as contribuições que essa área de pesquisa pode fornecer para as ideias centrais do neodarwinismo e da biologia estruturalista.

Assim, como estamos a defender em toda tese, é preciso que estejamos atentos ao papel dos organismos e de outros fatores importantes no processo evolutivo, como as restrições associadas ao desenvolvimento, à natureza histórica das linhagens de seres vivos e às leis da física. Como escreve Goodwin (1994) a herança e a seleção natural continuam a desempenhar papéis significativos nesta biologia expandida, mas elas se tornam partes de uma teoria dinâmica mais ampla da vida, que enfoca a dinâmica dos processos emergentes (EL-HANI, 2002).

Maynard Smith et al (1985 apud Futuyama, 2002) definem uma restrição desenvolvimental como “um desvio na produção de fenótipos variantes causado pela estrutura, caráter, composição ou dinâmica do sistema desenvolvimental”(p.458) Em outras palavras, as propriedades do sistema desenvolvimental tornam improvável o surgimento de alguns fenótipos. As duas manifestações mais comuns de restrições de desenvolvimento são: a ausência ou escassez de variação, incluindo a ausência de uma base desenvolvimental para um caráter proposto que não existe, e fortes correlações (negativas ou positivas) entre caracteres durante o desenvolvimento. Tais manifestações, no entanto, não revelam por si mesmas, quais poderiam ser as restrições desenvolvimentais. (FUTUYMA, 2002).

A partir dessas constatações, é notório concluir que, se, de um lado, a organização dos mecanismos de desenvolvimento facilita inovações, de outro, ela impõe limites ao que é possível construir. Um cenário bastante aceito divide o desenvolvimento em três fases principais. Numa primeira fase, que ocorre logo depois da fertilização, o embrião estaria relativamente “livre” para sofrer alterações. Sabemos disso porque a inspeção minuciosa de embriões de espécies próximas muitas vezes revela grandes diferenças nessa fase do desenvolvimento. Essa flexibilidade no início do desenvolvimento resultaria da menor complexidade das interações entre as células do embrião, que estariam apenas começando a distribuir-se nos principais eixos que caracterizarão o animal, como aquele que diferencia o dorso e o ventre. Nesse sentido, as células não estariam ainda modulando significativamente o comportamento umas das outras e mudanças afetando uma célula ou mesmo um conjunto de células não impactariam, necessariamente, as demais (MEYER E EL-HANI, 2005).

Entretanto, a etapa seguinte- a fase intermediária do desenvolvimento- parece ser muito diferente. Espécies distintas apresentam embriões muito semelhantes nessa fase, tornando-se difícil distinguir embriões de animais que são muito diferentes em outras fases de sua vida, como peixes, aves e mamíferos (MEYER E EL-HANI, 2005).

Parece, portanto, que, nessa fase intermediária, poucas mudanças são toleradas. Isso decorre de uma intensa comunicação entre conjuntos de células que constituem os primórdios de diferentes órgãos e tecidos. É a partir dessa comunicação que as células de cada região do embrião estabelecem suas identidades, definindo os caminhos que seguirão em sua diferenciação. Temos, portanto, uma fase do desenvolvimento que é altamente integrada, na qual alterações em um conjunto de células podem ter repercussões importantes em outras regiões do embrião. Conseqüentemente, poucas mudanças são toleradas. Essa fase oferece restrições para mudanças evolutivas e essas restrições ajudam a viabilizar o entendimento da diversidade do mundo natural (MEYER E EL-HANI, 2005).

A biologia evolutiva do desenvolvimento assume que toda inovação evolutiva possível, toda variação que possa se oferecer ao escrutínio da seleção natural, precisa previamente, ser uma alteração ontogenética viável. Para que uma variação fenotípica surja e possa entrar em competição darwiniana com outras, algo no processo da ontogênese tem que ser atrofiado ou hipertrofiado, agregado ou suprimido, transposto ou deformado, adiado ou antecipado. Seja qual for a índole dessa alteração, ela tem que cumprir com dois requisitos fundamentais: em primeiro lugar, ela tem que ser acessível

ao sistema em desenvolvimento; quer dizer, ela tem que ser uma alteração passível de ser produzida nesse mesmo processo ontogenético e por ele mesmo. Em segundo lugar, ela deve ser tal, que nem aborte esse processo, nem gere um monstro totalmente inviável (CAPONI, 2012).

Além de física ou fisiologicamente possível, uma mudança evolutiva deve ser ontogeneticamente possível: a ontogênese pode ou não recapitular a filogênese; mas com certeza, ela a imita e orienta (CAPONI, 2012).

A ideia de restrição nos ajuda a explicar porque algumas formas não foram concebidas ao longo da história evolutiva, mesmo que, hipoteticamente, parecessem vantajosas: porque nenhum tetrápode desenvolveu mais de 5 dedos nos pés e não mãos, porque as lagartas não evoluíram para ter os olhos compostos das borboletas adultas e porque os porcos não evoluíram asas? Talvez essas características fossem interromper fatalmente outros aspectos do desenvolvimento do organismo – ou talvez essas características fossem requerer tantas outras mudanças drásticas no desenvolvimento que seria improvável que todas surgissem por mutação.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA.

A metodologia adotada para o desenvolvimento desse trabalho é de abordagem qualitativa. Caracteriza-se pela obtenção de dados descritivos a partir do contato direto e interativo do pesquisador com os participantes ou com a situação objeto de estudo. Segundo ANDRÉ e LÜDKE (1986), o contexto dos dados da pesquisa é de fundamental importância na coleta e, por se tratar de dados descritivos, os detalhes devem ser considerados. GODOY (1995) cita um conjunto de características elementares para a identificação de uma pesquisa desse gênero: o ambiente natural é a fonte direta de dados e o pesquisador o instrumento fundamental, o caráter é descritivo, as especificidades idiossincráticas dos participantes devem ser uma preocupação para o pesquisador e há enfoque indutivo (NEVES, 1996).

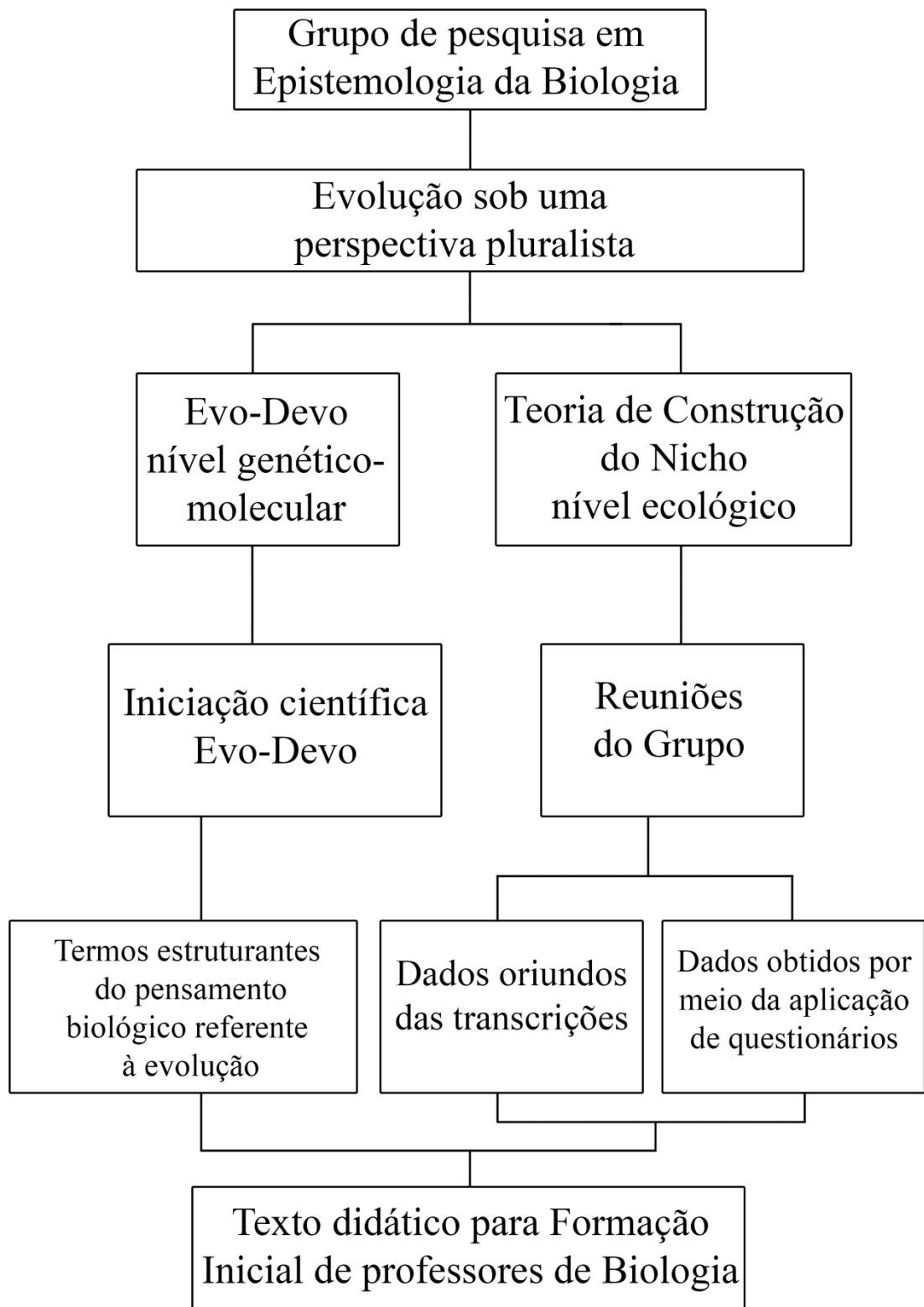
Como já mencionado, nossa pesquisa contemplou dois contextos distintos de coleta de dados- a pesquisa realizada com alunos de um curso de Ciências Biológicas por meio de um questionário e as reuniões do GPEB- e, portanto, teremos fontes de dados distintas: questionários dos dois contextos de pesquisa e as transcrições das reuniões realizadas pelo GPEB.

Para que a análise de dados seja realizada, faz-se necessário a elucubração e elaboração de uma estratégia de pesquisa orientada pelo viés sistemático e geral dessa pesquisa: trata-se de uma estrutura para a tomada de decisões e estabelecimento de ações (PATTON, 2002).

Já que nossos dados são derivados de diferentes fontes, o esquema inicial permite, a partir de tarefas e atividades aparentemente isoladas, a visualização de um conjunto, da integração de dados originalmente distintos para uma finalidade comum (PATTON, 2002): aqui, especificada pela investigação sobre elementos indicativos de uma provável articulação entre Epistemologia e Didática (PATTON, 2002).

Essa estrutura do estudo e as decisões específicas dos métodos podem ser mais bem compreendidas a partir de uma “estrutura estratégica geral”. Para esse autor, uma das principais peculiaridades da pesquisa de abordagem qualitativa é a possibilidade de diferentes meios dessa abordagem ser trabalhados conjuntamente, já que passam a constituir uma estrutura estratégica detalhada, que perpassa suposições fundamentais e pressupostos epistemológicos (PATTON, 2002).

Mediante estes pressupostos, apresentamos, a seguir, a estrutura estratégica geral da nossa pesquisa:



A estrutura da pesquisa, representada pelo esquema, permite um percurso mais maleável e vulnerável às condições e caracterizações do andamento da pesquisa: essa flexibilidade sugere certa abertura para uma investigação adaptativa consonante ao aprofundamento ou mudança na situação da pesquisa. Dessa forma, o pesquisador pode enviar os detalhes da pesquisa, na medida em que ela própria vai se consolidando e apresentando-se ao pesquisador, no momento em que os dados vão aparecendo e oferecendo caminhos plurais para o pesquisador (PATTON, 2002).

Estes princípios, somados à ideia de que os temas de investigação qualitativa por ele propostos podem ser tomados conjuntamente, nos permitem inferir uma segunda característica à estrutura desta pesquisa, aquela que se refere a uma amostra direcionada. Para Patton (2002), uma amostra direcionada refere-se à seleção de casos para estudos (tais como pessoas, organizações, comunidades, culturas, eventos, incidências críticas), uma vez que apresentam informações ricas, esclarecedoras e elucidativas, isto é, os casos selecionados oferecem manifestações úteis do fenômeno de interesse. O objetivo da “amostra” é obter uma ideia, base, noção ou critério sobre o fenômeno, e não simplesmente uma generalização empírica obtida por meio de uma amostra de população.

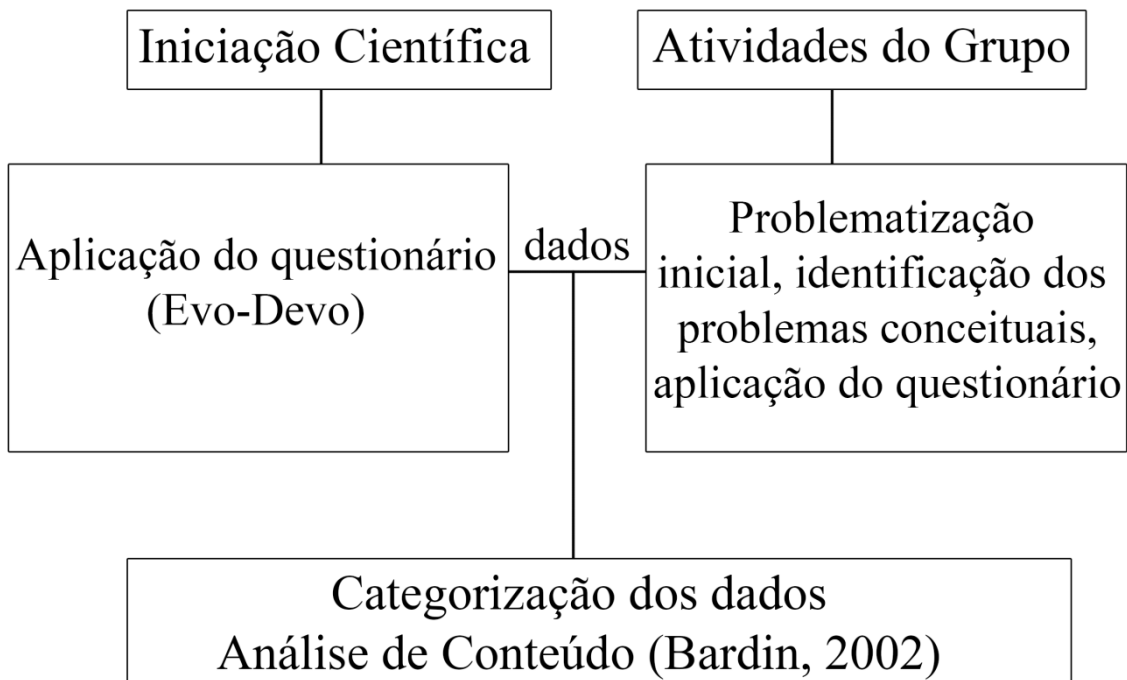
Os dados qualitativos da presente pesquisa reúnem as características descritas por Patton (2002): as observações evidenciam ou promovem os detalhes, envolvendo suas descrições; a investigação se dá em profundidade; as entrevistas captam declarações diretas a respeito de ou sobre as experiências e perspectivas pessoais; o estudo de caso; a análise crítica ou cuidadosa de documentos.

Uma vez que o pesquisador tem contato direto com o contexto e com o próprio objeto de pesquisa, deve aproximar-se o máximo possível das situações ou fenômenos que integram esse contexto (PATTON, 2002). Assim, o pesquisador deve estar estritamente atento ao processo, uma vez que quando tratar de sistemas dinâmicos estará vulnerável a mudanças, uma vez que o foco está no indivíduo e/ou no grupo como um todo (PATTON, 2002).

Já que nosso trabalho foi proposto a partir de dois contextos de pesquisa, que, no entanto, forneceram dados para o mesmo objetivo- elaboração de um texto para Formação Inicial- nossa estratégia de análise dos dados pressupõe uma análise indutiva e uma síntese criativa. Para Patton (2002), esta estratégia requer imersão nos detalhes e especificidade dos dados, uma vez que esse refinamento e aprofundamento podem fornecer e/ou indiciar temas e inter-relações importantes dentro do contexto da pesquisa.

Tanto os dados obtidos a partir do GPEB, quanto pelo questionário aplicado em duas turmas de um curso de Licenciatura em Ciências Biológicas fazem parte de um sistema complexo de análise de dados, cuja estratégia recai sobre uma estrutura geral e sistêmica da pesquisa, para então, determinar condições de análises separadas.

A Figura 2 representa a estrutura seguida para a análise dos dados desta pesquisa.



Análise de Conteúdo.

A análise de conteúdo (AC) esteve presente desde as primeiras tentativas da humanidade em interpretar os antigos escritos e os livros sagrados. Entretanto, apenas a partir da década de 1920, a AC sistematizou-se como método de investigação, devido aos estudos de Leavell sobre a propaganda empregada na primeira guerra mundial. (TRIVINOS, 1987).

Para Bardin (1994), a definição de análise de conteúdo surge no final dos anos 1940-1950, quando Berelson e Lazarsfeld afirmam tratar de uma técnica de investigação cuja finalidade centra-se na descrição objetiva, sistemática e quantitativa do conteúdo manifesto da comunicação. Em 1977, essa autora publicou uma obra notável sobre análise de conteúdo, na qual o método foi configurado em detalhes: Bardin, *L analyse de contenu*.

Posteriormente, a análise de conteúdo passa a ser definida como um conjunto de técnicas de análise de comunicações, a qual utiliza procedimentos sistemáticos e objetivos de descrição do conteúdo das mensagens, indicadores (quantitativos ou não) que permitam a inferência de conhecimentos relativos às condições de produção/recepção (variáveis inferidas) dessas mensagens (BARDIN, 1994).

Para Bardin (1994), a análise de conteúdo de mensagens- que deveria ser aplicável a todas as formas de comunicação- constitui-se por duas funções que podem ou não se dissociar quando colocadas em práticas. A primeira diz respeito à função heurística, ou seja, a análise de conteúdo enriquece a tentativa exploratória e aumenta a propensão à descoberta. A segunda se refere à administração da prova, em que hipóteses, sob a forma de questões ou de afirmações provisórias, servem de diretrizes apelando para o método de análise de uma confirmação ou de uma informação.

Para Laurence Bardin- autora na qual baseamos nossa análise- a AC, é

“um conjunto de técnicas de análise das comunicações visando obter, por procedimentos, sistemáticos e objetivos de descrição do conteúdo das mensagens, indicadores (quantitativos ou não) que permitam a inferência de conhecimentos relativos às condições de produção/recepção [...] destas mensagens” (BARDIN, 1994, p.42).

A categorização por meio de categorias temáticas tem como objetivo encontrar:

uma série de significações que o codificador detecta por meio de indicadores que lhe estão ligados; [...] codificar ou caracterizar um segmento é colocá-lo em uma das classes de equivalências definidas, a partir das significações, [...] em função do julgamento do codificador [...] o que exige qualidades psicológicas complementares como a fineza, a sensibilidade, a flexibilidade, por parte do codificador para apreender o que importa (BARDIN, 1994, p. 65).

A categorização é estruturada por meio de operações de desmembramento do texto em unidades, em categorias estabelecidas por reagrupamentos analógicos. A análise categorial pode ser temática, e assim as categorias são construídas à medida que os temas emergem no texto. Para classificação dos elementos em categorias é preciso identificar o que os mesmos tem comum, permitindo seu agrupamento. Assim, a técnica de AC, se compõe de três grandes etapas: 1) a pré-análise; 2) a exploração do material; 3) o tratamento dos resultados e interpretação (BARDIN, 1994).

Para Bardin (1994), a primeira etapa consiste em uma fase de organização que pode ser subsidiada por várias ferramentas: leitura flutuante, hipóteses, objetivos e elaboração de indicadores que fundamentem a interpretação. Na segunda etapa os dados são codificados a partir das unidades de registro e na última etapa constrói-se a categorização- a qual consiste na classificação dos elementos segundo as semelhanças identificadas entre os mesmos e por diferenciação, com posterior reagrupamento, em função de características comuns. Portanto, a codificação e a categorização são etapas constituintes da AC.

A análise de conteúdo foi utilizada para o tratamento dos dados oriundos dos três instrumentos de coleta (as transições das reuniões realizadas no GPEB, o questionário aplicado no GPEB e o questionário aplicado em duas turmas de um curso de Licenciatura em Ciências Biológicas). Para nós, a categorização pode fornecer importantes contribuições sobre os dados, uma vez que permite selecionar e enfatizar pontos cruciais das falas dos alunos, a partir dos quais podemos prospectar ações didáticas consonantes aos próprios questionamentos e dificuldades apresentados. Para tanto, nos apropriamos de um conjunto de técnicas de análise dos dados colhidos, visando à obtenção, por meio de procedimentos sistemáticos e objetivos de descrição dos conteúdos, indicadores que nos permitam elaborar inferências de conhecimentos relativos às condições de produção dessas respostas.

Contexto da Pesquisa: Justificando a análise dos dados.

A análise de conteúdo foi adequada para tratamento dos dados, uma vez que a partir das categorias identificadas e estruturadas, pretendemos projetar questões importantes sobre a perspectiva Didática acerca do conteúdo evolutivo sob o viés pluralista. As categorias podem indicar o cerne do pensamento biológico referente à evolução e, portanto, ratificar quais conteúdos biológicos nossa elaboração didática deve, fundamentalmente, contemplar.

A configuração e refinamento das questões didáticas a partir de uma análise epistemológica do conteúdo e de dados empíricos fornecidos pelos instrumentos de coleta de dados permite que enxerguemos possibilidades de sincronização e/ou articulação entre questões basais, já consolidadas sobre o pensamento evolutivo e questões que se tornaram proeminentes a partir de 1980. Daí a importância de nossa pesquisa tanto dentro do GPEB quanto a aplicação do questionário, além da estrutura de um texto que permita um trânsito entre passado e presente, costurando aproximações e preenchendo “buracos epistêmicos” encontrados no percurso da teoria evolutiva.

Quais conceitos são, comumente, mobilizados pelos alunos, para lidar com assuntos evolutivos? Como poderíamos tratar as dificuldades apresentadas pelos alunos dentro dessa perspectiva plural apresentada pelo nosso referencial teórico? Como propiciar uma articulação pertinente entre o campo Didático e o Epistemológico na Formação Inicial, considerando as concepções mais frequentemente apresentadas pelos alunos?

O GRUPO DE PESQUISA EM EPISTEMOLOGIA DA BIOLOGIA (GPEB).

Um breve histórico do grupo.

Este grupo iniciou-se em novembro de 2006 e as reuniões são realizadas na Unesp de Bauru. Os membros são: graduandos do curso de Ciências Biológicas e Mestrandos e Doutorandos do Programa de Pós-Graduação em Educação para Ciência.

O GPEB teve seu projeto e desenvolvimento financiado, a partir de dezembro de 2007, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e tem como objetivo geral investigar processos de Formação Inicial do pesquisador a partir da estruturação, andamento e análise de um grupo de pesquisa (GPEB), cuja fundamentação teórica faz-se sobre embates e diálogos epistêmicos do conhecimento biológico, a natureza sistêmica desse conhecimento e sua relação com o ensino de Biologia.

O GPEB foi espaço para objetos de estudo de quatro teses de Doutorado (BRANDO, 2010; MEGLHIORATTI, 2009 e ANDRADE, 2011. MARICATO, 2012), além de projetos de iniciação científica. Todas as teses citadas tiveram como objeto de pesquisa um conceito biológico: sucessão ecológica, organismo, gene e interação biológica.

O ponto em comum desses trabalhos é a preocupação com a dimensão epistemológica e didática dos conceitos biológicos na Formação Inicial. Os resultados procuram subsidiar estratégias didáticas a partir de uma natureza sistêmica e integrada do conhecimento biológico.

Nossa pesquisa também toma esses pressupostos como orientadores. O conceito trabalhado foi o de evolução biológica e pretendemos, a partir das considerações obtidas pela pesquisa, elaborar um texto didático para Formação Inicial.

A Pesquisa Atual.

O GPEB foi estruturado durante o segundo semestre de 2012. Os participantes das reuniões são alunos do curso de licenciatura em Ciências Biológicas de uma Universidade Estadual e doutorandos do Programa de Pós- Graduação em Educação para Ciência.

Para que pudéssemos iniciar nossas discussões, os textos selecionados foram enviados por e-mail aos participantes na semana que antecedia o encontro. Os textos foram capítulos dos livros “Evolução, o sentido da Biologia” de Meyer e El-Hani (2005) e “A Tripla Hélice” de Richard Lewontin (2002), além do artigo “Um exame histórico filosófico da biologia evolutiva do desenvolvimento” (ALMEIDA E EL HANI, 2010) e trechos específicos do livro “Biologia Evolutiva” (FUTUYMA, 1993). Já que um dos objetivos prevalentes na estruturação das reuniões do grupo foi propiciar que os participantes arguissem acerca do alcance do papel causal da seleção natural, a escolha de textos e questionamentos priorizou conteúdos cuja relação com a evolução biológica é estabelecida por mecanismos diferentes da seleção natural.

As reuniões do GPEB foram realizadas semanalmente durante aproximadamente duas horas. Essas reuniões foram gravadas em áudio e posteriormente transcritas para discussão e análise dos dados.

A partir desses dados, investigamos apontamentos/e ou inferências que pudessem nortear uma recontextualização didática do conceito de evolução biológica nos cursos de Formação Inicial. Enxergamos no grupo, a possibilidade de definir colaborações epistemológicas para o Ensino de Biologia, uma vez que a partir das transcrições,

podemos diagnosticar como os alunos em Formação Inicial entendem essas mudanças conceituais, e as dificuldades cooptadas de suas falas e explicações conceituais.

Para complementação dos dados, aplicamos um questionário, cujo objetivo foi investigar como (e se) os alunos faziam a relação dos conteúdos discutidos nas reuniões do grupo e o Ensino de Biologia- especificamente ensino de evolução. O questionário foi respondido por seis alunos participantes do grupo-uma vez que esses alunos participaram de todas as reuniões. As questões foram:

1. Qual a relação entre evolução biológica e seleção natural?
2. Quais os principais conceitos devem ser mobilizados para trabalhar/ensinar o processo de evolução biológica nos dias atuais?
3. Como você abordaria esses conceitos (pensando em um trabalho didático/pedagógico) em aulas sobre evolução biológica para o Ensino Médio?

O trabalho no GPEB gerou duas fontes de dados: as transcrições das reuniões realizadas e o questionário aplicado.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS

Questionário aplicado no GPEB.

Antes de apresentarmos a análise de dados é oportuno ressaltar que as questões foram elaboradas a partir de três eixos de análise, pano de fundo de toda estruturação da pesquisa: o epistemológico, o conceitual e o didático. Assim a primeira questão incide sobre o eixo epistemológico, a segunda no conceitual e a terceira, no didático.

O critério para escolha desses eixos fez-se na intenção de ratificar a importância de tornar proeminente a natureza epistemológica das questões conceituais e a implicação dessa relação para o Ensino de Biologia.

As categorias para primeira questão balizaram-se no nível epistemológico que o aluno mencionou ao tratar da relação dos conceitos de seleção natural e evolução. Uma vez clara a relação entre os conceitos fundamentais das discussões, o aluno pode recorrer/ enxergar possíveis estruturações didáticas exequíveis em aulas de evolução, além de podermos identificar quais premissas epistemológicas adquiridas (ou não) por cada participante do GPEB.

Categorias Epistemológicas

Seguem as categorias pré-estabelecidas para análise dos dados da primeira questão:

Categoria 1 - Causal única. Aborda a seleção natural como fator causal único a partir do qual a evolução biológica pode ocorrer.

O aluno 3 enquadra-se nessa categoria, como pode ser constatado pelo trecho abaixo:

“As duas coisas estão intimamente relacionadas, onde a seleção natural é a grande norteadora da evolução, na qual exerce uma pressão em diversos sentidos que faz com que os seres que possuam e/ou encontram mecanismos de adaptação melhores consigam sobreviver e reproduzirem-se passando adiante seu material genético.”

Embora apenas um aluno estabeleça essa relação contundente e unívoca entre seleção natural e evolução, a concepção apresentada é de cunho teleológico, uma vez que para A3, a seleção natural pressiona a evolução, propiciando um direcionamento cuja consequência é que os indivíduos, obrigatoriamente, “encontrem” mecanismos de adaptação “melhores”. Para esse aluno, a seleção natural, implicará sempre em

características adaptativas, as quais facilitariam a sobrevivência do indivíduo mediante a determinada pressão seletiva. A concepção apresentada é relevante uma vez que desconsidera o acaso e ainda os casos em que a seleção natural não implica, necessariamente, em um aumento do fitness da população. Embora o objetivo desse trabalho não seja reverenciar as críticas e embates epistemológicos sobre o conceito de adaptação, é oportuno ressaltar que essas críticas são fundamentadas em uma desarticulação entre a concepção de adaptação apresentada pela Teoria Sintética e entre os avanços teóricos e empíricos da biologia evolutiva os quais evidenciam os limites da seleção natural em moldar fenótipos sempre ótimos, ou características que aprimoram-se para culminar em traços adaptativos (SEPÚLVEDA E EL-HANI, 2008).

Em consonância a fala transcrita pelo A3, os pressupostos constituintes da própria Teoria Sintética estão alicerçados na idéia de que qualquer característica funcional com valor adaptativo é resultante da ação direta da seleção natural, bem como que esse processo leva a um estado ótimo da estrutura orgânica e de sua relação com o ambiente, ou ainda ao aumento do fitness médio da população.

A teoria de construção de nicho inviabiliza essa regularidade ou permanência da relação entre pressão seletiva e característica fenotípica, uma vez que para que a seleção natural culmine em uma otimização, o regime seletivo deve manter-se estável por um longo tempo, o que dificilmente acontece, pois o ambiente está em constante mudança, seja por processos autônomos, geológicos ou pela ação dos próprios organismos, os quais modificam o ambiente em que vivem. Além disso, como já citado, os fenômenos biológicos devem ser interpretados de forma sistêmica, e, portanto, uma característica morfológica em questão pode sofrer ação de outras forças evolutivas, ou ainda ser minimizada pela ação ambiental (SEPÚLVEDA E EL-HANI, 2008).

Deste modo, a seleção natural não pode equipar uma espécie para encarar novas contingências futuras e também não tem propósito ou direção - nem mesmo a sobrevivência da espécie. Assim como os ambientes variam, também o fazem os agentes da seleção natural, tais como recombinação e mutação. Deste modo, Gould (2001) afirma que, embora tendências possam ser percebidas na Evolução Biológica de certos grupos de organismos, não se pode esperar uma direção consistente na evolução biológica de qualquer linhagem, muito menos, uma direção a causas finais e eficientes. (GOEDERT, 2004).

Uma vulgarização de evolução, presente em muitas narrativas populares, tem a seleção como um princípio de aperfeiçoamento, tão preciso em suas operações e tão sem peias em sua ação, que os animais passam a incorporar um jogo de plantas de engenharia para otimizar sua forma. Em vez de substituir a antiga “argumentação pelo projeto” – a noção de que a existência de Deus pode ser provada através da harmonia da natureza da inteligência na construção dos órgãos –, a seleção natural deriva para o antigo papel desempenhado por Deus, o do princípio do aperfeiçoamento (GOULD, 1992, p. 159).

Essa breve discussão, aponta para a necessidade de trabalharmos, em sala de aula, as limitações epistemológicas apresentadas por conceitos abordados pela Teoria Sintética e os acréscimos da pesquisa contemporânea. Uma vez que a mesma rege as especificações curriculares do ensino de evolução, os alunos podem trazer os conceitos apresentados pela mesma como fundamentações inexoráveis da questão evolutiva, sem atentar-se aos embates epistemológicos atuais.

Além disso, a ideia de que o conhecimento é dinâmico, deve ser uma concepção constantemente trabalhada nas salas de aula, já que tal como as vicissitudes do conhecimento, a natureza da ciência é transitória, vulnerável e instável.

Categoria 2 - Causal Pluralista. Atribui um papel relevante à seleção natural como um dos fatores causais participantes do processo evolutivo, mas também cita outros mecanismos (independente de elencar explicitamente ou só mencionar a existência) que atuam e/ou participam efetivamente desse processo.

O Aluno 1 enquadra-se nessa categoria, uma vez que trata a variabilidade sob a qual a seleção atua, como resultado de uma pluralidade de processos:

“A seleção natural é um dos mecanismos que atuam sobre uma variabilidade resultante de mutações, plasticidade, processos do desenvolvimento, e de fatores ambientais.”

O aluno 2 também enquadra-se nessa categoria, uma vez que elenca outros mecanismos que influenciam o processo evolutivo.

“A seleção natural esta inserida dentro do contexto de evolução biológica na sua qualidade de adaptação, especiação e extinção, porém, para uma compreensão em sua totalidade, outros contextos também se inserem como o desenvolvimento embrionário, a plasticidade fenotípica, a herdabilidade, as mutações, o acaso”.

O aluno 4, embora não cite mecanismos oriundos de discussões atuais, menciona a importância de não abarcarmos apenas o conceito de seleção natural para explicarmos a evolução biológica.

“Para compreender o conceito de evolução biológica, faz-se necessário que entendamos uma série de conceitos associados a ele, sendo um deles o conceito de seleção natural... Precisamos pensar em outros fatores como acaso, deriva genética, entre outros. Assim, a seleção natural não explica todos os eventos evolutivos, como também não deve ser pensada apenas como a sobrevivência do mais apto”.

O aluno 5 também enquadra-se nessa categoria, e menciona os diversos níveis de interações que ocorrem em um organismo- demonstrando que esse aluno foi capaz de entender que as interações não ocorrem apenas entre organismo- ambiente ecológico, ou organismo- ambiente celular.

“...devido a interações que ocorrem dentro dos organismos, dos organismos entre si e dos organismos com relação ao meio em que vivem, a seleção natural seria o conjunto das mudanças...” Discussões recentes tem levantado dúvidas se a seleção natural explicaria a evolução por completo. Dentre essas discussões está a que coloca o desenvolvimento como influenciador do rumo da evolução”.

O aluno 6, embora não mencione outros mecanismos, enquadra-se nessa categoria, pois não atribui papel causal exclusivo à seleção:

“A seleção natural é um dos processos responsáveis pela evolução biológica”.

Categorias Conceituais

Para segunda questão as categorias foram:

Categoria 1- Cita apenas a seleção natural como conceito suficiente para explicar/ entender o processo de evolução biológica.

Nenhum aluno enquadra-se nessa categoria.

Categoria 2- Cita diversos conceitos que perpassam os mais diferentes níveis abarcados pelo conhecimento biológico (molecular, organísmico, ontológico e ecológico).

Os alunos 1 e 2 enquadram-se claramente nessa categoria, uma vez que citam não só conceitos abarcados pela “Teoria Sintética”, como conceitos discutidos atualmente.

A1: "Especiação; Mutação; Recombinação; Expressão Gênica; Variabilidade; Seleção Natural; Plasticidade; Epigenética; Desenvolvimento/Evo-Devo; Adaptação; Exaptação; Coevolução".

A2: "Seleção Natural, Deriva Genética, Migração, Variabilidade, Plasticidade Fenotípica, Desenvolvimento Embrionário, Extinção, Epigenética, Mutações e fatores ecológicos que normalmente não são trabalhados dentro do contexto de seleção natural, por exemplo, o estudo do nicho ecológico de cada espécie e as causas das competições intra e inter-específicas que podem interferir na construção do nicho".

O aluno 3, embora ressalte a seleção natural como o mecanismo mais importante, cita que outros conceitos também devem ser inseridos nas discussões.

"Sem dúvida a seleção natural é a peça chave no ensino de evolução. Contudo conforme forem avançando os estudos novos conceitos devem ser ensinados, como os mecanismos de adaptação dos diversos organismos, reprodução, mutações e, até mesmo, conceitos mais complexos como construção do nicho, epigenética e evo-devo".

O aluno 4, também enquadra-se nessa categoria:

"Além da seleção natural, deveríamos ensinar deriva genética, mutações, relações entre o desenvolvimento dos organismos e evolução, influências ambientais, especiação, além do papel do acaso".

O aluno 5, menciona a importância da abordagem das interações a que os organismos estão submetidos, além de elencar o desenvolvimento como conceito fundamental para se referir à evolução biológica:

"Eu acredito que conceitos como interações, meios (com relação ao indivíduo), mudanças, mutação, genética (variabilidade, herdabilidade), aptidão e desenvolvimento são imprescindíveis para se trabalhar/ensinar o processo de evolução biológica."

O aluno 6, também esquadra-se nessa categoria:

"Seleção natural, mutação, migração e deriva, desenvolvimento (evo-devo), plasticidade..."

Categoria 3- Cita, além da seleção natural, outros conceitos já descritos e explorados pela teoria sintética (mutação, deriva genética, isolamento geográfico) para complementar a explicação no que se concerne aos mecanismos de separação de

populações e interrupção do fluxo genético (mecanismos esses que viabilizariam a origem de novas espécies).

Todos os alunos respondentes enquadraram-se na categoria 2.

Categorias Didáticas

Categoria 1- Trabalha em nível epistemológico-sistêmico-interacional do conhecimento biológico. Apresenta os conceitos citados para trabalhar evolução em um contexto de integração que perpassa todos os níveis biológicos. Expõe a perspectiva de trabalhar o conhecimento biológico como uma rede de processos interdependentes e integrados. Nesse contexto, menciona a importância da abordagem em sala de aula de conceitos recentes que estão sendo incorporados à abordagem da evolução biológica- construção de nicho, epigenética, evo-devo, plasticidade fenotípica.

A aluna 2, enquadra-se nessa categoria, uma vez que evidencia quais conceitos precisariam ser abordados e de que forma a relação entre os mesmos poderia ser apresentada.

A2: "... é possível trabalhar os conceitos de maneira integrante, sem dispensar ou elevar um conceito como "mais importante" do que o outro. Deve haver uma rede de interações contextuais a fim de que o aluno consiga compreender que evolução não se limita a adaptações ao meio e sim que existem mecanismos que interagem com as adaptações favorecendo ou neutralizando a variabilidade entre as espécies".

A aluna 4 exemplifica essa categoria, uma vez que trabalha a abordagem dos conceitos de forma integrada, cita a importância de outros mecanismos (acaso, desenvolvimento e ambiente) e relaciona o trabalho didático com as possíveis dificuldades conceituais dos alunos.

“Primeiramente, explicaria que os seres vivos não são modificados devido a suas vontades. Isso seria ressaltado, pois muitos dos alunos do Ensino Médio acreditam que assim que o ambiente ficasse hostil para abrigar determinada espécie, ela simplesmente poderia se modificar a fim de resistir a mudança do ambiente. Depois falaria sobre o papel do acaso em relação ao processo evolutivo, exemplificando com o caso do surgimento dos seres pluricelulares (seres pluricelulares+caderina+cálcio), que a meu ver, exemplifica muito bem esse papel do acaso. Aproveitando-se ainda desse exemplo, explicaria as influências do ambiente no processo (fatores epigenéticos), além de tratar de alguns conceitos importantes no contexto, como as mudanças que podem ocorrer devido a mutação bem como do papel do desenvolvimento dos organismos, muitas vezes restringindo as possibilidades de atuação da seleção natural. Resumindo, explicaria evolução à partir da perspectiva ECO-EVO-DEVO, que ao meu ver, abarcaria e conseguiria explicar muitos casos estudados pela evolução”.

A aluna 5, embora faça o uso de palavras que requerem uma explicação mais detalhada sobre sua relação com a seleção, reitera a necessidade de trabalhar a evolução biológica partindo das interações em diferentes níveis biológicos, atribuindo dessa forma, uma abordagem integrada do processo de evolução.

Penso que é interessante em um primeiro momento contextualizar as relações/interações que ocorrem nos organismos e dos organismos entre si e com o meio. Posteriormente trabalhar conceitos dentro da genética, depois disso relacionar esses conceitos com desenvolvimento e aptidão e por último tentar ajudar na formação de um pensamento integrado da evolução como sendo o conjunto das mudanças que ocorrem e estão condicionadas a esses fatores.

Categoria 2- Trabalha em nível reducionista- empírico do conhecimento biológico. Aborda a evolução biológica sob as premissas fundamentadas pela teoria sintética, não integrando a mesma às novas discussões sobre a pluralidade de interpretação do processo de evolução. Reitera a ação da seleção natural como mecanismo necessário e suficiente para explicação do processo de evolução biológica.

Categoria 3- Trabalha em nível teórico, não concatena os conceitos ao trabalho didático. Não deixa claro de que forma apresentaria os conceitos ou qual a relação entre os mesmos.

A1: "... apresentando primeiramente a evolução biológica tradicional, se possível evidenciando os processos históricos para a construção da mesma até a elaboração da chamada Síntese Moderna, e então problematizando-a e expondo seus limites para explicar e entender alguns pontos da evolução biológica, e à partir disso ir apresentando e introduzindo os outros conceitos abordados nas discussões atuais sobre evolução".

A3: "...trabalharia estes conceitos em aulas de todos os assuntos referentes à biologia, pois desta forma o aluno pode perceber como a evolução permeia a biologia e não somente numa aula com este tema".

A6: "Acredito que esses conceitos devem ser trabalhados em conjunto, salientando a participação de todos na evolução biológica".

A questão 1 estabelece a relação conceitual construída pelo alunos entre a seleção natural e a evolução e demonstra que as discussões realizadas no GPEB foram importantes para que o aluno passasse a enxergar essa relação sob uma perspectiva mais pluralista, atribuindo importância à participação de outros mecanismos para ocorrência da evolução. Para autores como Gould, (2002); Lima-Tavares, (2002) e Meyer & El-Hani, (2005), uma das críticas realizadas pelos biólogos evolutivos à Teoria Sintética da evolução incide sobre a relação entre o processo de evolução biológica e a seleção natural: usualmente não rejeitam a noção de seleção natural, mas questionam alguns aspectos que, em sua visão, requerem reformulação, tais como: a compreensão da seleção natural como o único processo responsável pelos padrões de mudança evolutiva, de modo que todo o poder explicativo na biologia evolutiva deve ser atribuído a ela.

Os dados referentes aos 6 alunos analisados para este trabalho, contemplam vários conteúdos relevantes para abordagem do tema em sala de aula: é importante perceber que esses respondentes mencionam a seleção natural, mas também a participação do ambiente, do desenvolvimento, das mutações, da plasticidade, da construção de nicho, da deriva, o que nos leva a pensar que participantes do GPEB conseguiram, a partir das reuniões do grupo, construir uma ideia do conceito que não tratava os pressupostos abarcados pela teoria sintética como obsoletos e desnecessários, mas insuficientes para, sozinhos, explicarem a evolução biológica. Assim, os alunos foram capazes de associar conceitos de discussões recentes com aqueles já estabelecidos por consensos científicos anteriores, aproximando-se de uma concepção de natureza da ciência tal como a mesma faz-se ao longo de séculos de pesquisas e debates acadêmico- científicos. Essa articulação e/ou integração é de suma importância, uma vez que outros conceitos devem ser acrescidos à Teoria Sintética, sem desprestigiar o status da mesma enquanto paradigma regente da biologia evolutiva.

A partir da questão conceitual, podemos observar que os cinco alunos não citam apenas conceitos já abordados pela Síntese (seleção natural, migração, deriva genética, mutação); mas recorem a conceitos que, atualmente, são tratados e mobilizados para atribuir um caráter mais pluralista ao processo evolutivo (desenvolvimento, teoria de construção de nicho, plasticidade fenotípica). Tais conceitos foram sendo discutidos no GPEB à medida que situações evolutivas eram expostas e os alunos não conseguiam explicá-las com base no mecanismo de seleção natural. É importante que os próprios participantes percebam a falta de fundamentação conceitual ao tentar explicar, por exemplo, por que a seleção natural não atua em um “rol” máximo de possibilidades fenotípicas, caso não recorressem às restrições do desenvolvimento ou como uma variedade morfológica surge repentinamente, sem, portanto, poder ser explicada pelo acúmulo de processos microevolutivos ao longo das gerações.

A questão de cunho didático demonstrou que, embora alguns alunos não descrevam empiricamente como abordaria o conceito, os cinco alunos procuraram incluir os diferentes níveis biológicos na perspectiva evolutiva. Um dos alunos (4), chegou a mencionar a abordagem eco-evo-devo, exemplificando a natureza sistêmica da biologia e a importância dessa concepção no ensino.

Dados referentes a um projeto de Iniciação Científica.

No mesmo período em que as reuniões do GPEB foram realizadas, atuei como professora bolsista da disciplina de Estágio Curricular III e IV no curso de graduação em Ciências Biológicas. A partir dessa experiência, pude orientar um projeto de iniciação científica financiado pelo CNPq (processo 120041/2013-8), vinculado ao tema e objetivos tratados pelo GPEB.

O objetivo desse projeto foi investigar como licenciandos em Ciências Biológicas, que já haviam cursado a disciplina de Evolução, explicariam questões relacionadas à seleção natural e expressão gênica (uma vez que o pano de fundo do questionário foi a Evo-Devo). Nosso intuito era obter dados que permitissem inferências sobre a estrutura do pensamento biológico referente à evolução biológica.

Questionário- Fundamentação.

Ao longo da tese, defendemos a natureza sistêmica do conhecimento biológico e a partir de uma organização epistêmica, delineamos os caminhos teóricos e empíricos da evolução biológica desde Darwin. Atualmente, essa área ocupa o centro de alegações e

debates, que podem acrescentar concepções teóricas à Teoria Sintética. Nossa principal preocupação relaciona-se a forma que esses acréscimos serão abordados na Formação Inicial e como elaborar subsídios didáticos que, efetivamente, contribuam para que essa nova formatação epistemológica da Biologia Evolutiva alcance as sala de aula.

Os pontos em debate atingem, principalmente, questões relativas às macromutações, ao surgimento de novos planos corporais, inovações morfológicas, a inexistência de algumas formas orgânicas, o papel da seleção natural, as adaptações, que passaram a ser melhor entendidas a partir do estudo dos processos ontogenéticos e da capacidade sincrônica e contextual da ação e expressão gênica. Essas descobertas indicam que a evolução opera a partir de um processo de bricolagem, reaproveitando estruturas pré-existentes para modulações morfológicas bastante distintas.

É preciso considerar que a Teoria Sintética é um paradigma referenciado pelos livros didáticos para abordagem da evolução biológica em todos os níveis de ensino, inclusive no Superior. No entanto, entendemos como necessidade premente a inclusão da Evo-Devo nas discussões sobre evolução nos cursos de Ciências Biológicas e, para tanto, o questionário foi elaborado com o intuito de investigarmos se os alunos do último ano do curso já mobilizam argumentos relacionados à Evo-devo para explicar algumas situações evolutivas propostas.

O questionário é constituído por cinco perguntas de cunho dissertativo e apenas uma questão de múltipla escolha. As três primeiras perguntas abordam a seleção natural, as relações dessa com a evolução, com os processos de criação na evolução e da relação com a macroevolução. As três outras perguntas fazem referência mais especificamente a Evo-devo, porém o conteúdo do enunciado não menciona explicitamente esse campo de pesquisa. Duas dessas questões aludem a processos de restrição e reaproveitamento, e a última questão além de abordar esses dois temas, inclui a seleção natural, e requer, portanto, uma visão integrada desses processos.

Resultados

O questionário foi aplicado em duas turmas de uma Universidade Estadual. As turmas são do último ano de um curso de Licenciatura em Ciências Biológicas (Integral e Noturno). As duas turmas de alunos respondentes já cursaram a disciplina de Evolução. Os respondentes foram: 25 alunos da primeira turma e 19 alunos da segunda turma, o que totalizou 44 questionários respondidos. Alunos da primeira turma serão referidos nos resultados como AI, e da segunda turma como AN.

Segue abaixo, a análise das respostas obtidas nas duas turmas.

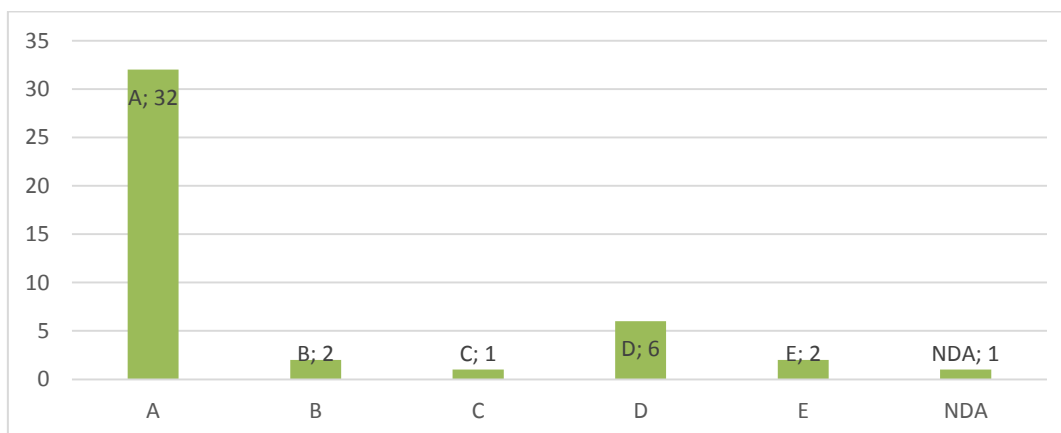
Questão 1

Qual alternativa abaixo explica a relação entre os conceitos de evolução biológica e seleção natural?

- (a) A seleção natural é um dos agentes de modificação no padrão de variação e, portanto, pode ter efeito evolutivo.**
- (b) A seleção natural não pode ocorrer sem evolução, e, a evolução não pode ocorrer sem seleção natural.**
- (c) Seleção natural e evolução são processos biológicos independentes, não havendo, em qualquer hipótese, relação causal entre os mesmos.**
- (d) A seleção natural pode explicar sozinha, tanto a micro quanto a macroevolução.**
- (e) Seleção natural e evolução biológica são conceitos biológicos que podem ser tratados como sinônimos.**

Nessa primeira questão objetivávamos identificar como os alunos entendem a relação entre seleção natural e evolução: se consideram esses processos como sinônimos; ou se consideram a seleção como único agente causador da evolução, ou como um agente biológico independente da evolução, ou como um dos processos por meio do qual a evolução pode ocorrer. E ainda, acrescentamos uma alternativa que afirma que a seleção natural propicia tanto a macro quanto a micro evolução, uma vez que a atribuição à seleção natural, também das inovações repentinas, concebendo a macroevolução como resultado de processos microevolutivos acumulados é uma das objeções mais veementes dirigidas ao corpo teórico apresentado pela Síntese Moderna. A alternativa (a)- cuja assertiva foi coerentemente formulada-, remete à seleção como um dos processos pelo qual a evolução ocorre, sem concebê-la como central única ou mais importante. Na alternativa (b) a seleção é colocada como inerente à evolução, ou seja, a evolução só pode ocorrer como um resultado do processo seletivo. Na alternativa (c) a seleção natural e a evolução são tratados como processos biológicos independentes. Embora saibamos que nem todo processo de seleção resulta em evolução e que nem toda evolução ocorre por meio de seleção natural, em muitos casos, esses conceitos são concomitantes. Em (d), consideramos uma afirmação fundamentada de acordo com a Teoria Sintética, de forma a identificar se os alunos concordam que a seleção natural é um agente causal responsável tanto pela micro quanto pela macroevolução. Na última alternativa (e), a seleção natural é colocada como a evolução

em si, ou seja, mencionar evolução é o mesmo que mencionar seleção natural, e vice-versa. As frequências de resposta para cada alternativa estão no gráfico 1.



A elaboração dessa questão envolveu também, a concepção de que a seleção natural e a evolução não são processos obrigatoriamente consequentes. Ou seja, nem sempre a evolução ocorrerá por seleção natural ou uma seleção natural culminará em uma característica evolutiva.

Seleção natural não é o mesmo que evolução. Evolução é um processo em duas etapas: a origem da variação genética por mutação ou recombinação, seguida por uma modificação no padrão da variação, com uma substituição de alguns genótipos por outros. A seleção natural é um agente de modificação no padrão de variação; a deriva genética é outro. Ambos podem ser responsáveis pela propagação de características nas populações, mas nem a seleção natural nem a deriva genética explicam a origem da variação (FUTUYMA, 2002, p.365).

Seleção natural é diferente de evolução por seleção natural. Da mesma forma que a evolução pode ocorrer sem seleção natural (por deriva genética, por exemplo), a seleção natural pode ocorrer sem evolução. Apesar de ser possível afirmar que existe seleção natural sempre que diferentes fenótipos exibirem variação no sucesso reprodutivo médio, a seleção natural não terá efeito evolutivo a não ser que os fenótipos tenham diferentes genótipos. Por exemplo, a seleção entre membros geneticamente idênticos de um clone, mesmo que eles sejam diferentes quanto ao fenótipo, não tem implicações evolutivas (FUTUYMA, 2002, p.365).

Seleção natural é a variação no sucesso de reprodutivo médio (incluindo sobrevivência) entre os fenótipos. Sem essa variação não pode haver evolução por seleção natural. Portanto, uma característica que meramente aumenta o “conforto” do

indivíduo não pode evoluir por seleção natural. A cauda com longos pelos de um cavalo, usada como um “mata-mosca”, não poderia ter evoluído por seleção para essa função a não ser que ela aumentasse o sucesso reprodutivo, talvez diminuindo a mortalidade causada por doenças transmissíveis por moscas.

A partir da organização dos dados, podemos descrever que a maioria dos alunos, 32 de 44, optou pela alternativa (a) que considera a seleção como um dos agentes modificadores no processo evolutivo, o que representa mais de 70% dos alunos. A segunda alternativa mais assinalada, cujo percentual é de aproximadamente 14%, foi a alternativa (d), que afirma que a seleção pode ser responsável pela micro e macroevolução. Apenas dois alunos escolheram a alternativa (b) sobre a evolução não ser possível sem a seleção, e outros dois assinalaram a alternativa (e) que considera a evolução e a seleção natural como sinônimos. Um aluno escolheu (c) que afirma não haver relação causal entre seleção e evolução. Um aluno não respondeu.

Questão 2

A jararaca-ilhoa é uma serpente peçonhenta encontrada em altíssima densidade numa ilha brasileira. Devido à ausência de mamíferos terrestres nessa ilha, essa serpente passou a subir em árvores para comer aves migratórias. Portanto, seu veneno age rapidamente, uma vez que a ave deve morrer dentro do alcance da serpente (FRANCO, 2006). Supondo que os ancestrais dessa espécie de serpente tinham um veneno cuja ação era lenta, como explicaríamos o perfil populacional de jararacas nessa ilha? Ou seja, por que a população cujo veneno agia rapidamente se tornou grande e preponderante nesse local?

Nesta questão comparamos duas possibilidades fenotípicas de uma mesma característica: a velocidade de ação do veneno. Comparamos ainda as frequências de tais variações em uma ilha. Nós afirmamos que um suposto ancestral teria uma dessas variações (veneno de ação lenta) e a população atual dessa ilha teria o outro tipo de variação (veneno de ação rápida). A resposta para essa questão seria uma narrativa embasada na seleção natural, de forma que se explicasse como o veneno de ação rápida pode favorecer a população de jararaca atual daquela ilha. A finalidade é identificar de que forma os alunos explicam um fenômeno evolutivo, ou seja, quais são os conceitos e termos mobilizados para elaborar essa resposta.

Alguns alunos mencionaram o conceito da seleção natural de forma direta, como se pode ver em AI24 “Pois a seleção natural atuou favorecendo as serpentes com veneno mais rápido [...]”.

Outros alunos não citavam a seleção e incluíam outros termos para responder, como em AI9 “Pois as serpentes cujo o veneno agia mais rápido, tiveram uma vantagem sobre as de veneno lento, permitindo que as serpentes de veneno rápido melhor se adaptassem e sobrevivessem naquele ambiente”.

Assim, ainda que sem mobilizar o conceito da seleção natural explicitamente, alguns alunos explicaram o processo por meio de uma narrativa de luta pela sobrevivência, e, portanto, as respostas tiveram como pano de fundo a seleção natural.

Muitos alunos afirmaram que o grupo com veneno de ação rápida deixaria mais descendentes, outros afirmavam que teriam maior sucesso reprodutivo, como em AI1 “Por ação da seleção natural os indivíduos da população que tinham a característica adaptativa era mais bem-sucedidos, deixava mais descendentes [...]”;

AI11 “As que tinham veneno de ação mais rápida, se alimentavam mais e possivelmente era menos predada e assim se reproduziram e deixaram mais descendentes com essa característica que foi selecionada [...]”.

Alguns alunos acrescentaram a questão da energia perdida na captura de alimento da serpente com a condição ancestral, como pode ser constatado em AI8 “A população cujo veneno tinha ação lenta não chegava a conseguir alimento facilmente, o que significa que perdiam energia e não ganhavam [...]”;

AI15 “As jararacas cujo veneno agia de forma lenta não conseguiram se manter no ambiente, já que ao picar a presa esta tinha chance de escapar fazendo assim a jararaca gastar energia e não recebendo-a de volta, sendo assim eliminadas aos poucos [...]”.

Muitos alunos empregaram termos inespecíficos, que não representam processos biológicos para descrever processos evolutivos que envolvem a seleção natural. Na maioria das respostas, os termos tem um caráter positivo tal como “sucesso”, “vantagem”, “favorece”, “eficiência”, como pode ser visto em AN2 “[...] A população com veneno mais forte tem **vantagem** sobre a população de veneno mais lento” (grifo nosso);

AN3 “[...] A ação lenta também poderia permitir que a ave, mesmo envenenada, conseguisse fugir, tornando a captura um fracasso para a serpente, *favorecendo* assim as serpentes com o efeito rápido do seu veneno” (grifo meu);

AN4 “[...] Esta, por sua vez, alcançando *sucesso* conseguiu se estabelecer no ambiente e gerar descendentes com essas características” (grifo meu).

Termos como esses são mais frequentes em respostas que não citam a seleção natural diretamente, assim os alunos fazem uso de termos alternativos.

Em muitas respostas, pode-se perceber o cunho teleológico pelo qual alguns alunos entendem processos evolutivos. Os “fins” são indicados como o motivo para os fenômenos, assim uma entidade é construída para que atenda a uma finalidade. Esta colocação é inadequada para a evolução, pois o processo de seleção natural não é um processo teleológico, mas que decorre do encontro entre mudanças entre os seres vivos e modificações ambientais.

AI6 “Devido a ausência de animais terrestres, essas serpentes precisavam se adaptar para sobreviver por isso, começaram a subir em árvores para caçar pássaros, mas por seu veneno ser de ação lenta, elas tiveram que adaptar seu veneno para ter uma ação rápida”

AI13 “Isso decorreu devido ao processo evolutivo, onde a jararaca desenvolveu mecanismo de captura da presa”

Na tabela abaixo, identificamos categorias nas quais as respostas puderam ser agrupadas.

Respostas	Número
1. Seleção natural citada de forma explícita	16
1.1. Aborda a questão da economia de energia	2
1.2. Presença de narrativas teleológicas	2
2. Seleção natural citada de forma implícita	15
2.1. Aborda a questão da economia de energia	3
2.2. Presença de narrativas teleológicas	1
3. Citação de mecanismos de caracteres adquiridos	3
4. Não respondeu	2

Tabela 1.

A primeira categoria “Seleção natural citada de forma explícita” refere-se às respostas cuja explicação incluía ao menos o termo “seleção” ou ambos os termos “seleção natural”. A segunda categoria “Seleção natural de forma implícita” trata de respostas cujo pano de fundo é a seleção natural, embora os termos usados tenham sido diferentes, como “vantagem”, “competição” e outros. Cada uma das duas categorias tem duas subcategorias: “Inclui a questão da economia da natureza”, que refere-se a

respostas que possuíam na narrativa uma explicação sobre a economia de energia da serpente de veneno de ação rápida (por investir na elaboração do veneno, mas alcançar alimento, diferente do veneno de ação lenta), e “Mobilizou conceitos de forma teleológica”, a qual abrange as repostas que atribuíam ao processo de seleção natural uma finalidade pré-estabelecida.

A terceira categoria faz referência a respostas cujo contexto se enquadra em um caráter teleológico (a serpente desenvolveu um veneno de ação mais rápida para que pudesse sobreviver), sem alusão à seleção natural. Pode-se inferir que em tais respostas, os mecanismos evolutivos mobilizados seriam caracteres adquiridos, e uso e desuso.

Podemos afirmar que os alunos empregam termos genéricos, principalmente quando não citam a seleção de forma direta. Os processos são narrados na maioria dos casos, como uma situação de luta por alimento, o que representaria a ação da seleção natural; assim, de forma geral, a competição resulta na sobrevivência de um grupo e na extinção do outro, propiciando a reprodução do grupo de veneno com ação rápida, e impedindo a reprodução sucessiva do grupo de ação lenta.

Em um segundo momento, os dados serão analisados com maior profundidade, para que possamos obter categorias mais específicas, cujo conteúdo esteja relacionado com conceitos biológicos mais restritos.

Questão 3

“A seleção natural funciona como mera peneira que deixa passar ou não, sem ter o papel criador que lhe atribui à teoria sintética” (FREIRE-MAIA, 1988, p.55). Concorde ou discorde dessa frase e justifique.

Como já foi colocado, de acordo com a Teoria Sintética, a seleção natural explica tanto a micro quanto a macroevolução, podendo a partir dessa última, ser responsável pela origem de novos planos corporais. Nesta terceira questão buscamos investigar como os alunos explicam a ação seletiva: se por meio desse processo os indivíduos são apenas selecionados, ou se podem ser originadas novidades morfológicas por meio da seleção natural. Além disso, esperamos que quando a resposta estiver em concordância com a afirmação do enunciado, haja novos mecanismos evolutivos apontados como responsáveis pelo papel criador na evolução, como mutações e inovações proporcionadas por alterações durante a embriogênese. Essa questão pode nos dar indícios até mesmo sobre como os pressupostos da Teoria Sintética estão (ou não) arraigados nos alunos: uma vez que esse papel criador foi delegado à seleção pelo

próprio paradigma, uma concordância geral dos alunos com a afirmação pode indicar que o ensino de evolução ainda está restrito à Teoria Sintética.

Dos 44 alunos que participaram da pesquisa, 29 concordaram com a afirmação de que a seleção natural não tem papel criador, os quais representam 66% do total de alunos. Apenas três alunos afirmaram que discordam, e que a seleção tem poder criativo.

Respostas	Número
1. Concorda, a seleção natural não cria	29
2. Discorda, a seleção natural cria	3
3. Resposta incoerente	9
4. Não respondeu	3

Tabela 2.

Por se tratar de respostas que concordam ou discordam da afirmação feita no enunciado, temos apenas duas categorias para tal questão, uma vez que as respostas dos alunos não traziam muitas informações na justificativa, o que impossibilitou novas categorias.

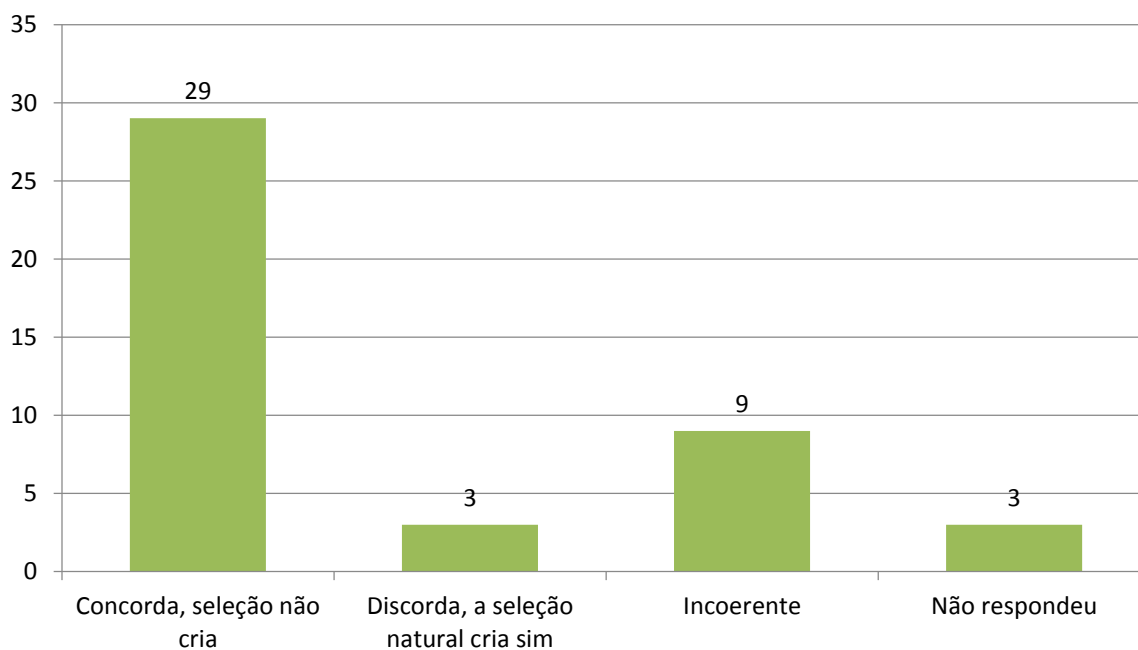


Gráfico 2.

Um dos alunos que afirma concordar com a ideia de que a seleção natural não cria, acrescentou que outro processo é responsável pela criação na evolução dos seres vivos, como pode ser verificado em AI1: “Concordo. A seleção natural não cria características adaptativas, ela apenas seleciona as “mais vantajosas”. Quem cria, por exemplo, são as mutações”.

Segundo a Teoria Sintética, mutações são provenientes de modificações acidentais sem serem causadas pelo desenvolvimento do indivíduo (JABLONKA & LAMB, 2010). Dessa forma, podemos afirmar que embora esse aluno tenha acrescentado um mecanismo diferente da seleção natural, ele mobilizou conceitos já abordados pela Teoria Sintética e, portanto, não citou processos de criação envolvidos com a ontogenia.

Diferentes deste último aluno, outros respondentes discordam, e afirmam que tudo é explicado pela seleção natural, como em AN6: “Discordo, porque na teoria sintética tudo era explicado pela seleção natural”;

AN18: “A seleção natural não é uma mera peneira, é um conjunto de fatores influenciáveis que atuam nos seres, segundo determinada situação, portanto eu discordo”;

AI25: “Discordo, a seleção natural é o principal mecanismo evolutivo que leva em conta a adaptação da espécie em ambiente inóspito além de agregar a população “bons genes””.

O aluno AI25 introduz a adaptação a contextos equivocados. Esse termo é tido como um resultado inerente ao processo seletivo: Toda seleção natural objetiva e culmina em uma adaptação (e, portanto tem caráter teleológico). Essa é a concepção que a própria Teoria Sintética atribui ao conceito de adaptação.

São palavras e expressões semelhantes às que foram utilizados na resposta anterior, ou seja, termos genéricos, e na maioria expressam um caráter positivo, como “vantajosas”, “sucesso” e “favorecida”.

Embora a maioria tenha afirmado que a seleção natural não tem papel criador, poucos justificaram a resposta. O único processo evolutivo diferente da seleção natural citado nas respostas foi a mutação. Conceitos da evo-devo não foram mencionados por nenhum dos alunos, ou seja, processos de desenvolvimento não foram apontados como possíveis responsáveis pela criação de novas estruturas. Pode-se inferir que os alunos não tem conhecimento sobre o papel evolutivo da evo-devo no contexto de inovações morfológicas.

Questão 4

Uma mesma sequência gênica pode resultar em fenótipos bastante diferentes. Dessa forma, o processo evolutivo é análogo à bricolagem, ou seja: novas estruturas são construídas a partir de materiais preexistentes (que podem realizar funções totalmente diferentes), como um reaproveitamento dos mesmos. Qual a implicação desse "reaproveitamento" no processo evolutivo?

O reaproveitamento nesta questão refere-se a ação gênica. A partir de um sincronismo de espaço e tempo, as sequências nucleotídicas podem resultar em fenótipos distintos. Esse “reaproveitamento” de sequências gênicas é uma das formas pela qual o desenvolvimento de um organismo pode explicar a origem repentina de algumas estruturas.

Diferentes animais usam os mesmos genes em tempos e lugares diferentes no desenvolvimento, resultando em formas corporais também distintas. Isso é possível porque cada um dos genes envolvidos no processo de desenvolvimento pode ter vários interruptores diferentes. Isso permite que um mesmo gene seja usado em tempos e lugares distintos, porque conjuntos diferentes de proteínas capazes de acionar ou desligar os genes do desenvolvimento estão presentes em diferentes momentos e em diferentes tecidos em formação. (EL-HANI; MEYER, 2007, p. 03).

Este fenômeno pode ser constatado no caso da evolução do homem, que se comparado ao chimpanzé, mostram uma diferença de apenas 1,5% dos sítios dos nucleotídeos, ou seja, os genomas são quase idênticos. No entanto, as diferenças fenotípicas não são discretas, e segundo os dados, parecem ser produzidas por uma pequena diferença genética. Estudos apontam para os genes reguladores para explicar tal diferença fenotípica, pois uma pequena modificação na regulação gênica pode causar grandes mudanças fenotípicas (RIDLEY, 2006).

Assim, buscamos investigar se os alunos apontam a influência dessa “bricolagem” genética, proporcionada pela sincronização espaço temporal da ação gênica.

Muitas respostas estavam erradas ou fora de contexto, um possível indicativo de que essa pergunta estava em um nível de dificuldade maior do que as perguntas anteriores. Da turma de 19 alunos, poucas respostas mostraram-se coerentes, um exemplo seria AN9: “Esse “reaproveitamento” favorece o surgimento de novas características que podem ser favorecidas no processo evolutivo”.

Um aluno tenta exemplificar o processo de reaproveitamento de estruturas pré-existentes, e cita a serpente e o veneno para explicar (exemplo retirado da questão 2): AN2 “[...] para que fosse desenvolvida uma glândula de veneno, uma estrutura pré-existente teve de modificar-se”.

Um entendimento equivocado do processo de reaproveitamento pode ser visto em AN4 “O reaproveitamento é a utilização de características ancestrais pelos descendentes que ainda garantem o sucesso da espécie ou são indispensáveis à sobrevivência sem sofrer modificações”.

Este aluno indicou o reaproveitamento como a retenção de características ancestrais que sejam vitais, e não como a reutilização de uma característica ancestral para uma nova finalidade.

Alguns alunos consideraram o reaproveitamento como uma forma de “gerar adaptações”, como em AN8 “Esse reaproveitamento permite determinado animal sobreviver melhor em um determinado habitat. Aqueles que não possuem esse “reaproveitamento” não serão bem adaptados, correndo riscos”.

A economia de energia foi um tema abordado por vários alunos que apontam o reaproveitamento como uma forma de “evoluir com pouco gasto energético”, como pode ser visto em AN18 “[...] há uma diminuição energética quando aproveitamos algum material previamente elaborado. Em suma, funções novas, gastando menos energia”.

A economia de energia foi apontada por vários alunos, que afirmam ser um “caminho mais curto” o reaproveitamento do que a criação de estruturas novas, como em AI3 “Criar algo novo é muito complexo, portanto é favorável que se tenha um reaproveitamento”, e em AI7 “[...] Reaproveitar aquilo que já existe é muito menos dispendioso [...]”.

Um aluno respondeu que o processo citado no enunciado tem efeitos sobre os fenótipos dos seres vivos, em AI2 “Este reaproveitamento implica em uma maior variabilidade fenotípica entre os indivíduos”.

De forma coerente à literatura, o aluno citado AI2 citou o aumento da variabilidade fenotípica, assim como em AI25: “Maior variabilidade fenotípica. Mesmo par de genes podem expressar diversas características”.

Diferente destes alunos, alguns responderam que o reaproveitamento resultaria no aumento da variabilidade genética e não fenotípica, como pode ser constatado em AI18 “Implica numa variação genética grande [...]”.

A maioria dos alunos respondeu que o processo de reaproveitamento aumenta a variabilidade, embora poucos tenham especificado corretamente que o aumento seria da variabilidade fenotípica. A segunda resposta mais frequente foi a de que o reaproveitamento aumenta adaptações, em decorrência do aumento da variedade.

O conceito de adaptação é complexo e a literatura apresenta soluções semânticas para o termo. Em consonância a questão, o termo exaptação fora incluído para fazer referência a estruturas que, em um primeiro momento evolutivo, foram resultado de um processo seletivo e exerceram determinada função; e após um tempo, as mesmas estruturas foram cooptadas para outra função. Como exemplo das penas das aves, que propiciavam isolamento térmico para os animais, e posteriormente possibilitaram o voo.

Respostas	Número
1.1.Reaproveitamento possibilita inovação morfológica ou fenotípica (resposta sem caráter teleológico)	8
1.2.Reaproveitamento possibilita inovação morfológica ou fenotípica (resposta com caráter teleológico)	7
2. Reaproveitamento possibilita economia de energia	7
3. Reaproveitamento aumenta variabilidade genética	3
4. Resposta incoerente	15
5. Não respondeu	4

Tabela 3.

Do total de alunos, 12% não responderam a essa questão.

Questão 5

A etapa intermediária do processo de desenvolvimento embrionário é caracterizada por uma intensa comunicação entre conjuntos de células que constituem os primórdios de diferentes órgãos e tecidos. Essa intensa comunicação oferece restrições para mudanças evolutivas, uma vez que alterações em um conjunto de células podem ter repercussões importantes em outras regiões do embrião e como consequência, poucas mudanças são toleradas. Qual a implicação dessa "restrição" no processo evolutivo?

Ao contrário da questão anterior, essa pergunta trata da restrição que os processos de desenvolvimento conferem as mudanças evolutivas, ou seja, refere-se à redução da variedade disponível para atuação da seleção natural. Assim, a questão também alude ao contexto da biologia evolutiva do desenvolvimento, e a finalidade é investigar se os alunos incluem explicações baseadas nos pressupostos da evo-devo, e se indicam as implicações das restrições desenvolvimentais na evolução.

Uma afirmação frequente, representada por 30% dos respondentes, foi a de que as restrições são favoráveis no sentido de que o indivíduo seja “protegido” contra mudanças prejudiciais (anomalias e más-formações) ou bruscas, como pode ser constatado em:

AI4 “Existem certos “padrões” no desenvolvimento do embrião que deve ser seguido, pois o embrião pode desenvolver anomalias ou síndromes”.

AN2 “Uma mutação muito grande, normalmente gera fenótipos incapazes de sobreviver no meio ambiente, ou incapazes de perpetuar suas características”.

A categoria identificada fornece uma inferência importante sobre o entendimento da relação entre desenvolvimento e evolução. Para os alunos, o desenvolvimento não evolui, não é alvo de processos seletivos, e, portanto, a seleção natural só ocorrerá após o processo de desenvolvimento ter concebido ou tornado viável determinadas formas orgânicas. Dessa forma, as restrições são positivas, pois evitam mudança nos padrões de desenvolvimento, uma vez que caso a mudança nesse padrão ocorra, para os alunos, essa alteração necessariamente acarretará em anomalias inviáveis. Portanto, o desenvolvimento tomado como um processo não muda de padrão, ou seja, não evolui.

A evolução modifica o desenvolvimento (o desenvolvimento evolui!) e o desenvolvimento influencia o curso da evolução, na medida em que, no caso dos organismos multicelulares, ele é o processo responsável pela produção da forma orgânica e, assim, de qualquer inovação morfológica que observemos em tais organismos... O desenvolvimento evolui pelo mesmo processo darwinista que resulta na evolução de outras características. Assim, os organismos herdam o modo como seus ancestrais se desenvolviam e essa herança se desdobra em certas possibilidades e certos limites de inovação morfológica em sua evolução futura (ALMEIDA E EL-HANI, 2010, p. 13).

Muitas respostas estavam equivocadas, ou fora de contexto, e representam 45% do total, como pode ser visto no gráfico 3.

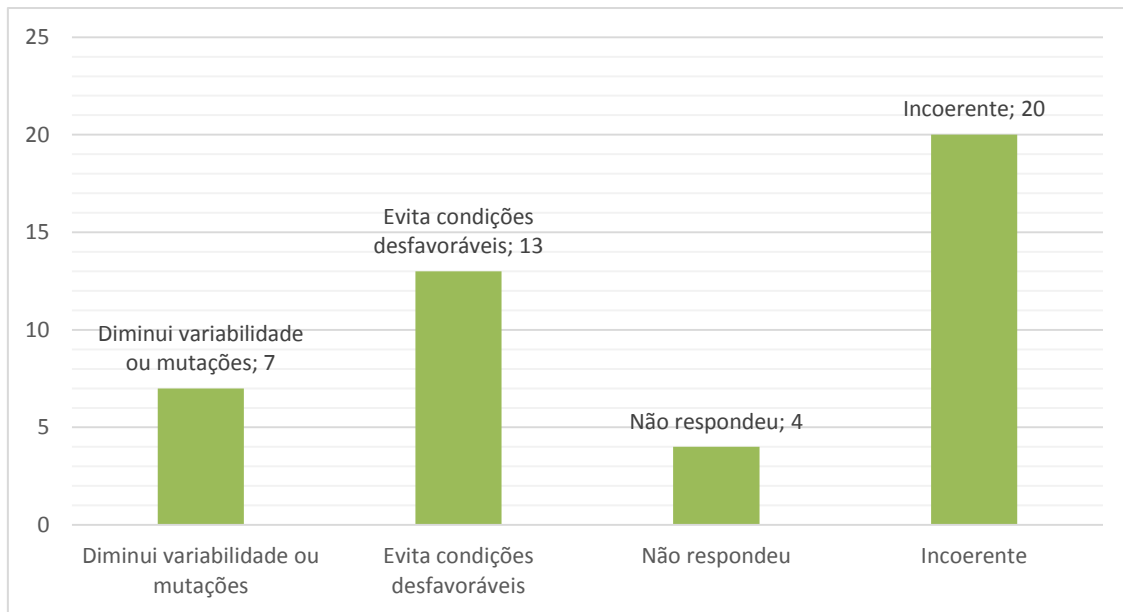


Gráfico 3.

Outras explicações, no entanto, estavam bastante adequadas ao enunciado, sendo que em sete delas constam afirmações de que restrições durante o processo embrionário reduzem as possibilidades de variabilidade e mutações, como em:

AI10 “Poderia haver uma maior variabilidade se não fosse por essa “restrição””.

AN6 “Essa “restrição” faz com que não possamos saber se a característica que foi restringida no desenvolvimento seria ou não selecionada”.

Devido ao elevado número de respostas incoerentes, as respostas restantes foram agrupadas em somente duas categorias, que tratam da afirmação da restrição impossibilitar algumas inovações evolutivas, e da restrição conferir “proteção” contra uma mutação que tenha possibilidade de representar uma condição desfavorável ou deletéria.

Respostas	Número
1. Restrição diminui as possibilidades de variabilidade e mutações	7
2. Restrição impede fenótipos desfavoráveis (anomalias embrionárias)	13
3. Resposta incoerente	20
4. Não respondeu	4

Tabela 4.

Ainda que sete alunos tenham feito a associação correta entre a restrição embrionária e a diminuição de possibilidades na variabilidade dos indivíduos, nenhum citou a contribuição e/ou participação da evo-devo na evolução.

Questão 6

Ao pensarmos nas duas questões anteriores, há relações distintas entre "reaproveitamento" e evolução e "restrição" e evolução. Leia o trecho abaixo:

A coluna vertebral de alguns animais difere quanto ao número de cada tipo de vértebra. Essa diferença resulta em pescoços longos (gansos), em pescoços curtos (camundongo), ou na ausência de pescoço (cobras). Estudos revelam que um gene (*Hoxc6*), expresso na coluna vertebral, sinaliza qual será o limite entre vértebras cervicais e torácicas. Assim, a morfologia do pescoço depende do local de expressão do gene (mais próxima ou distante da cabeça). Nas cobras, o gene *Hoxc6* é expresso tão perto da cabeça que não se formam vértebras cervicais e, portanto, elas não apresentam pescoço. Em gansos, o mesmo gene é expresso longe da cabeça, e o pescoço compreende a extensão das primeiras 22 vértebras (EL-HANI E MEYER, 2009). Embora a cobra apresente essa diferença morfológica (ausência de pescoço), essa característica manteve-se na população ao longo de gerações.

Como explicar esse exemplo de acordo com os conceitos de reaproveitamento, restrição e seleção natural?

A pergunta seis é uma questão integradora, uma vez que a partir do exemplo do pescoço de diferentes animais, a seleção natural, a restrição e o reaproveitamento atuam simultaneamente nessa narrativa sobre a coluna vertebral. Assim, tais mecanismos deveriam ser mobilizados nas explicações realizadas pelos alunos.

A finalidade dessa questão é identificar quais são os processos evolutivos incluídos nas respostas, para inferir sobre como os alunos entendem os fenômenos evolutivos.

Um equívoco bastante comum nas respostas diz respeito às restrições. Muitos alunos entenderam a restrição como um processo epigenético, ou seja, que restringir significa suprimir a atividade de alguns genes. Não associaram a perspectiva embriológica, como se pode constatar em:

AN9 “O reaproveitamento possibilitou as variações de tamanho na presença de pescoço, já a restrição impede a formação de pescoço no caso da cobra (sem vértebras cervicais).”

AI9 “Restrição para mim seria o caso da cobra, e o reaproveitamento o caso do ganso”.

AI10 “Pois o reaproveitamento é como se genotipicamente todos tem o gene para desenvolver as vértebras, mas fenotipicamente nem todos desenvolvem, chamando isso de restrição [...]”.

Nesses casos, a palavra “reaproveitamento” faz alusão a processos epigenéticos, assim talvez por desconhecer processos ontogenéticos com influência evolutiva, os alunos foram direcionados a associar “restrição” também a processos epigenéticos.

Em muitas respostas a seleção natural foi o único mecanismo mobilizado, assim os alunos não incluíram nas explicações os outros dois termos, como em AI3 “Tal característica (ausência de pescoço) por ser favorável para a população, se manteve presente ao longo das gerações e foi selecionado naturalmente”.

Em outros casos, os três termos foram utilizados na resposta, mas de forma equivocada, como em AN4 “A *seleção natural* indicou que o gene *Hoxc6* é importante para sobrevivência e desenvolvimento do indivíduo por isso sua manutenção. Porém de acordo com seu ambiente e formas de vida há uma *restrição* desse gene, isso é, foi selecionado uma restrição em cada animal que garante seu sucesso, assim *reaproveitando* a função do gene com essas restrições” (grifos meus).

Constam em algumas respostas novamente a questão da economia da natureza. Os alunos que empregaram essa discussão afirmaram que o reaproveitamento possibilita uma otimização de gasto de energia, como pode ser visto em AI16 “Reaproveitamento: maior economia de energia entre uma espécie e outra”.

Respostas	Número
1. Resposta baseada somente na seleção natural	13
2. O termo restrição foi empregado como sinônimo de mecanismo epigenético	5
3. O reaproveitamento foi tratado como possibilidade de economia de energia	2
4. Reaproveitamento explica o caso do ganso e restrição explica o da cobra	3
5. Resposta incoerente	14
6. Não respondeu	7

Tabela 5.

Nenhuma das respostas tinha um emprego adequado pra todos os termos “reaproveitamento”, “seleção natural” e “restrição”. Alguns alunos atribuíram papéis corretos a reaproveitamento e seleção natural, mas à restrição não.

Os resultados obtidos a partir dessa questão são apresentados no gráfico 4.

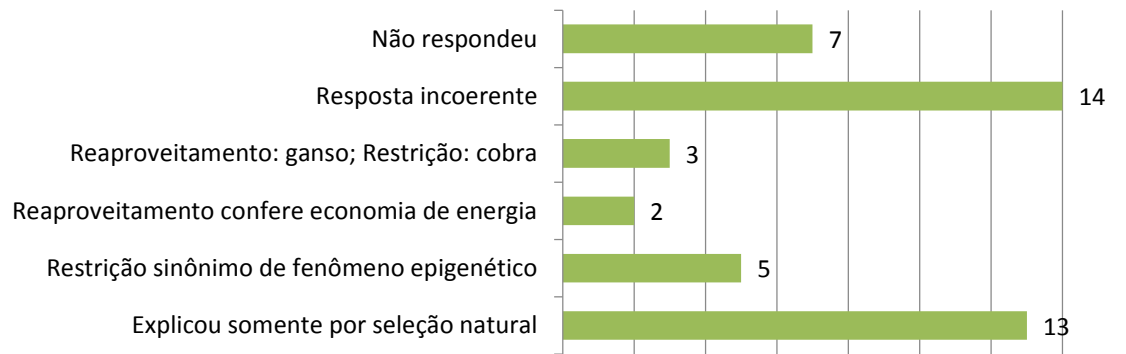


Gráfico 4.

O número de respostas incoerentes ou fora de contexto foi muito alto. Mesmo respostas que estavam coerentes ao enunciado, não estavam completamente corretas, uma vez que em alguns dos termos havia equívoco conceitual. Nenhuma resposta atendeu a narrativa esperada. Seria adequada uma resposta com afirmações tais como: o reaproveitamento do gene *Hoxc6* possibilitou diferentes fenótipos para os animais citados a partir do funcionamento dos genes reguladores; as variações mencionadas foram “permitidas” pelos processos restritivos embrionários, e para cada circunstância vivenciada pelos indivíduos, a seleção natural favoreceu a permanência dessas características.

Essa releitura epistemológica dos conceitos evolutivos sob uma perspectiva mais pluralista fundamenta a ideia da inserção de outros fatores além da reprodução, hereditariedade e variabilidade nas questões evolutivas. Entendemos que essas discussões devem incidir nos espaços de Formação Inicial e, portanto, há necessidade de (re)pensarmos em condições didáticas para essa inserção. As questões tem objetivo de investigar se os alunos mobilizam conceitos referentes à Evo-Devo ou conteúdos que não estejam centrados apenas na seleção natural para responder questões evolutivas que envolvam processos de restrição, reaproveitamento e ação gênica. A partir da análise dos dados, almejamos identificar possibilidades que indiquem caminhos para uma (re)contextualização didática do Ensino da Biologia Evolutiva.

Em um primeiro momento, identificamos quais palavras são frequentemente mencionadas nas respostas dos alunos. Essa primeira análise pode indicar quais conceitos são estruturantes do pensamento biológico referente à evolução. As palavras recorrentes foram “característica adaptativa”, “indivíduos bem-sucedidos”, “sobrevivência”, “vantagem”, “pressão do meio”, “pressão seletiva”, “melhora”, “adaptação”, “favorece” “reprodução”, “desenvolveu”, “mecanismo”, “eficiência”,

“competição”, “extinguir”, “gasto energético”, “facilidade”. “economia de energia” e “mutações”. Dessa forma, podemos encontrar subsídios conceituais para elaboração de um texto didático que trate a evolução biológica sob a perspectiva descrita em nosso referencial.

A análise dos dados evidencia que os alunos não mencionam a Evo-Devo e nem processos ontogenéticos para explicar processos evolutivos. As respostas enfatizam que a evolução e a existência de determinadas formas orgânicas são regidas pela economia de energia (as restrições a algumas morfologias existem devido a uma necessidade de economia de energia; caso fossem concebidas ocasionariam um gasto energético muito grande) e por associações à adaptação (o reaproveitamento de algumas sequências gênicas é importante para, necessariamente, culminar em uma adaptação do organismo).

A partir das respostas, podemos inferir que as questões ontogenéticas ainda não são abordadas ou o são de forma superficial na Formação Inicial. As palavras mais recorrentes e equívocos conceituais encontrados nas respostas dos alunos, podem indicar caminhos para a possibilidade de elaboração de um texto didático que inclua os pressupostos ontogenéticos na Teoria Evolutiva, fundamentados no que os alunos apresentam como eixos norteadores do pensamento evolutivo. Para CAPONI (2012), há necessidade de que os professores fundamentem-se em dois eixos: conveniência ecológica e viabilidade ontogênica. A Teoria da Seleção Natural permite que trabalhem com o primeiro eixo e a Evo-Devo, com o segundo. O ensino da Teoria da Evolução terá de considerar os dois. Dessa forma, diante das considerações epistemológicas atuais sobre a teoria evolutiva, os dados apresentados aqui são o início de uma discussão sobre conteúdos fundamentais para elaboração de estratégias didáticas cujo conteúdo mantenha os fundamentos da Teoria Sintética, mas articule esses pressupostos com as premissas constituintes da Evo-Devo.

Dados cooptados das transcrições das reuniões realizadas pelo GPEB.

Como já mencionado, as reuniões do GPEB foram gravadas e posteriormente transcritas. A partir das transcrições, pudemos identificar algumas categorias associadas às falas dos participantes, cuja análise fornece dados importantes acerca do pensamento biológico sobre a evolução.

Com base em toda literatura descrita e na concepção que os alunos apresentaram sobre seleção natural nas primeiras reuniões (tratavam seleção natural e evolução quase

como sinônimos), um dos questionamentos bem explorados durante as reuniões foi **“Um organismo pode estar perfeitamente adaptado ao ambiente em que está? A seleção natural atua em um “rol” máximo de variedades fenotípicas?”**.

O intuito era investigar se os alunos fariam a relação entre as restrições do processo de desenvolvimento e as variantes fenotípicas de uma população, nas quais a seleção fará a triagem; se os mesmos entenderiam que, para um organismo estar perfeitamente adaptado, ele deveria ser selecionado em uma população em que todas as formas orgânicas possíveis estivessem disponíveis para subsequente atuação da seleção natural. Outro ponto a ser destacado é a ideia de que a evolução percorre um “alvo móvel”, uma vez que as respostas às pressões seletivas e o surgimento de pressões seletivas inéditas não atuam e/ou surgem em sincronismo. À medida que o organismo muda diante de uma pressão seletiva- considerando o tempo evolutivo-, ele altera o seu ambiente, podendo provocar, ele próprio, uma pressão seletiva distinta.

De acordo com Meyer e El-Hani (2005),

as características adaptativas, na história evolutiva de uma espécie somente permitiram que os organismos que as apresentavam tivessem mais sucesso, relativamente a outros organismos da mesma população, na sobrevivência e reprodução em um determinado ambiente. Elas seriam perfeitas e seus portadores, organismos ótimos, somente se toda variação possível estivesse presente em uma dada população, em um dado momento da história evolutiva, mas isso é claro, nunca acontece. Assim, as características selecionadas são sempre as mais favoráveis dentro de um espectro de variações disponíveis numa população, e não características que se mostram perfeitas diante de desafios que o ambiente apresenta para os organismos (...) Muitas pessoas pensam que se os organismos estão sendo, continuamente, selecionados de modo a se adaptarem as condições ambientais nas quais vivem, a evolução deverá fazer com que as populações se tornem, com o tempo, cada vez mais capazes de sobreviver nesse ambientes, alcançando por fim, uma condição ótima, na qual os organismos e suas características estariam perfeitamente adaptados à vida nessas condições (p. 69).

O ambiente está sempre se modificando, tanto em decorrência de processos que não dependem dos organismos, por exemplo alterações geológicas, como por causa da ação contínua dos seres vivos sobre ele. A evolução por seleção natural é um processo que persegue, por assim dizer, um “alvo móvel”: as condições ambientais que estabelecem os desafios aos quais os organismos responderão estão continuamente mudando, em parte por causa das atividades dos próprios organismos (MEYER E EL-HANI, 2005, p. 69).

Com base nesse questionamento, ficou claro que uma das dificuldades conceituais expostas pelos alunos nas reuniões está centrada na afirmação de que os

organismos, desde que estejam se reproduzindo e alimentando-se, estão maximamente adaptados a seus ambientes, e, portanto são resultados de uma seleção natural que atuou em um rol máximo de variações. Ou seja, dentre todas as possibilidades possíveis, a seleção “escolheu” a “melhor”, já que o organismo é capaz de realizar atividades vitais (fundamentais e suficientes para sua sobrevivência) e, portanto, está perfeitamente adaptado.

As transcrições evidenciam a relação entre adaptação e nicho ecológico. Os alunos relacionam o conceito de nicho com a adaptação. Para eles, a visualização do indivíduo como saudável, realizando atividades fundamentais para sobrevivência, como alimentar-se e reproduzir-se é um indício de que o mesmo está perfeitamente adaptado ao ambiente em questão.

Outra relação bem estabelecida e identificada nas transcrições faz-se entre os conceitos de adaptação e economia da natureza. Para os alunos a restrição morfológica existe para evitar gastos energéticos, remetendo a questão da “economia da natureza”. Assim, atribuem à restrição da existência de alguns fenótipos ao gasto energético que os mesmos proporcionariam ao indivíduo portador, caso fossem viáveis.

Por meio da detecção das dificuldades conceituais cooptadas das transcrições, é possível inferir que os alunos não entendem o processo de desenvolvimento como um processo que restringe a diversidade de formas orgânicas, as quais seriam inviáveis em alguma etapa do desenvolvimento e, portanto, restringe o “rol” de possibilidades nas quais a seleção natural atua e justifica, portanto os fenótipos existentes. Se esse “rol” não é infinito, -uma vez que o processo de desenvolvimento não é totalmente plástico- não há como afirmar que um organismo está perfeitamente adaptado ao ambiente em questão.

Ainda no que se refere às associações descritas, é notável que os alunos não fazem a relação entre as restrições do desenvolvimento e as formas orgânicas existentes, não refletindo sobre a possibilidade de existência de fenótipos que poderiam estar mais adaptados e, no entanto, não chegaram a estar entre a diversidade presente para atuação da seleção natural. Em reuniões subsequentes, quando a pergunta “a seleção natural atua em uma variedade limitada?” era associada com “porque não encontramos outros padrões de formas orgânicas?”; a restrição imposta por padrões específicos no desenvolvimento passou a ficar mais clara para os alunos, e os mesmos argumentaram que não era mais possível afirmar que um organismo pode estar perfeitamente adaptado ao ambiente em questão, no espaço e tempo determinados.

Além disso, a análise das transcrições evidencia, por parte dos alunos, uma mobilização frequente de argumentos de cunho ecológico- mais especificamente do conceito de nicho ecológico-, o que pode indicar mais uma evidência da necessária abordagem sistêmica dos conteúdos biológicos para explicação não só do processo de evolução biológica, mas de outros conceitos estruturantes da Biologia. Como argumentado por Pigliucci (2007), há uma lacuna na questão ecológica dentro do quadro conceitual da Síntese Moderna, o que possivelmente, também ocorre no ensino e, portanto, a articulação entre fenômenos ecológicos e evolutivos é estabelecida de forma incompleta ou reduzida.

Como afirmam El-Hani e Almeida (2010), a partir das condições teóricas atuais ancoradas ao conceito de evolução biológica, há uma tendência para estruturação de um campo de estudo denominado ECO-EVO-DEVO, por meio do qual, poderemos estabelecer relações entre três grandes áreas das ciências biológicas, identificando articulações subjacentes ao Ensino e a Didática da Biologia.

Abaixo, seguem as categorias identificadas a partir das falas:

C1- Adaptação e Nicho Ecológico- Os alunos relacionam o conceito de nicho com a adaptação. Para eles, a visualização do indivíduo como saudável, realizando atividades fundamentais para sobrevivência, como alimentar-se, reproduzir-se é um indício de que o mesmo está perfeitamente adaptado ao ambiente em questão.

Essa concepção está claramente lastreada em uma interpretação ecológica, uma vez que para Begon, Harper & Townsend (2010), quando o enfoque está voltado para o organismo, a Ecologia ocupa-se do modo como os indivíduos afetam e são afetados pelo seu ambiente.

As definições de nicho encontradas em alguns livros supracitados de Ecologia, perpassam desde o espaço ocupado pelo organismo até os limites de tolerância que o mesmo suporta em determinado ambiente, para as mais variadas características. Para Odum (1988), o nicho ecológico não inclui apenas o espaço físico ocupado por um organismo, mas também o papel funcional na comunidade (ex: sua posição trófica) e a posição em gradientes ambientais de temperatura, umidade, pH, solo e outras condições de existência. Assim, para esse autor, o nicho ecológico de um organismo, inclui também o total das suas necessidades ambientais.

Para Townsend, Begon e Harper (2010), um nicho não é um local, mas uma ideia: um resumo das tolerâncias e exigências de um organismo.

O conceito moderno de nicho foi proposto por Hutchinson em 1957 (*apud* Townsend, Begon e Harper, 2010) e se refere às maneiras pelas quais tolerâncias e necessidades interagem na definição de condições e recursos necessários a um indivíduo ou uma espécie, a fim de **cumprir seu modo de vida** (grifo nosso).

O trecho destacado, cooptado da própria definição do conceito, é bastante consonante às explicações dos alunos, uma vez que os mesmos associam atividades vitais ao nicho, ou seja, estabelecem que as condições iminentes ao nicho, são limites, entre os quais, o organismo pode viver.

Para Ricklefs (2003), o nicho de um organismo representa os intervalos de tempo **que pode tolerar e os modos de vida que o mesmo possui**, isto é, seu papel no sistema ecológico. Um princípio importante da ecologia é que cada espécie tem um nicho distinto, uma vez que cada uma tem atributos distintos de forma e função que determinam as condições que ela pode tolerar como ela se alimenta e como ela escapa de seus predadores (grifo nosso). Mais uma vez, o trecho grifado, embora de uma definição proposta por outro autor, evidencia aproximações evidentes às encontradas nas falas dos alunos. Se o organismo está em uma zona de caracterizações bióticas e abióticas que permite a realização de suas atividades metabólicas e reprodutivas, está perfeitamente adaptado a esse meio.

É oportuno notar que nenhuma das três definições de nicho expostas aqui, falam explicitamente sobre a relação entre adaptabilidade do organismo e a especificidade do nicho ecológico do mesmo. No entanto, estabelecem relações claras entre nicho e modos de vida, nicho e papel ecológico, o que pode, muitas vezes, induzir o aluno a forçar essa associação de que se o organismo está realizando seu “papel na comunidade”, ele deve estar perfeitamente adaptado.

Algumas falas exemplificam:

A2: *Se eu posso falar? Ah, mas daí eu penso de outra forma também... se naquela situação, sei lá, igual as plantas do cerrado, tão aqui tal, tem essa quantidade muito grande de ferro e alumínio no solo, e tem menos nutrientes que as pessoas acham que seriam importantes para as plantas, comercialmente falando. Se elas tão vivendo bem, vivem anos aí, se reproduzem, eu acho que elas estão maximamente adaptadas ao ambiente, nesse limite de tempo. Agora se alguma coisa acontecer, sei lá, o sol começar a irradiar mais, daí elas já não estarão mais talvez.*

A6: É, eu acho assim, a partir do momento que o indivíduo tá vivendo bem, tá se reproduzindo, tá se nutrindo de alguma forma, igual se for ver, a bactéria, é um indivíduo muito simples, mas ela tá aí há muitos milhões de anos. A gente também, que muitas pessoas acham que a gente é mais complexo e tal, e eu realmente acredito que em termos metabólicos a gente até possa ser mais complexo, a gente também tá aqui, vivendo super bem.

A5: É então, acho que seria assim, eu posso falar que uma espécie está otimamente adaptada, ao ponto que ela atinge um equilíbrio perfeito que a gente pode calcular com fatores ecológicos porque ela tem uma taxa de sobrevivência e reprodução que faz com que ela não esgote o meio e que ela viva muito bem, ou seja ela atinge naqueles gráficos de população, aquele patamar de crescimento, em que a população nem sobe e nem cai, pq se ela aumentar mais do que isso, ela esgota o meio e depois ela tem uma queda brusca, então ela não vai estar otimamente adaptada, pq ela vai estar digamos tão bem adaptada que ela vai aumentar, se expandir tanto sua população pq ela tá bem adaptada que vai consumir o meio, desgastar o meio e vai prejudicar ela mesma. Então ela cria um próprio problema pra ela. A partir do momento que ela está adaptada a tal ponto de criar um problema pra ela, ou seja não ter uma estabilidade, ao longo de um período de tempo, eu posso falar que ela não está otimamente adaptada.

A2: Quando fala em perfeitamente adaptado eu sempre penso em nicho, o nicho ecológico em que ele tá inserido e se ele tá vivendo dentro do seu limite, do seu ótimo, então ele tá perfeitamente adaptado. Eu considero isso. Dentro das suas limitações de nicho, entendeu? Mas isso naquele ambiente que ele tá, se o ambiente mudar um pouquinho pode ser que ele não esteja mais...

C2- Adaptação e Economia da Natureza- Outra relação evidente apresentada nas falas dos alunos é a associação da restrição morfológica com o gasto energético, remetendo a questão da “economia da natureza”. Assim, atribuem à restrição da existência de alguns fenótipos ao gasto energético que os mesmos proporcionariam ao indivíduo portador, caso fossem viáveis.

Para Odum (1998), os organismos, os ecossistemas e a biosfera são caracterizados por uma termodinâmica fundamental para manutenção do equilíbrio ambiental: os mesmos são capazes de criar e manter um alto grau de ordem interna, ou uma condição de baixa entropia (pequena quantidade de desordem ou de energia não disponível em um sistema). Para tanto, há uma contínua e eficiente dissipação de energia de alta utilidade (ex: luz ou alimento) a qual resulta em energia de baixa

utilidade (ex: calor). No ecossistema, a “ordem” de uma estrutura complexa de biomassa é mantida pela respiração total da comunidade que “expulsa” continuamente a desordem. Dessa forma, os ecossistemas e os organismos são termodinâmicos abertos fora do ponto de equilíbrio, que trocam continuamente energia e matéria com o ambiente para diminuir a entropia interna, à medida que aumenta a entropia externa.

As várias formas de vida estão todas submetidas a mudanças energéticas, embora nenhuma energia seja criada ou destruída. A energia que chega à superfície terrestre sob a forma de luz é equilibrada pela energia que sai da superfície sob a forma de radiação térmica. A essência da vida reside na progressão de tais mudanças como crescimento, autoduplicação e a síntese de relações complexas de matéria. Sem as transferências de energia subjacentes a essas mudanças, não haveria vida e nem manutenção de ecossistemas.

Segundo os trechos acima, podemos entender que o equilíbrio de um ecossistema depende da dinâmica dos ciclos de energia, e, portanto tem como base leis da termodinâmica. Assim, essa caracterização pode levar o aluno a associar o constante fluxo de energia dos ecossistemas com o fato da natureza ser econômica e assim, obedecendo às “leis” da natureza, a evolução seguiria os moldes especificados pela mesma.

Outro ponto que pode estar relacionado com as falas dos alunos é alguns exemplos dados por Krebs e Davies (1996), os quais fundamentam a ideia de como uma análise econômica de custos e benefícios pode ser usada para compreender o comportamento. Como exemplo dessa análise, os autores descrevem o comportamento dos Caranguejos (*carcinus maenas*) em relação a escolha das presas. Quando esses crustáceos tem a chance de escolher entre diferentes tamanhos de mariscos, os mesmos optam por aquele cujo tamanho fornece a maior taxa de retorno energético.

Esses caranguejos gastam muito tempo para quebrar e abrir os mariscos grandes, que por isso são menos lucrativos do que as conchas preferidas, de tamanhos intermediários, em termos de ganho de energia por unidade de tempo gasto com manipulação. Mariscos muito pequenos são fáceis de quebrar e abrir, mas contêm tão pouca carne que mal compensam o esforço. Mas a estória não deve ser tão simples assim, porque os caranguejos comem mariscos com uma certa variação de tamanho ao redor dos mais lucrativos. Por que algumas vezes comem mariscos maiores e outras vezes menores? Uma hipótese é que o tempo gasto para procurar pelos mais lucrativos influenciaria a escolha. Se demorar muito tempo para encontrar um marisco lucrativo,

pode ser que o caranguejo consiga uma taxa total de ingestão de energia mais alta comendo alguns com tamanhos menos lucrativos.

Esse exemplo elucida um caso em que o comportamento do animal é influenciado pela questão da “economia” em relação ao gasto energético. As falas dos alunos são análogas a esse exemplo. No entanto, mencionam a impossibilidade da manutenção de determinadas variantes morfológicas, uma vez que as mesmas não possibilitariam (caso fossem mantidas na população), a aquisição de comportamentos mais “econômicos”. Assim, em detrimento de outras pressões seletivas, atribuem a “economia” da natureza um papel determinante da manutenção (ou não) da característica na população.

No caso específico do aluno 5, o mesmo atribuiu um sentido teleológico as mutações, descaracterizando a aleatoriedade das mesmas. Como se para ocorrer, a mutação, já “soubesse” o tipo de variação que seria expressa e quais são as consequências da mesma na vida do organismo, bem como as pressões seletivas que manteriam ou não a característica na população.

As transcrições que exemplificam essa categoria estão abaixo:

A3: A professora tinha falado sobre o fato da natureza ser econômica, então a própria evolução é econômica e aí pintou uma dúvida lá na hora que eu até anotei pra trazer pra cá. Não que se a natureza é econômica ela explique isso, mas. ... se a evolução é econômica porque que os seres vivos não pararam assim, num estágio, tipo uma bactéria...ela consegue sobreviver, fazer tudo que ela tem que fazer, a mesma coisa que a gente.

A2: Ah teve uma mutação, que ocorreu ao acaso e aí ela levou ao aumento da complexidade... aí o desenvolvimento disso é de uma forma econômica. Quer dizer, essa mutação ela só vai se perpetuar, se o desenvolvimento dela, naquele meio for econômico. Se for uma mutação que não seja econômica vai ser mto mais difícil ela permanecer.

A5: Eu acho que assim, não sai da seleção natural, é que ela assim, tem, vai fazer parte da seleção as mutações que eu vou ter e tudo mais em nível ecológico pra por exemplo tem mutações que eu não posso ter porque elas poderiam existir só que teriam um gasto energético muito grande pra mim, elas não compensariam. Eu acho que na competição entre os indivíduos de uma mesma população e tudo mais, dentro do próprio indivíduo

mesmo, na busca de alimento dele, se for desvantajoso pra ele, se não for econômico pra ele, fica mais difícil dele passar pra frente essas mutações.

Aprendemos em Ecologia que hábitat de um organismo é o lugar onde o mesmo vive e nicho ecológico o papel que esse organismo desempenha.

Richard Lewontin quando trata da relação organismo e ambiente, descreve alguns problemas causados pela definição arbitrária de nichos ecológicos na ausência de organismos (Lewontin, 2002, p. 49). Comenta que muitas vezes na Ecologia “nicho ecológico consiste em um termo técnico usado universalmente para denotar o complexo de relações entre uma espécie particular e o mundo exterior” (ibid., p. 49). Acrescenta ainda que a concepção de que “o ambiente de um organismo é causalmente independente dele e de que as alterações no ambiente são autônomas e independentes das alterações na própria espécie”, está claramente equivocada (ibid., p. 53).

Assim, reforça a idéia de que para entender este conceito é necessário que o entendamos como consequência da natureza dos próprios organismos que o compõem. Nesse sentido o autor esclarece alguns aspectos da relação entre organismo e ambiente:

1. os organismos determinam quais elementos do mundo exterior devem estar presentes para a constituição dos seus ambientes e quais relações entre esses elementos são relevantes para ele;
2. os organismos não só determinam os aspectos do mundo exterior que são relevantes para eles, em função de peculiaridades da sua forma e de seu metabolismo, como também constroem ativamente [...] um mundo à sua volta;
3. os organismos não se limitam a determinar o que é relevante e a criar um conjunto de relações físicas entre os aspectos relevantes do mundo exterior [...] também promovem um processo constante de alteração do seu ambiente;
4. os organismos modulam as propriedades estatísticas das condições externas à medida que essas condições se tornam parte do seu ambiente;
5. os organismos determinam, pela sua biologia, a natureza física real dos sinais advindos do exterior [...] transduzem um sinal físico em outro bem diferente, e é o resultado dessa transdução que as funções do organismo percebem como variável ambiental. (Lewontin, 2002, p. 57-68).

Assim, ao se interpretar o conceito de nicho, dever-se-ia pensar na história evolutiva de cada uma das espécies que formam a comunidade, analisando a maneira pela qual, elas interagem com os componentes bióticos e abióticos do meio e as possíveis maneiras pelas quais foram interagindo ao longo do tempo evolutivo. Ao acompanhar este processo poder-se-ia verificar, por exemplo, como as espécies atualmente mantêm determinadas relações e quais são as presumíveis influências

pretéritas, bem como, seria possível tentar inferir o porquê de cada espécie utilizar os recursos do ambiente de uma determinada forma e não de outra. Além disso, seria admissível raciocinar de que maneira o ambiente modula o modo de vida dos organismos e, em contrapartida, como os indivíduos poderiam modificar, manipular ou influenciar o ambiente ao seu redor, influenciando até os seus descendentes (CORRÊA, et al, 2011).

Os dados reiteraram a necessária articulação dos conceitos ecológicos com os processos de evolução biológica. O próprio entendimento acerca do nicho ecológico, apreendendo a relação organismo –ambiente de forma equívoca incide na concepção de que a evolução biológica pode culminar em um organismo perfeitamente adaptado.

Ao pensarmos que o ambiente age de forma preponderante sobre o organismo, que, nesse contexto, é entendido como uma entidade passiva, receptora das mais distintas pressões seletivas- nesse caso determinadas e/ou alteradas por condições físicas ou catastróficas- enxergamos um sincronismo muito perfeito entre a pressão seletiva e a resposta, quase imediata, fornecida pelo organismo em questão. A atividade dos organismos, muitas vezes, só é considerada em função dessa resposta: o organismo age apenas para responder determinada pressão seletiva e, “tentar” garantir a sua sobrevivência. Dessa passividade decorre a possibilidade de que esse organismo, ao responder sincronicamente àquela pressão, poderá encontrar-se perfeitamente adaptado ao meio.

A partir da Teoria de Construção de nicho e da própria concepção de nicho ecológico, podemos entender que o organismo age constantemente sobre o seu meio e altera as condições dele, engendrando, mesmo que espontaneamente, condições que afetarão a constituição das pressões seletivas. À medida que a frequência de determinada característica aumenta na população porque satisfaz determinada pressão, essa característica poderá alterar significativamente o meio, e então, contribuir para geração de outra pressão seletiva, diferente da primeira.

Mais uma vez aqui, constatamos a impossibilidade de separarmos os fenômenos biológicos para entendermos o processo como um todo- nesse caso, a evolução biológica. Em palavras bem simples: a pressão, não vê e/ou garante a mudança, em uma linearidade visível e/ou identificável. Por exemplo: essa característica existe nessa frequência porque foi decorrente dessa pressão seletiva.

Daí a metáfora de que a evolução sempre percorrerá um alvo móvel: a medida que o organismo muda porque necessita “agradar” ao meio, ele muda o meio, que então, exige reformulações na pressão seletiva inicial.

CAPÍTULO 5

A ESTRUTURAÇÃO DO PENSAMENTO BIOLÓGICO REFERENTE À EVOLUÇÃO: UMA POSSIBILIDADE PARA ARTICULAÇÃO ENTRE EPISTEMOLOGIA E DIDÁTICA DA BIOLOGIA NA FORMAÇÃO INICIAL.

A Biologia Evolutiva é uma área cujo objeto de estudo e a própria natureza do conhecimento contempla uma profusão de resultados e processos decorrentes das diversas subáreas da Biologia: como a biologia molecular, a genética de populações, a paleontologia, a sistemática de plantas e animais, a ecologia. A partir dessa compilação de ideias, a biologia evolutiva, embora tenha estabelecido a evolução como um “fato”, não esclareceu completamente porque e como esse processo ocorre (CALDEIRA E SILVEIRA, 1998).

Na segunda metade do século XX, as pesquisas sobre a Biologia Evolutiva debruçaram-se sobre a dimensão molecular e genética, mais especificamente sobre os processos de funcionamento do gene. Essa plêiade de ideias e descobertas focadas sobre a dimensão genética e molecular engendraram os principais pressupostos da Teoria Sintética, cuja ênfase recai sobre os conceitos de mutação, recombinação e Seleção Natural. “STEBINS (1970) reconhece cinco processos básicos atuando na evolução das espécies: “Mutação Gênica, Variações na Estrutura e no Número de Cromossomos, Recombinação Gênica, Seleção Natural e Isolamento Reprodutivo” (CALDEIRA E SILVEIRA, 1998, p. 96).

Apesar do longo caminho de progressos que a Biologia Evolutiva percorreu, quer no campo das descobertas moleculares, físicas e químicas, quer no debate filosófico, ainda não conseguimos responder às perguntas formuladas há mil nios (CALDEIRA E SILVEIRA, 1998).

Para Mayr (2009), a evolução biológica foi a ideia mais profunda e abrangente dos últimos dois séculos. Conforme afirmam Selles e Ferreira (2005), sua importância não se restringe ao campo da investigação científica, pois a evolução biológica teve papel fundamental na constituição da disciplina escolar de Biologia, como um corpo de conhecimento que mant m ciências como a Zoologia, a Botânica e a Fisiologia unificadas (SANTOS, 2013).

Assim, tal como tentamos traçar ao longo do nosso trabalho, os estudos referentes à Biologia Evolutiva ainda apreendem uma série de questões empíricas pouco

descritas ou incompletas, que certamente incidem no quadro teórico e filosófico, enveredando um contexto de refutações, debates e diálogos epistêmicos. Essa incompletude, que por ora, reflete em hiatos conceituais, é decorrente, também, da falta de integração entre as áreas para explicarmos os processos evolutivos. Se, de fato, conseguimos argumentar acerca do caráter sistêmico da Biologia e da evolução, decorre disso, que só entenderemos a evolução a partir da integração entre as áreas: genética de populações, biologia molecular, ecologia, paleontologia, embriologia entre outras. E muito do que ainda não havia sido explicado e ainda não o foi sobre os processos evolutivos, reside no entendimento das relações entre organismo, gene e ambiente.

É notório, como os próprios dados demonstram- pelas categorias referentes ao nicho ecológico e a economia da natureza- que as “concepções ecológicas” exercem um papel bastante significativo para os alunos, quando se faz necessário explicar fenômenos evolutivos. Assim, o entendimento da relação organismo/ambiente é fundamental para que os alunos compreendam como essa relação interfere e/ou atua nos caminhos evolutivos.

Os ambientes estão em constante mudança, seja por meio de fatores que não dependem dos organismos, como alterações geológicas, climáticas e até mesmo catastróficas (como o impacto de corpos celestes), como também alterações provocadas pelos próprios organismos no ambiente em que vivem. Dessa forma, a seleção natural constitui um processo que persegue um alvo móvel, pois as condições ambientais não são estáticas e modificam-se diante do próprio percurso evolutivo dos organismos (SANTOS, 2013).

Essa condição de ação e modificação recíproca, porém assíncronica entre ambiente e organismo, reiterada pela Teoria de Construção de Nicho, concebe o processo evolutivo como um caminho imprevisível, sujeito a modulações e (re) formulações constantes. A imprevisibilidade do resultado dessa ação entre organismo e ambiente permite entendermos como, de fato, raramente, podemos prospectar ou regressar a caminhos evolutivos certos e previsíveis, cuja prospecção ou reconstrução dependa apenas de um fator (ou do organismo, ou de um traço fenotípico, ou de uma pressão seletiva, por exemplo).

Os dados apontam que os alunos não entendem o organismo como resultado de uma ação de processos sinérgicos que, ao longo do tempo evolutivo atuam (de) sincronicamente, configurando, a partir dessas influências, prospecções evolutivas

permanentemente vulneráveis a mudanças- como fica evidenciado pelo fato de afirmarem que um organismo sempre poderá estar perfeitamente adaptado ao meio.

No entanto, o ensino da biologia evolutiva na Formação Inicial ainda apoia-se, preponderantemente em conceitos propostos pela Teoria Sintética. A ênfase na ação da seleção natural fica evidente no próprio trecho de Futuyma (1993), em especificações sobre a Teoria Sintética:

(1) as populações evoluem por mudanças nas frequências gênicas resultantes da deriva genética, do fluxo gênico, e especialmente, da seleção natural; (2) a maior parte das variantes genéticas adaptativas apresenta pequenos efeitos fenotípicos individuais, de tal modo que as mudanças fenotípicas são graduais (Futuyma, 1993, p. 13).

O referencial teórico e a discussão dos dados apresentados são pano de fundo de nosso principal objetivo: propiciar uma articulação entre Espitemologia e Didática a partir de uma ação exequível na Formação Inicial. É importante ressaltar que essa perspectiva didática não oblitera com os pressupostos evolutivos apresentados pela Teoria Sintética, mas apresenta o acréscimo de outros conceitos e da abordagem sistêmica no Ensino de Evolução.

A Evo-Devo é uma novidade teórica que incide fatidicamente na disciplina de evolução, ora por revelar explicações acerca da diversidade orgânica, ora por subsidiar a necessária abordagem sistêmica do processo evolutivo. A Filosofia da Ciência tem a função de denunciar essas encruzilhadas teóricas que, na maior parte dos casos, exigem novos perfis teóricos difíceis de serem definidos. Quando um novo regime epistêmico consolida-se, é necessário que pensemos em possibilidades de inserção dessa novidade no Ensino: é uma característica natural da própria ciência que, ao longo dos anos, e com o avanço das pesquisas, a estrutura de alguns conceitos seja (re) pensada. No entanto, poucas vezes essas reformulações epistemológicas chegam às salas de aula.

Atualmente, o conhecimento referente a evolução biológica é descrito como uma integração de múltiplos mecanismos e fatores evolutivos em um contexto de condições históricas, desenvolvimentais e ecológicas). Assim esse contexto, no que tange a perspectiva educacional, faz emergir a questão de como trabalhar com um conhecimento integrado e pluralista sobre o processo evolutivo na formação de biólogos, tanto aqueles que se direcionarão para a pesquisa acadêmica e a atuação técnica, quanto aqueles que serão professores de biologia (SANTOS E EL-HANI, 2013).

Santos e El-Hani (2013), apresentam uma pesquisa sobre esse cuja ênfase foi um estudo sobre como e se os livros didáticos de Ensino Superior das áreas de biologia evolutiva e zoologia de vertebrados abordam conteúdos relativos ao pluralismo de processos e à Evo-Devo. “Os livros didáticos submetidos à análise foram selecionados pela representatividade de seu uso em cursos de evolução e zoologia de vertebrados de uni- versidades situadas em países de língua latina e anglo-saxônica” (p. 204). Os livros analisados foram: Futuyma (2009); Ridley (2006); Stearns (2005); Pough et al (2008); Hickman et al (2007) e Hildebrand (1998).

De acordo com os dados descritos pelos autores, os livros de zoologia de vertebrados “não apresentam uma abordagem pluralista do processo evolutivo, com exceção da atenção dada à relação entre evolução e desenvolvimento, nos marcos da evo-devo. A recontextualização do pluralismo de processos parece ser ainda incipiente nesse campo” (SANTOS E EL-HANI, 2013, p. 210).

De um modo geral, foi possível notar um maior avanço da recontextualização dos conteúdos relativos à evo-devo em relação a outros elementos de uma síntese estendida. Tal afirmação é válida tanto para os livros de biologia evolutiva como para os de zoologia de vertebrados (SANTOS E EL-HANI, 2013).

Embora, a Evo-Devo, particularmente, possa contribuir de modo bastante efetivo para o esclarecimento de muitas questões referentes à evolução, para que esse processo seja entendido de forma sistêmica, outros fatores devem também, ser inseridos nessa recontextualização pedagógica. Os dados apresentados pela nossa pesquisa indicam que um dos grandes problemas concenentes ao Ensino de Evolução na Formação Inicial incide na forma que os alunos concebem a relação organismo ambiente. O papel “ecológico” precisa ser abordado de forma mais integrada aos níveis de organismo e celular, já que, embora, pouco tratado na Síntese Moderna, seja bastante mencionado nas argumentações dos alunos.

A pesquisa realizada por Santos e El-Hani, mostra que livros didáticos presuisados já encluem em suas explicações evolutivas, parte dos fatores e mecanismos considerados em “visões pluralistas do processo evolutivo nas duas últimas décadas, principalmente contribuições da evo-devo, mecanismos de especiação e deriva gênica e, com menor proeminência, mecanismos macroevolutivos e restrições” (p.212-213). Portanto, uma recontextualização pedagógica do pluralismo de processos já vem ocorrendo no conhecimento escolar de biologia evolutiva, no nível superior de ensino. Trata-se, contudo, de uma recontextualização ainda inicial, mantendo-se grande ênfase

sobre a seleção natural em relação aos outros mecanismos, que não são abordados de modo aprofundado (SANTOS E EL-HANI, 2013).

Nos livros didáticos de zoologia de vertebrados, por sua vez, seleção natural e contribuições da evo-devo são tratadas com destaque, enquanto os demais fatores evolutivos estão quase sempre ausentes. Portanto, esses livros não apresentam uma abordagem pluralista do processo evolutivo, com exceção da atenção dada à relação entre evolução e desenvolvimento. Em termos gerais, percebe-se, em ambos os campos, um maior avanço da recontextualização dos conteúdos relativos à evo-devo em relação a outros fatores incluídos em uma visão pluralista da evolução (SANTOS E EL-HANI, 2013).

O conhecimento escolar de evolução tem sido investigado nos níveis médio e superior, tanto em termos de um diagnóstico de sua situação corrente, quanto em termos da construção de inovações pedagógicas que permitam não somente ensinar sobre ideias fundamentais da biologia evolutiva de modo efetivo, mas também introduzir, ao menos, alguns elementos dos debates contemporâneos que discutimos acima (SANTOS E EL-HANI, 2013).

A partir de investigações inseridas diretamente no contexto da sala de aula da Formação Inicial, o nosso objetivo foi traçar ilações, mesmo que incipientes, sobre o caminho metodológico e teórico para a estruturação de um texto cujo principal conteúdo seja a abordagem dos processos evolutivos sobre a perspectiva pluralista e sistêmica, mencionada ao longo de toda tese.

Entendemos que, o regime epistêmico contemporâneo, embora exija essa reformulação e/ou contextualização didática, tem raízes no passado e vincula-se a conceitos muito bem fundamentados dentro da Biologia Evolutiva. Como deixar essa articulação entre o passado e o presente explícita em nosso texto? Como acrescentar outros fatores ao processo evolutivo, de forma que o encadeamento ou a ação sinérgica desses elementos fique claramente presente na função evolutiva?

Esse é o nosso desafio final: Uma articulação exequível entre Epistemologia e Didática, subsidiada por dois pontos principais: a diversidade das formas que sempre foi uma preocupação e/ou inspiração pungente para pesquisadores e é alvo de reverberações teóricas - o que nos propiciará a possibilidade de transitar entre o passado e o presente, costurando indagações e rompendo afastamentos; e o caráter sistêmico da biologia como um todo, e por consequência, da biologia evolutiva, que nos obriga a aproximar os níveis biológicos, evidenciando a ação entremeada e recíproca desses

níveis nas especificações biológicas- o que corrobora para inclusão dos conceitos de organismo, gene e ambiente de forma equitativa em nosso texto.

CAPÍTULO 6

A EPISTEMOLOGIA COMO PARTE FUNDAMENTAL DA DIDÁTICA DA BIOLOGIA: CONSIDERAÇÕES SOBRE A ABORDAGEM DA BIOLOGIA EVOLUTIVA E AS CONTRIBUIÇÕES DO GPEB.

Como salientado ao longo do trabalho, a problematização fulcral de nossa pesquisa incide na tentativa de propor uma articulação entre a Epistemologia e a Didática, mais especificamente no que se concerne ao conteúdo da biologia evolutiva. A partir desse tópico do trabalho, esperamos que essa articulação mostre-se tangível e pertinente.

Para que a articulação supracitada fosse possível, três pilares fundamentaram nosso percurso: 1) as características da natureza da Biologia enquanto ciência (conhecimento sistêmico e integrado); 2) a história e filosofia da biologia como subsídio teórico e empírico para transitarmos entre os diferentes contextos de produção de conhecimento, entendendo os distanciamentos e as aproximações desses contextos, bem como os questionamentos que mantiveram-se como axiomas das grandes teorias e paradigmas biológicos e 3) o grupo de pesquisa (GPEB) como espaço formativo a partir do qual pudemos identificar entraves conceituais cujo conteúdo nos forneceu indícios para a elaboração de um texto didático.

A Biologia estuda os organismos vivos, e, especificamente, a origem da vida, a diversidade, os mecanismos de reprodução, as relações intra e interespecíficas, os processos evolutivos, além de inúmeros outros processos biológicos. De uma forma mais comum, podemos afirmar que o objeto de estudo dessa ciência são os seres vivos que diferem da matéria inanimada (CALDEIRA, 2009).

Esse conjunto de características próprias dos seres vivos constitui o objeto de estudo da Biologia. Por meio dessas capacidades peculiarmente biológicas, o conhecimento biológico envolve toda diversidade biológica existente em nosso planeta, bem como as interações intra e interespecíficas e as bióticas e abióticas (CALDEIRA, 2009). Com base nessa breve descrição dos objetos de estudo das Ciências Biológicas, podemos notar a complexidade e amplitude, características dos estudos biológicos.

Se pensarmos no quanto os objetos de estudo dessa ciência aparentam ter funcionalidades distintas e até díspares devido ao distanciamento espacial dos níveis biológicos (célula/gene; organismo e ambiente); jamais pensaríamos na intrincada rede processual em que esses níveis estão envolvidos. Fala-se de uma ciência integrada e

sistêmica, mas constituída por objetos pertencentes a dimensões (macro ou micro) espaciais tão diferentes que essa afirmação parece paradoxal. E esse é o âmago das nossas objeções e reverberações: Se falamos de uma ciência sistêmica, precisamos identificar o que, em termos de conceitos, de objetos biológicos, de processos, permitem que a Biologia seja assim caracterizada. Por que e como o gene, o organismo e o ambiente – todos submetidos ao processo evolutivo – exercem influências determinantes entre si de forma a modificar o todo biológico?

O questionamento acima deveria orientar e/ou fundamentar as questões didáticas e epistemológicas da Biologia, bem como ser conteúdo basal abordado nos cursos de Licenciatura em Ciências Biológicas. Os alunos desse curso deveriam entender essa integração do conhecimento biológico, bem como visualizá-la na ocorrência dos processos de diferentes naturezas (molecular, orgânica ou ecológica). Essa necessária reflexão sobre a maneira que o conhecimento biológico é abordado na Formação Inicial tem suscitado questões de pesquisas e foi o esteio prevalente para a organização do GPEB.

Caldeira (2009) aponta alguns questionamentos consonantes à preocupação elencada acima,

Os alunos concluintes do curso de graduação em Ciências Biológicas que anseiam a pesquisa e/ou ensino como atividade profissional, apreenderam o processo de construção epistemológica da Biologia? São capazes de entender como essa ciência é constituída e como evolui conceitualmente? Exemplificam e versam sobre os obstáculos epistemológicos historicamente superados? Conseguem descrever a natureza desse conhecimento? (CALDEIRA, 2009, p.74).

Essas perguntas são parte de nossa reflexão acerca da estrutura dos cursos de Ciências Biológicas, mais especificamente sobre as áreas da Didática e Epistemologia da Biologia e de quais habilidades do pensar os alunos precisam adquirir para possibilitar uma atuação reflexiva em suas profissões. A Didática e a Epistemologia apresentam-se como áreas de pesquisas potenciais para investigarmos sobre como determinadas habilidades cognitivas podem ser trabalhadas para que a Formação Inicial apresente consistência conceitual e metodológica (CALDEIRA, 2009).

O GPEB tem como premissa basal a abordagem da Biologia tal como ela é constituída enquanto ciência. Assim, os participantes do grupo exercitam o entendimento e/ou visualização das múltiplas facetas e nuances da dimensão conceitual-

com ênfase na trajetória epistêmica- além de refletirem sobre questões de pesquisas referentes à Epistemologia e Didática da Biologia.

Para que o estudante de Ciências Biológicas adentre a área de conhecimento biológico, é preciso do entendimento que a Ciência é tanto uma atividade (aquilo que os cientistas fazem) quanto um corpo de conhecimento (aquilo que os cientistas sabem) (MAYR, 2008, p. 48).

Não obstante a compartimentalização dos conteúdos biológicos, esse entendimento nem sempre acontece facilmente já que os cursos de graduação abordam o que Duschl (2007) denominou de forma final da ciência, ou seja, as disciplinas das áreas biológicas têm como pressupostos científicos o que, atualmente, os pesquisadores de Botânica, Zoologia, Citologia, Fisiologia, Ecologia, entre outros, aceitam para definir seus objetos de estudo (CALDEIRA, 2009).

O GPEB tem como objetivo restituir o viés epistemológico da abordagem didática, elaborando –ao longo das reuniões- e apresentando diferentes formas de apresentação dos conceitos biológicos por meio das representações explicitadas pelo grupo. Assim, o GPEB é um espaço de discussões, a partir do qual, investigamos possibilidades para construção de uma estratégia didática efetiva.

Chevallard (1991) considera transposição didática o trabalho de transformar um objeto de saber em um objeto de ensino. O processo de transposição didática é necessário uma vez que a estrutura e o funcionamento do saber educacional são diferentes da estrutura e funcionamento do saber acadêmico. Um saber a ser ensinado deve, portanto sofrer alterações que o transformem em objeto de ensino. Tais transformações são necessárias para que esse elemento de saber possa ser ensinado. (FRANZOLIN, 2007).

Dessa forma, o GPEB foi, também, um artefato para subsidiar o processo de transposição didática do conceito de evolução biológica na Formação Inicial. A partir das falas dos alunos e das categorias derivadas da análise de conteúdo desses dados, percebemos conteúdos fundamentais que deveriam estar presentes no saber acadêmico- sobre a perspectiva sistêmica e pluralista do processo evolutivo.

Assim, a compilação de uma literatura contemporânea sobre evolução e o trabalho realizado no GPEB forneceram possibilidades e subsídios iniciais para construção de um texto didático cujo conteúdo fora balizado na caracterização sistêmica da epistemologia da Biologia, além de uma abordagem atualizada sobre o conteúdo em questão.

Forquin (1992) considera que a educação escolar não realiza apenas uma seleção de saberes e materiais culturais disponíveis em um determinado momento na sociedade. Para torná-los mais acessíveis e disponíveis para as novas gerações, seria necessária a realização de um escrutinoso trabalho de reorganização, reestruturação- o que procuramos fazer a partir dos compêndios entre diferentes contextos de produção do conhecimento biológico, aproximando as inquietações engendradas desde Darwin, até as ideias mais atuais. A ciência produzida nas áreas científicas específicas (por exemplo, a pesquisa em evolução, em genética, em biologia molecular) não é diretamente comunicável ao aluno, mas necessita da intervenção de dispositivos mediadores (FRANZOLIN, 2007).

O GPEB funciona como um desses dispositivos mediadores um a vez que podemos aproximar o conhecimento produzido nas comunidades científicas aos alunos em Formação Inicial, de forma que as discussões filosóficas contemporâneas atinjam os cursos de Graduação antes de serem inseridas nos livros didáticos.

O conhecimento científico tal como é produzido está subordinado a uma função de mediação didática. Essa mediação didática pode ser realizada, por exemplo, a partir de textos didáticos.

Dessa necessidade de didatização surgem os traços morfológicos e estilísticos característicos dos saberes escolares, como a predominância de valores de apresentação e clarificação, a preocupação da progressividade, a importância atribuída a divisão formal, os comentários explicativos, entre outros (FRANZOLIN, 2007).

Gil Pérez (1993) relata sobre a necessária aproximação das atividades de aprendizagem de conhecimentos científicos à maneira a partir da qual esses conhecimentos são produzidos e/ou construídos, fundamentada, principalmente na compreensão da natureza da ciência e em uma sólida formação teórica. Essa formação sólida dentro de um campo científico específico pode ocorrer por meio da relação entre os pressupostos epistemológicos de um conceito e seus aspectos práticos; articulação que pode ser consolidada pela inserção do indivíduo em grupos de pesquisas.

A formatação do nosso texto enfatizou as vicissitudes filosóficas e epistêmicas que permeiam o conceito de evolução biológica, bem como a necessária inserção de exemplos para que os diferentes contextos de produção e (re) organização dos conceitos científicos sejam assimilados e visualizados pelos alunos. Essa visualização pode ser clarificada se alicerçada em pesquisas empíricas, uma vez que, na maioria das vezes,

não há uma sincronia entre o que é realizado nos laboratórios e a repercussão filosófica dessas pesquisas.

Além disso, no que tange aos objetivos dos cursos de Licenciatura em Ciências Biológicas, a formação como pesquisador e professor deve enfatizar discussões sobre

[...] a natureza do conhecimento e os argumentos principais da filosofia que moldam os questionamentos de diversos paradigmas. De igual importância é a atenção aos contextos éticos, históricos e sociais e as diversas forças que moldam os objetivos e as práticas das pesquisas (PAUL e MARFO, 2001, p. 534).

O grupo de pesquisa facilita a discussão dessa temática, uma vez que tem como preocupação central os aspectos epistemológicos do conhecimento biológico e sua relação com o Ensino de Biologia. Como já mencionado, a ideia de organização do GPEB foi suscitada em consonância a forma que o conhecimento biológico é tratado da Formação Inicial: de maneira fragmentada e reducionista. (FELTZ, 1995; EMMECHE e EL-HANI, 2000; RUIZ-MIRAZO et al, 2000; GUTMANN e NEUMANNHELD, 2000; EL-HANI, 2002).

O suporte teórico do grupo é ancorado em aspectos filosóficos e históricos da Biologia, de forma que a discussão sobre a natureza do conhecimento científico biológico seja o ponto mais relevante nas reflexões prospectadas.

As principais questões que sustentaram a organização do GPEB foram: Qual o papel da seleção natural no processo evolutivo? A seleção natural é responsável, sozinha, por todo processo evolutivo? Existem mecanismos específicos, além da seleção natural para que formas orgânicas inéditas apareçam? A seleção natural pode originar uma forma orgânica rapidamente (prescindido o aparecimento do traço fenotípico em questão ao longo de gerações?) Como o desenvolvimento interfere (ou não) na evolução? Como abordar o conceito de evolução biológica na Formação Inicial de forma sistêmica?

Entendemos que a escolha da Epistemologia da Biologia para subsidiar as discussões do grupo pôde contribuir para: permitir a visualização- por parte dos alunos- da integração de diferentes níveis em um processo biológico; inserção dos alunos em um contexto de pesquisa científica que não é comumente abordado nos cursos de Biologia e que não está relacionada com a visão tradicional de cientista, além de fornecer elementos para a estruturação de um texto didático.

Maldaner (2004) argumenta, a partir de uma análise em grupos de pesquisa formados por alunos de graduação e professores em exercício cujo objetivo foi a

integração de conteúdos, que o acompanhamento das atividades realizadas deixa evidente que o perfil representado pelo grupo vai delineando peculiaridades “preocupações específicas, necessidades de formação, saberes e compreensões” (MALDANER, 2004, p. 08) sobre as problemáticas propostas, além da criação de uma autonomia de pesquisa. Ou seja, propiciam que os participantes formem-se como pesquisadores/ professores.

Assim, o grupo que tem como objetivo realizar discussões e pesquisas em Epistemologia da Biologia e Ensino de Ciências ainda necessita de reflexões sobre sua organização. Desta forma, o levantamento de dados sobre a formação de pesquisadores durante o desenvolvimento do grupo pode trazer considerações significativas que possibilitarão uma organização mais coerente e efetiva para o desenvolvimento das atividades, bem como contribuições para a área de formação de pesquisadores e professores (ANDRADE et al, 2006).

A formação de grupos de pesquisa com alunos de graduação e professores em atuação em cursos de Formação Inicial já apresenta resultados significativos na formação de profissionais da área de ensino. As discussões propostas nos grupos devem contemplar tanto a formação didática e conceitual dos alunos, quanto a sondagem como pesquisador. Como as questões epistêmicas discutidas no grupo podem incitar problemas de pesquisa e fundamentarem a estrutura de um projeto de pesquisa?

A maioria dos alunos, mesmo em um curso de Licenciatura, não sabem como as áreas de Filosofia, Epistemologia e Didática podem apresentar questões potenciais para pesquisa e colaborar com o Ensino de Biologia e com o desenvolvimento do corpo teórico de uma ciência. O grupo, portanto, permite essa reflexão alicerçada nos aspectos da natureza do conhecimento biológico.

Outra questão fundamental para a estrutura do grupo é a investigação de questões sobre o conteúdo biológico que podem corroborar para (re) estruturação dos Cursos de Licenciatura em Ciências Biológicas e inferir (re) organizações curriculares necessárias para uma compreensão sistêmica da Biologia.

As disciplinas que compõem a grade curricular dos cursos de Licenciatura em Ciências Biológicas cumprem a função de apresentar os domínios do conhecimento Biológico e de permitirem que os alunos conheçam o nível de especialização alcançado em cada área específica. No entanto, esse trabalho disciplinar não garante, na maioria das vezes, que os alunos adquiram um nível satisfatório de organização de pensamento (CALDEIRA, 2009,p.83).

Não obstante a essa compartimentalização das disciplinas, é notório que os alunos, não raro, concluem várias disciplinas e, mesmo assim, apresentam dificuldades

ou não são capazes de descrever o conhecimento apreendido. Essa dificuldade pode ser consequência da aprendizagem, pelos alunos, apenas dos conceitos biológicos atuais, o que impossibilita a apreensão da ciência como atividade, mas denota a ideia de que Biologia é resultado da sumarização de um corpo de conhecimentos. Essa concepção de estaticidade do conhecimento não aborda os obstáculos epistemológicos superados (ou não) pela pesquisa e, como a configuração desses obstáculos incide na construção científica e na compreensão do conhecimento (CALDEIRA, 2009).

Essa compreensão sobre os aspectos da natureza da ciência podem estar alicerçados nas problematizações e discussões que não aludem apenas à reprodução e/ou memorização de descrições conceituais. Na formação básica, os alunos dificilmente são incentivados a questionar, discutir e problematizar por meio do conhecimento biológico. Encontramos, em muitas escolas, projetos de estudos sobre temas biológicos ligados às questões sociais. No entanto, esses projetos não são ou necessariamente subjazem espaços de reflexão discente e, na maioria das vezes, os alunos estabelecem ligações superficiais entre conceitos biológicos e os determinantes sociopolíticos, econômicos ou éticos (CALDEIRA, 2009).

A disciplina de Didática poderia ser organizada de maneira a fornecer esse espaço. No entanto, para os licenciandos em Ciências Biológicas, a Didática das Ciências é uma disciplina que não contribui para a prática docente, uma vez que a aprendizagem da docência ocorrerá por meio da prática (LIPPE E BASTOS, 2008). Podemos inferir que essa ideia está ligada a “uma concepção empiricista do fazer científico, bem como à percepção cotidiana do trabalho do professor como algo que se dá centrado em sua própria atuação” (CALDEIRA E BASTOS, 2009, p.).

Aqui há outra problematização relevante a ser explicitada: a ideia de que o “fazer empírico” está estritamente vinculado a realização de atividades práticas: a atuação do professor dentro da sala de aula, a pesquisa desenvolvida dentro do laboratório, os dados analisados quantitativamente. O GPEB pode ser uma forma de apresentar aos alunos a pesquisa qualitativa e como as questões de pesquisa sobre Epistemologia e Didática são desenvolvidas.

Ainda sobre a necessária reflexão sobre a disciplina da Didática, um problema colocado pelos professores que ministram essa disciplina atrela-se à seleção de textos que permitam ao futuro professor uma compreensão adequada desse campo específico do conhecimento. Isso ocorre porque grande parte da literatura disponível ao licenciando nas bibliotecas das universidades é constituída por materiais cujo conteúdo

ênfatiza os temas gerais de educaçãõ (sem referênça aos conteúdos de ensino), ou conhecimentos em determinadas áreas das Ciências Naturais (Zooologia, Genética, Bioquímica, Geologia...). O conteúdo dos textos, portanto, pouco contribuiu para que os licenciandos a construam uma articulação desejável entre as áreas do conhecimento em questão (por exemplo, Educação e Biologia) (CALDEIRA E BASTOS, 2009).

O nosso trabalho ratifica essa falta de materiais ou texto que propiciem essa articulação: Como pensar na natureza da Biologia- descrita de forma sistêmica e integrada- se não há textos que possibilitem aos alunos a visualização nos próprios conceitos biológicos das características descritas?

A Didática das Ciências é uma disciplina cuja fundamentação, ao nosso ver, precisa estar alicerçada em três objetos distintos: os atributos do professor, o processo de transposição do conhecimento e a natureza da ciência. Este último é conteúdo fundamental para o embasamento de uma estratégia didática efetiva. Embora as diferentes ciências apresentem características epistemológicas comuns, cada qual, tem peculiaridades epistemológicas bastante relevantes na estrutura do conhecimento e na sua conseqüente abordagem.

No que concerne ao Ensino de Biologia, encontramos na literatura, críticas referentes a forma de abordagem que, de modo geral, apresenta os conceitos de maneira fragmentada e descontextualizada, colaborando para um ensino memorístico e não sistêmico. (CALDEIRA, 2009).

Neste contexto, a Epistemologia surge como um elemento que permite uma visão contextualizada da produção dos conceitos, a qual nos permite (re) situar alguns pressupostos didáticos. No caso do texto sobre evolução biológica apresentado nos primeiros capítulos, a Epistemologia foi um subsídio fundamental para entendermos porque algumas questões foram retomadas no contexto evolutivo. A partir do percurso epistêmico, podemos transitar entre os contextos de produção do conhecimento, investigando quais questões foram cernes de todo cenário da evolução biológica, o que é mantido e refutado enquanto teoria e/ou paradigma e como podemos fazer uma prospecção para que esse tipo de abordagem esteja inserida na Formação Inicial.

A Epistemologia, portanto, no que se concerne ao potencial didático, pode ser um subsídio para o trânsito entre diferentes contextos históricos da produção do conhecimento científico, auxiliando na compreensão do processo lento e gradativo da construção das Ciências.

Apesar da existência de um consenso quanto a relevante e necessária abordagem histórica e filosófica dos conteúdos da Biologia, há carência de estudos que possibilitem uma avaliação sobre se e como essas perspectivas são efetivamente trabalhadas em sala de aula, e, em quais contextos isso é realizado (CARNEIRO E GASTAL, 2005).

Não basta salientar a necessidade de adoção de uma perspectiva histórica e epistemológica no ensino de Biologia sem a descrição de artefatos e possibilidades para exequibilidade dessa proposta. Assim, se propugnamos a inserção da Epistemologia e História da Biologia sobre a perspectiva reiterada ao longo deste trabalho, faz-se necessário, também, que repensemos os cursos de Formação Inicial e Continuada de professores. Essa reflexão implica ainda um esforço concentrado na produção de materiais curriculares que possam fornecer aos professores indicadores a respeito de como trabalhar esta abordagem em suas aulas (CARNEIRO E GASTAL, 2005). E, a partir de nosso texto- que será apresentado no tópico seguinte- pretendemos subsidiar parte dessa questão.

Entendemos que trabalhar com esta abordagem histórica no ensino de Biologia não significa demonstrar uma filiação contínua na construção do conhecimento, pois as teorias atuais não são necessariamente decorrentes das anteriores. Acreditamos que uma abordagem histórica deveria centrar-se nas rupturas ou (re) ordenações epistemológicas (CARNEIRO E GASTAL, 2005, p.).

O esteio teórico de todo desenvolvimento de nosso trabalho foi pleiteado por uma descrição teórico-epistemológica dos conceitos biológicos: a natureza sistêmica e integrada desses conceitos e a inviabilidade de reducionismos processuais na Biologia. Dessa forma, é necessário, que a epistemologia seja incluída nos pressupostos didáticos da Biologia.

No entanto, a Didática na concepção dos próprios alunos licenciandos em Ciências Biológicas é concebida ou associada a um conjunto de técnicas adequadas ao bom professor; a disciplina que, a partir de uma compilação teórica de termos e estratégias possibilitará que os alunos aprendam a ensinar (CALDEIRA E BASTOS, 2009). Essa concepção distancia-se da proposta de Didática como uma disciplina que permite uma reflexão da própria ciência em questão: que elementos são característicos da Biologia e dos conceitos biológicos e como essa caracterização será mencionada na sala de aula? Como a natureza da Biologia interfere nas configurações Didáticas dessa disciplina?

Fica evidente, a partir de toda leitura, que para nós, a dimensão epistemológica é parte fulcral das especificações didáticas. Nesse sentido, o GPEB forneceu um espaço formativo em que a natureza da Biologia pôde ser refletida pelos alunos, a partir de discussões teóricas e então, a partir dessas discussões, suscitar apontamentos de inserção didática.

Precisamos caminhar para elaboração de subsídios e/ou estratégias didáticas cujo escopo seja a estruturação de uma didática específica da Biologia- unindo a perspectiva epistemológica às questões didáticas – a natureza específica da ciência em questão precisa estar evidente.

O assunto selecionado para o desenvolvimento do trabalho no GPEB foi a evolução biológica. Para organizar nossas discussões, estabelecemos um eixo central a partir do qual, toda problematização seria originada.

Esse eixo precisaria contemplar os principais elementos reiterados no referencial teórico do trabalho: a história e epistemologia da Biologia, a natureza da Biologia e ter potencial para ser explorado didaticamente. Dessa forma, pensamos em um questionamento que fora uma preocupação constante e pungente nos contextos evolutivos mencionados: o Darwinismo, a Teoria Sintética e a Biologia Evolutiva Contemporânea.

Mesmo que explicada a partir de argumentos distintos, precisaríamos de uma questão que nos permitisse transitar epistemologicamente por esses contextos, expondo as problematizações e ideias vinculados a mesma, sem desprestigiar ou sucumbir com qualquer um deles. Em relação ao potencial didático, essa questão nortearia a elaboração de diagramas didáticos cujo conteúdo representaria as ideias conceituais obtidas no GPEB.

Com base nos pressupostos acima, o eixo de organização do percurso teórico que pleiteou o desenvolvimento do GPEB foi a “diversidade de formas orgânicas”.

A partir da escolha desse eixo, algumas questões de problematização foram então derivadas:

1-Quais os mecanismos são responsáveis pela origem de tamanha diversidade?

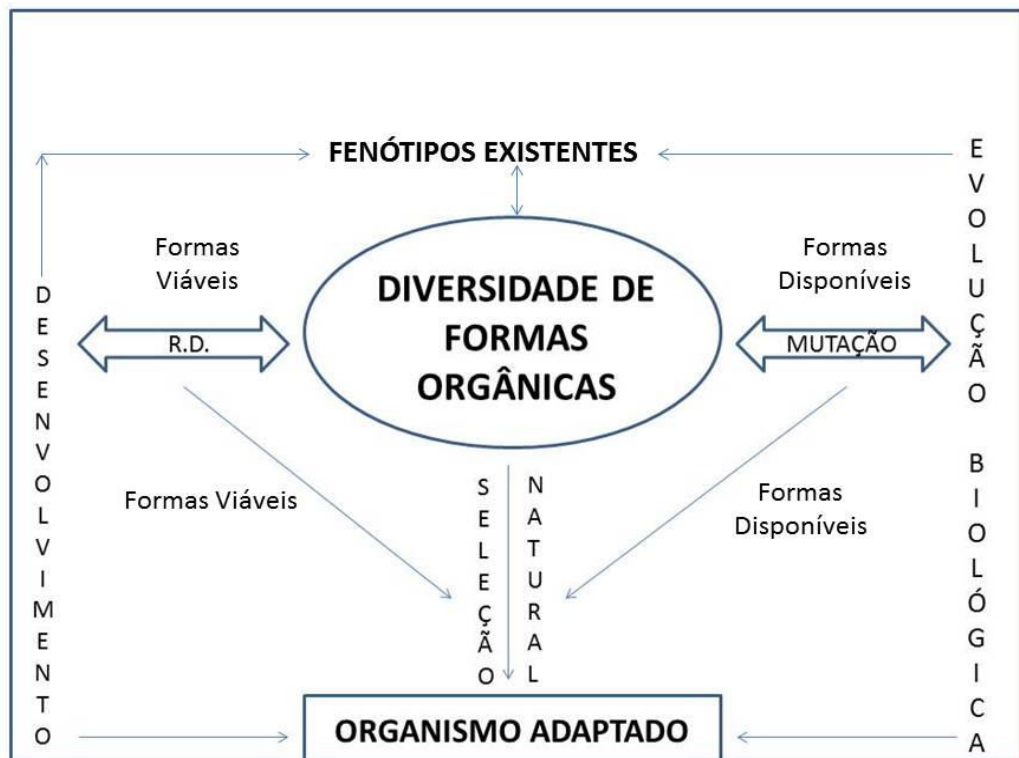
2- Existem mecanismos distintos para cada forma orgânica inédita que é originada? Por exemplo, para cada forma orgânica distinta, faz-se necessário a existência de uma sequência de nucleotídeos diferente?

3- A evolução gera qualquer/ todo tipo de variedade orgânica? (considerando que algumas já foram extintas).

4- A seleção natural “cria” toda essa variedade?

5- Existe diferença entre criações graduais (alterações nas frequências gênicas das populações ao longo do tempo evolutivo) e criações repentinas? (uma forma orgânica que fora criada a partir de mecanismos existentes e que independem do gradualismo?).

Pensar na ubiquidade de formas orgânicas existentes foi o início de nossas inquietações, uma vez que, em um primeiro momento, pareceria inviável existirem tantos processos distintos quanto formas orgânicas. E então, como essas “infinitas formas de grande beleza” poderiam, realmente, ter se originado? Em um primeiro momento o seguinte esquema possibilitou a organização do nosso pensamento:



RD= Restrição do Desenvolvimento.

O diagrama acima procurou organizar alguns conceitos fundamentais envolvidos no processo de evolução biológica, especificamente se quisermos entender a questão da diversidade de formas orgânicas existentes.

Uma questão abordada no GPEB, originada a partir desse esquema foi “Podemos dizer que os organismos estão perfeitamente adaptados a seus ambientes?”.

A problematização envolvida nessa questão está relacionada com a relação entre as restrições impostas pela ontogenia e as possíveis formas orgânicas que não chegam a ser concebidas e, portanto a seleção natural não chega a atuar.

No entanto, na mesma medida em que o desenvolvimento restringe a origem de determinadas formas, ele também é o processo que produz inovações repentinas na forma orgânica. Assim, o desenvolvimento limita as possibilidades de variação das características presentes em uma população e, por conseguinte, a ação da seleção natural na medida em que esta depende da disponibilidade de variação populacional. Essas restrições ocorrem porque o desenvolvimento não é um processo infinitamente plástico, mas um processo muito complexo de produção de forma (morfogênese) a partir de um sistema intrincado de interações celulares e moleculares.

Trata-se, além disso, de um processo no qual a sincronização e a diferenciação espacial e temporal de eventos são muito importantes, de tal maneira que muitas etapas do processo devem ocorrer em uma sequência específica para que determinada forma orgânica seja construída.

Assim, as ocorrências evolutivas são restritas àquelas que podem ocorrer como consequência de mudanças no desenvolvimento, que tornam disponíveis variações na forma orgânica com as quais trabalha, por assim dizer, a seleção natural. Isso pode explicar por que certas variedades de formas vivas não são encontradas, como, por exemplo, mamíferos com seis patas, em vez de quatro: o padrão tetrápode evoluiu há muito tempo na linhagem dos vertebrados e o modo como esses animais se desenvolvem dificulta inovações nesse padrão, cuja via de desenvolvimento foi herdada de ancestrais remotos.

O exemplo sobre o gene que expressa o pescoço do ganso e ausência dessa forma anatômica nas cobras elucidam essa possibilidade de como o desenvolvimento “cria” formas diferentes de uma maneira repentina.

- O que explica a variedade das formas vivas?

A evolução e o desenvolvimento são processos que se influenciam mutuamente: a evolução modifica o desenvolvimento (o desenvolvimento evolui!) e o desenvolvimento influencia o curso da evolução, na medida em que, no caso dos organismos multicelulares, ele é o processo responsável pela produção da forma orgânica e, assim, de qualquer inovação morfológica que observemos em tais organismos.

A relação entre evolução e desenvolvimento é complexa: Enquanto a evolução modifica o desenvolvimento (o desenvolvimento também evolui!), o desenvolvimento restringe as possibilidades da evolução. Então é como se considerássemos duas etapas: as formas viáveis e, portanto disponíveis para atuação da seleção natural, são viáveis pois são decorrentes de um processo de desenvolvimento determinado. (nesse sentido a seleção natural não opera antes das restrições do desenvolvimento). (ALMEIDA E EL-HANI, 2010).

Essa relação pode ser compreendida a partir do seguinte exemplo: O que possibilitou a origem dos organismos multicelulares?

Em um primeiro momento, podemos pensar que o desenvolvimento não tornava viável planos corporais com mais de uma célula, e que, portanto isso era uma restrição. Assim, a seleção natural atuava em organismos unicelulares apenas.

Quando as condições ambientais mudaram, e o aumento da concentração de íons Ca^{++} aumentou no ambiente, a caderina- que já existia antes do aumento da concentração desse elemento- passou a promover a adesão entre as células. Essa possibilidade engendrou um novo padrão orgânico: organismos com mais de uma célula e então, forneceu esse padrão orgânico para atuação da seleção natural. Caso a adesão entre as células não fosse naturalmente selecionado, os organismos pluricelulares não seriam mantidos na população ao longo da gerações e teria a sua frequência diminuída ao longo do tempo evolutivo.

Esse exemplo elucidada uma evolução no processo de desenvolvimento, que antes, estava restrito apenas aos fenótipos originados em organismos unicelulares. Dessa forma, houve um aumento no "rol" de possibilidades nos quais a seleção natural pode atuar (uma vez que mesmo que a mudança ambiental promovesse uma nova ação à caderina, isso poderia ser inviável em termos de desenvolvimento e então, a seleção natural nem chegaria a atuar em organismos pluricelulares).

De forma resumida: primeiro determinado fenótipo é concebido em termos de desenvolvimento- os organismos pluricelulares- e só depois que a seleção natural passar a atuar nessa característica. Assim, a seleção passou a atuar os organismos pluricelulares foram mantidos no meio por resistirem Às pressões seletivas (seja pela facilidade metabólica, seja pela morfologia, seja pela maior facilidade de competir, etc.).

Outras questões que direcionaram as discussões do GPEB foram
-Por meio de qual (is) mecanismo(os) a evolução biológica pode ocorrer? (tanto em níveis micro quanto macroevolutivos)?

- É possível tratar a seleção natural como mecanismo único por meio do qual a evolução biológica ocorre?

- A seleção natural explica todos os fenômenos evolutivos? Ou outros mecanismos são necessários para a construção de tal explicação, lado a lado com a seleção? (2) as grandes mudanças que vemos na história da vida (que são chamadas de “macroevolução”) podem ser explicadas apenas a partir da ação da seleção natural dentro das populações (o que chamamos de “microevolução”)?

As discussões engendradas no GPEB foram fundamentais para que pudéssemos entender a organização do pensamento biológico dos alunos referente a evolução, bem como enxergar a relação entre as ideias expressadas pelos participantes.

Para que essa organização ficasse mais clara, estruturamos diagramas representativos.

Os diagramas como subsídios para as representações conceituais do GPEB.

Para que pudéssemos expor as representações conceituais engendradas no GPEB, construímos diagramas conceituais, a partir dos quais, iremos discutir a evolução teórico-conceitual dos alunos participantes do grupo de pesquisa.

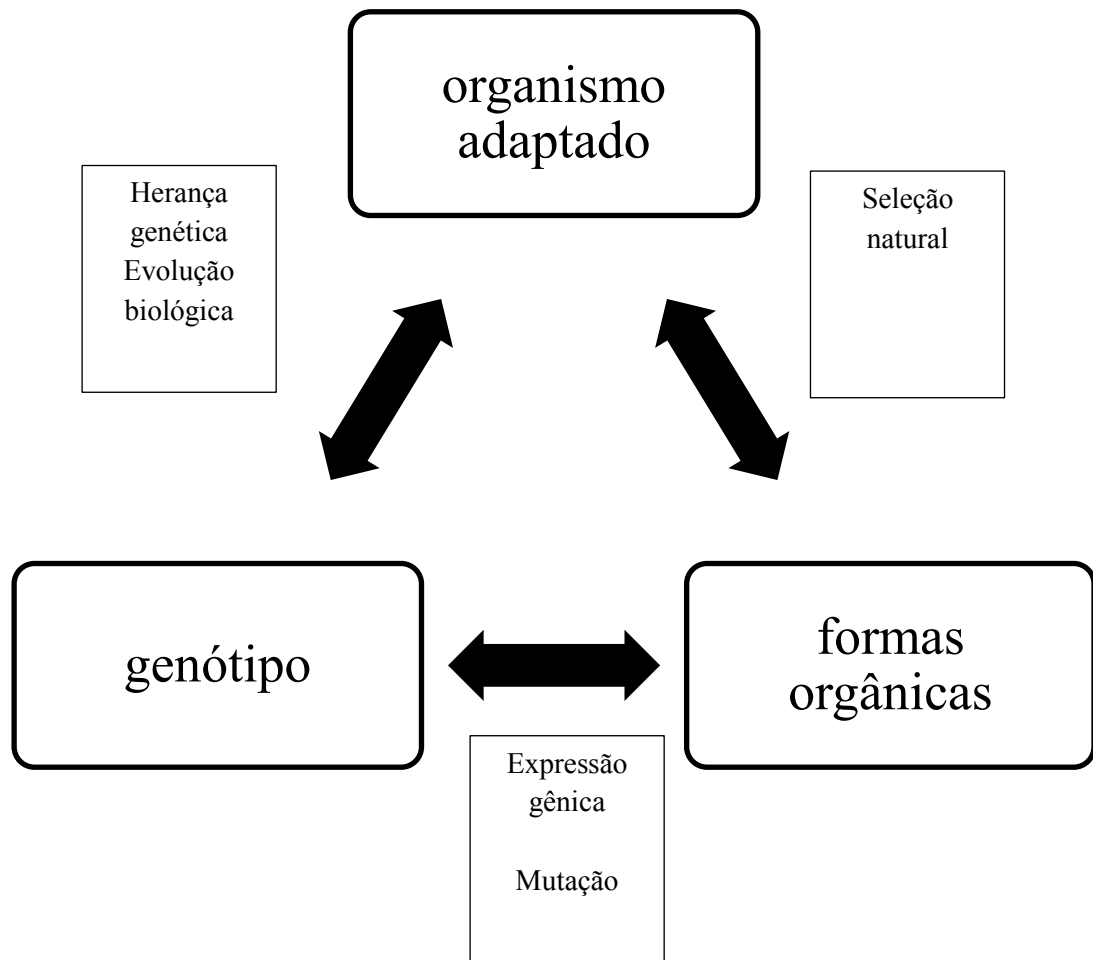
Elaboramos diagramas que possam representar as concepções dos alunos em diferentes momentos do GPEB. A partir desses diagramas, podemos entender como a organização do pensamento biológico referente à evolução foi evoluindo ao longo das discussões propostas e então, (re) pensar em estratégias didáticas para o Ensino de Evolução.

Os diagramas foram elaborados com base nas transcrições das reuniões e na análise de conteúdo realizada nas falas dos alunos.

É de fundamental relevância apontar que a ideia das formas orgânicas orientou a elaboração dos diagramas. Eleger um conceito para que as derivações conceituais e epistemológicas sejam realizadas facilita a organização do pensamento e a articulação com as estratégias didáticas.

É oportuno ressaltar que nos três diagramas, os vértices do triângulo correspondem aos mesmos conceitos respectivamente: genótipo (potencialidade); formas orgânicas existentes (confronto) e organismos adaptados (continuidade). No entanto, o ponto fundamental de significação desses diagramas e da continuidade gerada pelo processo evolutivo está nos processos que ligam esses conceitos e que se apresentam de forma diferente em cada diagrama.

Diagrama 1- Perspectiva Genética.



O primeiro diagrama representa a concepção apresentada pelos integrantes do grupo na primeira reunião.

O primeiro vértice é representado pelo genótipo, visto que é nele que reside a potencialidade para a origem das formas orgânicas. No entanto, nem todo genótipo é expresso na forma de produto funcional e/ou fenotípico. Para os alunos, essa afirmação é lastreada no fato de que alguns genes não são expressos e outros tem sua expressão alterada pela ocorrência de mutações. Assim, em um primeiro momento, apenas esses dois fatores são apontados como agentes de mediação entre a expressão gênica e as formas orgânicas existentes.

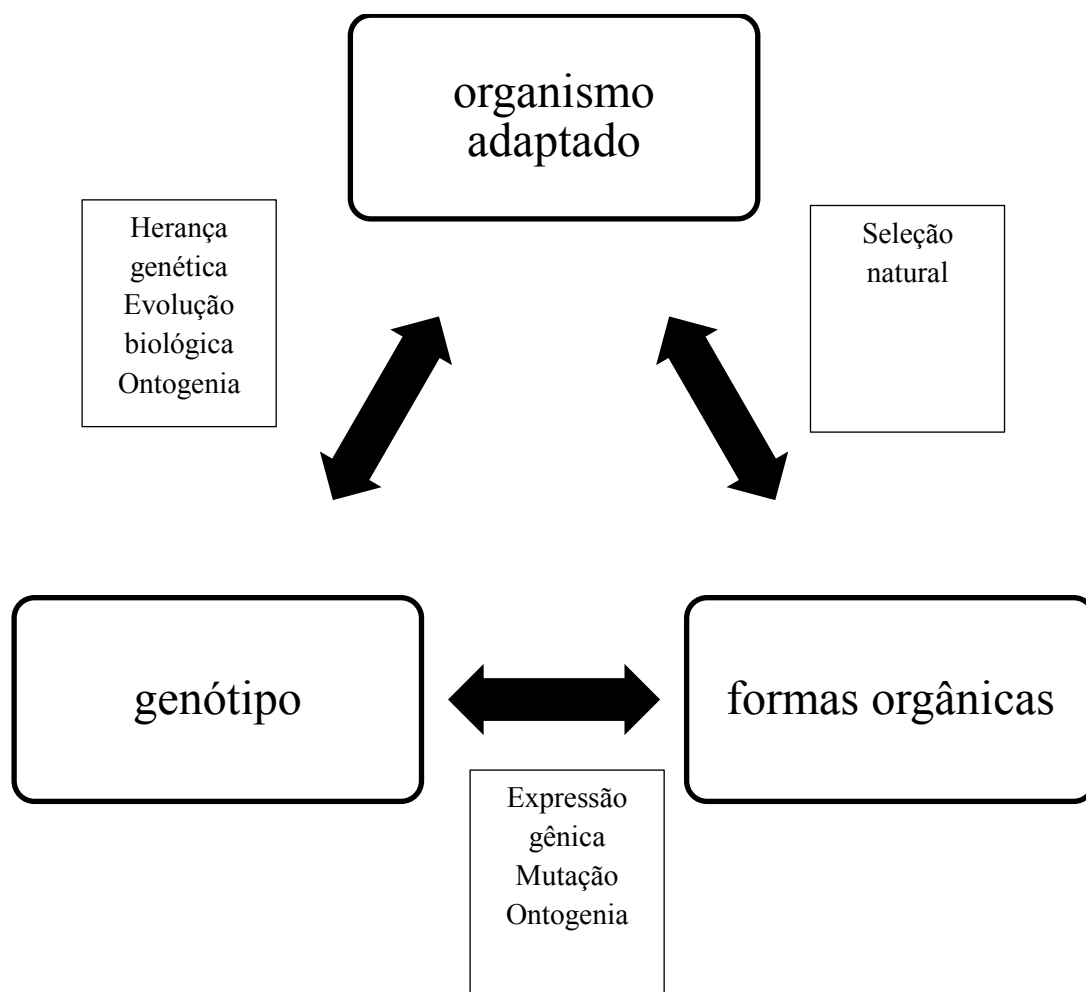
O segundo vértice é representado pelas formas orgânicas existentes já que há um confronto entre todo potencial apresentado pelo genótipo e o que é, de fato, expresso. Esse confronto- mediado nesse primeiro momento pelas mutações e por genes não codificantes- é que resulta nas formas orgânicas.

O terceiro vértice é representado pelo organismo adaptado, uma vez que nem todas as formas orgânicas são mantidas na população. O rol das formas orgânicas existentes representa a variabilidade na qual a seleção natural poderá atuar para então, a partir de diferentes pressões seletivas, associadas a diferentes momentos evolutivos, possa propiciar a existência de organismos adaptados. No entanto, esses organismos, como já discutido, só estão adaptados a determinado momento evolutivo, já que a evolução é um processo contínuo e modificado pela própria ação dos organismos, até mesmo ao longo do processo de resposta às pressões seletivas.

Assim, um organismo adaptado gera um novo “momento” potencial no processo evolutivo, já que esse organismo será submetido a diferentes e diversas pressões seletivas e, então, não há previsibilidade acerca do padrão de herança genética que será herdado pelos organismos e acarretará na existência de um novo (ou não) genótipo que volta a gerar uma nova (ou não) potencialidade para o ciclo evolutivo. Nesse primeiro diagrama a herança mencionada pelos alunos está alicerçada apenas na bagagem genética.

Com base no diagrama e na explicação dessa ferramenta, podemos perceber que, em um primeiro momento, as representações do GPEB estão, forte e explicitamente, arraigadas apenas na perspectiva molecular.

Diagrama 2- Perspectivas Genética e Ontogenética.



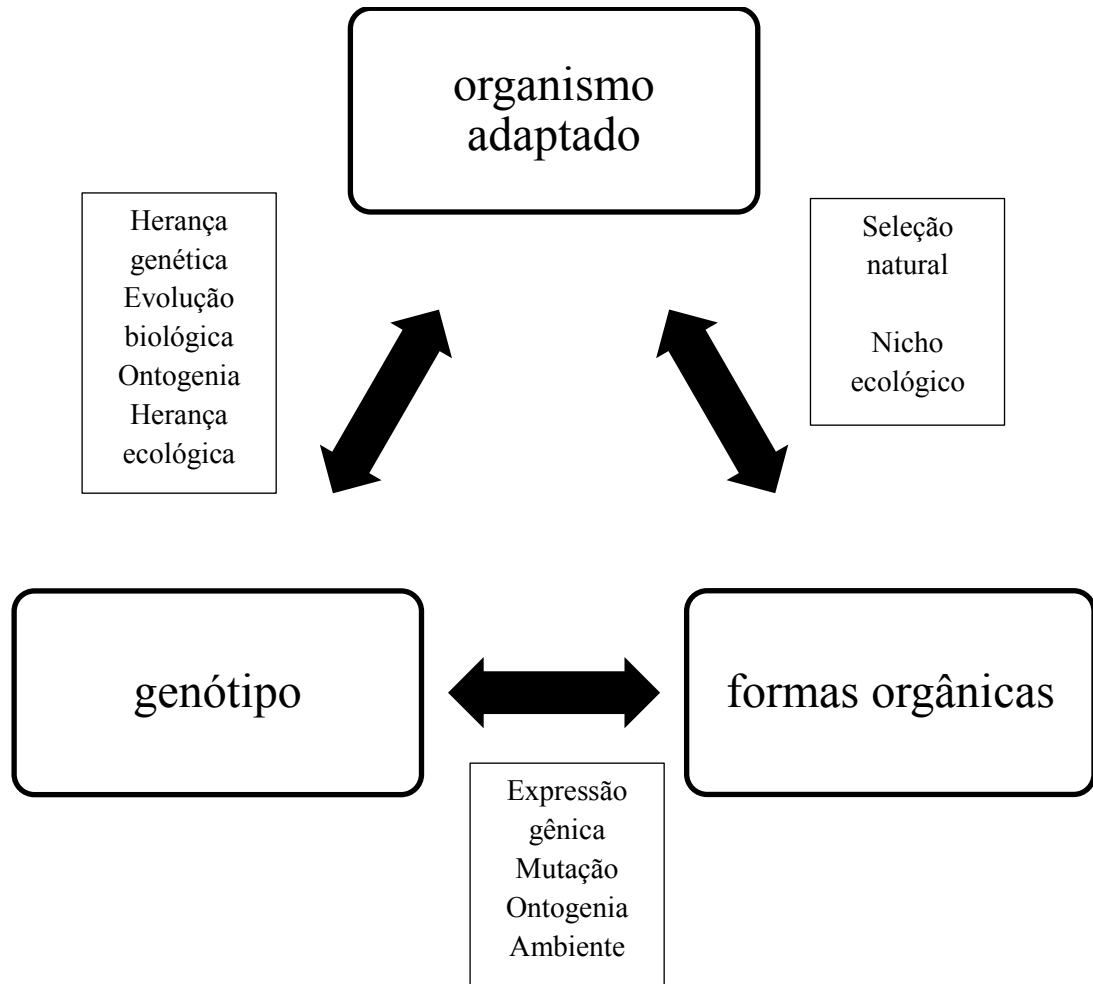
No segundo diagrama, além da mutação, acrescenta-se o desenvolvimento como processo que interfere (mesmo que neutramente, em alguns casos) entre o genótipo e as formas orgânicas existentes. Assim, a expressão fenotípica está mediada não só pela mutação, mas também, pela ontogenia. Aqui, há uma mudança na concepção do GPEB já que os alunos entendem que nem todo genótipo pode ser expresso, pois algumas formas não são concebidas em termos de desenvolvimento e ainda a mesma sequência gênica, se expressa em momentos distintos da ontogenia poderá gerar fenótipos distintos.

A ontogenia também aparece como um processo que intervém entre o organismo adaptado e o genótipo. Assim, além da herança genética, fala-se sobre a herança de um padrão de desenvolvimento.

Nesse segundo diagrama, podemos perceber a presença de outra dimensão- além da genética- representada pelo grupo: a ontogenética. Assim, após as discussões, a

concepção sobre o processo de evolução biológica passa a contemplar duas perspectivas biológicas: a genética e a ontogenética.

Diagrama 3- Perspectivas Genética, Ontogenética e Ecológica.



O terceiro diagrama, representado pelas falas dos alunos na última reunião, inclui o ambiente e a perspectiva ecológica. É interessante notar que o ambiente aparece entre o potencial (genótipo) e o confronto (formas orgânicas) como um elemento que pode interferir na expressão gênica (por isso o confronto).

A seleção natural, mencionada em diversos contextos pelos alunos, aparece no terceiro diagrama junto com o conceito de nicho ecológico, ambos entre as formas orgânicas e o organismo adaptado. Assim, as pressões seletivas estão associadas, também as caracterizações do nicho ecológico de cada espécie, o que interfere na adaptação dos organismos.

Entre o organismo adaptado e o genótipo aparece, além da herança genética e do desenvolvimento, a herança ecológica, exemplificando as três dimensões que entremeiam-se para que o processo evolutivo ocorra.

Esses diagramas, embora tratados como um subsídio para a representação das concepções do GPEB podem ser objetos de formulações didáticas, cujo pano de fundo seja o referencial teórico da semiótica. A partir dos diagramas, podemos discutir sobre a necessária abordagem sistêmica da Biologia e visualizar como a compreensão dos alunos modifica-se na medida em que discussões sobre a biologia evolutiva contemporânea são propostas.

Talvez, mostrar, pelos próprios diagramas que a primeira concepção apresentada é restrita ao nível de processo genético seja uma forma de explorar as demais compreensões e de balizar estratégias didáticas. A utilização desses diagramas pode ser um caminho didático para que as concepções sejam apreendidas pelos alunos de forma gradual (até que a perspectiva sistêmica seja abordada).

Podemos, a partir de então, apontarmos alguns recursos que auxiliaram a aproximação entre a Epistemologia e a Didática: a) escolha e problematização de um tema (que nesse caso foi trabalhado no GPEB); b) a partir do tema escolhido, determinar um conceito ou ideia como axioma da trajetória teórica a ser traçada, de forma que esse conceito gere indagações plausíveis em diferentes contextos epistêmicos e mantenha-se como uma questão de pesquisa nos diferentes contextos de produção científica (formas orgânicas existentes); c) Escolha de conceitos que geraram problematizações durante as discussões propostas (nesse caso organismo adaptado); d) elaboração de diagramas com base nos conceitos identificados nos itens anteriores.

CAPÍTULO 7

GENE, ORGANISMO E AMBIENTE: AS INTERAÇÕES QUE RESPONDEM A NOSSA PERGUNTA INICIAL: “COMO A EVOLUÇÃO FORJOU A GRANDE QUANTIDADE DE CRIATURAS QUE HABITAM O NOSSO PLANETA”?

Se elegemos a questão das formas orgânicas como eixo de orientação para o desenvolvimento de toda arguição epistêmica apresentada no trabalho, inferimos que a forma mais coerente de finalizá-lo seria descrevermos parte dos mecanismos, aparentemente ignorados ou ocultos (por estarem resguardados entre as interações gene-organismo e ambiente), que podem gerar diversidade fenotípica e então, entendermos o sentido atribuído ao verbo “forjar” na pergunta acima. Por que a perspectiva genético-molecular, sozinha, não é suficiente para explicar toda origem da diversidade?

Se pensarmos nos mecanismos moleculares que podem gerar variação, não seria tendencioso, atribuímos unicamente a esses mecanismos o resultado de todas as formas orgânicas existentes?

A mutação, por exemplo, é um mecanismo fundamental para existência de variabilidade. Ela possibilita o surgimento de novas sequências nucleotídicas (em se tratando de aneuploidias: deleção, inversão ou translocação) ou ainda de novos conjuntos genômicos quando altera o número n de cromossomos que não existiam anteriormente (JUNQUEIRA E CARNEIRO, 2012).

A recombinação gênica, embora não produza genes inéditos, permite que novas combinações de genes sejam geradas a partir dos já existentes. Três mecanismos podem promover essa recombinação: a segregação independente na meiose, a fecundação e o crossing-over (JUNQUEIRA E CARNEIRO, 2012).

Na meiose apenas um cromossomo de cada par vai para o gameta. Assim, podem ser formados vários tipos de gametas, cada qual com uma combinação diferente de cromossomos maternos e paternos (JUNQUEIRA E CARNEIRO, 2012).

Em um indivíduo em que $2N= 6$ (3 pares de cromossomos homólogos), há quatro possibilidades de segregação. Assim, podem ser formados 8 tipos de gametas diferentes (2^3).

Na espécie humana, por exemplo, há 23 pares de cromossomos na célula diploide. Isso significa que pode haver 2^{23} tipos de gametas, ou seja, 8 388 608 tipos! Como esse raciocínio vale para o homem e para a mulher (uma vez que o número diploide da espécie é restituído pela fecundação), um casal poderia originar, a partir da fecundação, $8\ 388\ 608^2$ encontros gaméticos diferentes, ou seja, aproximadamente 70

trilhões de tipo de filhos geneticamente distintos. Assim, fica fácil entender porque dois irmãos, apesar de serem filhos dos mesmos pais, são geneticamente únicos e podem, às vezes, não ser nada semelhantes (JUNQUEIRA E CARNEIRO, 2102).

Se aplicarmos esse raciocínio para as diferentes espécies existentes- de acordo com número diploide peculiar de cada espécie, perceberíamos que essa possibilidade de variedade genética existe- mesmo que em maior ou menor número- em todas as espécies.

A partir disso, pode parecer que o âmbito dos processos genético-moleculares é capaz de gerar e explicar toda diversidade existente! Por isso precisamos estar atentos para não cairmos em reducionismos explicativos. É fato que a perspectiva genética contribui para a profusão das formas orgânicas existentes. No entanto, a partir da interação com o nível ontogenético (organismo) e ecológico (ambiente), podemos entender como a abordagem integrada é uma das chaves que explica o sentido atribuído ao verbo “forjar” no questionamento acima.

Como as perspectivas genética, organísmica e ecológica, atuando de forma sincrônica, podem fornecer esteios para explicarmos tamanha diversidade orgânica?

Voltemos no exemplo apresentado no primeiro capítulo:

Estudos do desenvolvimento dos vertebrados revelaram que há um gene (chamado de *Hoxc6*), que é expresso na coluna vertebral. A fronteira de sua expressão na coluna sinaliza onde deverá ocorrer a transição entre vértebras cervicais e torácicas. Portanto, a origem de um plano corporal com um pescoço mais longo ou curto pode ser produzida pelo deslocamento da região em que o gene *Hoxc6* é expresso. As cobras representam um caso extremo: a região de expressão do *Hoxc6* foi tão deslocada anteriormente (em direção à cabeça) que nem há formação de vértebras cervicais: seu corpo longo resulta de perda do pescoço e aumento do tórax. É importante notar que o gene *Hoxc6* é muito semelhante em cobras e gansos. O que muda é a região em que ele é expresso e isso ocorreu porque os interruptores que o regulam mudaram ao longo da evolução. Em cobras, o interruptor só é acionado nas vértebras perto da cabeça. Já em gansos, ele é expresso longe da cabeça e o pescoço se estende até a 22ª vértebra (EL-HANI & MEYER, 2009, p. 03).

Nesse exemplo percebemos o gene e a subjacente expressão gênica como um elemento contexto-dependente. Os mecanismos de expressão gênica não podem estar atrelados a contextos únicos de ação.

Os genes que regulam o desenvolvimento têm sido repetidamente reaproveitados ao longo da evolução, em um caso notável de bricolagem, sendo expressos nos embriões em tempos e espaços distintos, o que muda a sincronização ou diferenciação

espacial e temporal dos processos de desenvolvimento e pode acarretar e/ou possibilitar mudanças radicais na formação das estruturas orgânicas (ALMEIDA; EL-HANI, 2010). Mas que processos levariam a mudança no fenótipo?

O ambiente como um agente normal na produção de fenótipos.

Um único genótipo pode produzir muitos fenótipos, dependendo das muitas contingências encontradas durante o desenvolvimento. Por isso, o fenótipo é o resultado de complexos eventos do processo de desenvolvimento que são influenciados tanto pelos fatores ambientais quanto pelos genes (NIJHOUT, 1999).

Imagine um jovem organismo aquático desenvolvido em uma lagoa específica. Estes organismos são sensíveis aos produtos bioquímicos solúveis na água- liberados pela saliva ou urina dos seus principais predadores. Na presença desses sinais, o padrão de desenvolvimento do organismo é alterado e resulta em um fenótipo que minimiza a probabilidade de predação. Quando as lavras de libélula estão presentes, os girinos *Hyla chrysoscelis* e *H. versicolor* - suas presas- desenvolvem caudas vermelhas brilhantes, as quais desviam a atenção dos predadores e um conjunto de músculos do tronco que possibilita a eles uma locomoção mais ágil para escapar dos predadores (SCOTT E DAVID, 2009).



Presença de predador

Ausência de predador

Fig. 1- Diferença fenotípica da *Hyla chrysoscelis* em polifenismo induzido pela presença de predador.

Imagine um organismo que desenvolve fenótipos diferentes dependendo da estação. A larva da *Nemoria arizonaria* eclodida em árvore de carvalho na primavera tem uma forma que, notavelmente, mistura-se com as flores de carvalho jovens. No entanto, as lagartas que eclodem no verão ficariam muito conspícuas se elas parecessem com as flores de carvalho. Dessa forma, as lagartas do verão assemelham-se aos galhos recentemente formados. Nesse exemplo, é a alimentação da larva que determina o fenótipo. Larvas que se alimentam de folhas de carvalho jovens irão parecer os “amentos”, enquanto a larva que se alimentar de folhas velhas (cuja composição química é diferente) irá desenvolver-se de forma semelhante aos galhos (GILBET E EPEL, 2009).



Morfologia na primavera

Morfologia no verão

Fig. 2- *Nemoria arizonaria* na primavera assemelhando-se as flores de carvalho e no verão, assemelhando-se a jovens galhos, em decorrência de polifenismo induzido pela estação.

As alterações no ambiente podem resultar no desenvolvimento de fenótipos completamente diferentes em indivíduos da mesma casta. E como vimos nos exemplos acima, diferentes fatores ambientais podem suscitar mudanças fenotípicas no padrão do desenvolvimento (presença de predador; mudança de estação).

Agora, imagine um organismo em que o sexo não é determinado pelos cromossomos, mas a partir das situações ambientais que o embrião experiencia durante momentos específicos de seu desenvolvimento. Em muitas espécies de peixes, tartarugas e lagartos, o sexo é determinado pela temperatura da incubação. O mesmo ovo colocado em uma temperatura será fêmea, mas em outra temperatura, será macho. O peixe *Thalassoma bifasciatum* da cabeça azul— um peixe dos recifes do Caribe— é uma das várias espécies de peixes cuja determinação do sexo está relacionada com o local do encontro com o outro peixe (GILBET E EPEL, 2009).

Quando um peixe imaturo alcança um recife onde um único macho vive e defende um território com muitas fêmeas, o recém-chegado desenvolve-se em uma fêmea. Se o mesmo peixe imaturo alcançar um recife que não está sendo defendido por um macho, ele se desenvolverá em um macho. Se o macho que defende o território morrer, uma das fêmeas (normalmente a maior) torna-se macho: dentro de um dia, seus ovários encolhem e testículos crescem (GILBET E EPEL, 2009). Essa plasticidade é uma parte normal do desenvolvimento.

Em cada uma das circunstâncias, o ambiente tem um efeito profundo no fenótipo do animal. Em outras palavras, tudo que é necessário para um fenótipo não está empacotado no ovo fertilizado. Essa habilidade de um único indivíduo desenvolver —se em mais de um fenótipo é chamada plasticidade fenotípica e mostra que diferentes

condições ambientais produzem diferentes fenótipos durante o desenvolvimento normal. Atualmente, a plasticidade fenotípica é definida como a habilidade do organismo de reagir ao ambiente com uma mudança na forma, estado, movimento ou taxa de atividade. Essa plasticidade é uma propriedade do traço, não do indivíduo; de fato, a maioria dos indivíduos tem vários traços plásticos. Quando visto em estágios embrionários ou larvais de animais ou plantas, a plasticidade fenotípica é frequentemente referida como plasticidade desenvolvimental (GILBET E EPEL, 2009).

A ideia proposta nos exemplos anteriores é que o ambiente não é um mero filtro que seleciona as variações existentes. Ao contrário, o ambiente é uma fonte de variação. O ambiente contém sinais que podem induzir o desenvolvimento do organismo a produzir um fenótipo que aumentará o seu “fitness” em um ambiente particular. No entanto, esta não é a visão da vida comumente apresentadas nos livros textos atuais ou nas apresentações populares da Biologia (GILBET E EPEL, 2009).

Desde a Segunda Guerra Mundial, o paradigma dominante para explicar a biodiversidade tem sido o genético. Ernest Mayr, François Jacob e outros inúmeros biólogos influentes tem enfatizado o gene como sendo o núcleo da identidade animal e a principal molécula da vida. James Watson (1989) reivindicou que “nós costumávamos pensar que nosso destino estava nas estrelas. Agora, nós sabemos em grande medida, que nosso destino está em nossos genes” (GILBET E EPEL, 2009).

No seu livro popular “O gene egoísta”, Richard Dawkins (1976) escreveu sobre o genoma como o livro da vida e propôs que nossos corpos são meros veículos transitórios para sobrevivência e propagação do nosso DNA imortal. Em 1995, Nelkin e Lindee revisaram publicações científicas e populares sobre o DNA e concluíram que essa molécula está sendo concebida como o equivalente secular da alma (GILBET E EPEL, 2009).

Mas, como exemplificado, os genes e a alteração da frequência gênicas nas populações como resultado de processos seletivos não são a única explicação para a diversidade animal.

A origem das bactérias, das algas, dos paramécios, das esponjas, dos peixes, dos mamíferos, do Homem [...] teve, como causa, a simples atuação de taxas de sobrevivência e de reprodução diferenciais? Só isto teria realmente criado todo o mundo vivo? Não tendo “intenções” a longo prazo e possuindo apenas “intenções” adaptativas, como pôde a seleção natural construir um mundo vivo cheio de direções e de criações de novos órgãos e novas funções? (FREIRE-MAIA, 1988, p.132)

ECO-DEVO E A PLASTICIDADE DO DESENVOLVIMENTO

A Biologia ecológica do desenvolvimento casualmente conhecida como eco-devo é uma abordagem do desenvolvimento embrionário que estuda interações entre o desenvolvimento dos organismos e seu ambiente. Essa área de estudo refere-se à maneira como os animais evoluíram para integrar os sinais do ambiente à trajetória normal de seu desenvolvimento. Em muitos casos, eco-devo é uma extensão da embriologia para níveis acima do indivíduo (GILBET E EPEL, 2009).

A partir dessa definição, percebe-se que a ocorrência do desenvolvimento vincula-se não só a processos internos ao organismo, mas, também às condições do meio que podem alterar a forma de expressão dos processos de expressão fenotípica.

Na embriologia padrão, o foco das pesquisas e abordagens teóricas tem sido acerca da dinâmica interna por meio da qual os genes do núcleo das células de um indivíduo produz o fenótipo do organismo. A partir do século passado, descobriu-se que a comunicação entre as células é a chave desse fenômeno (GILBET E EPEL, 2009).

Sozinha, a informação genética contida no núcleo das células não pode, diretamente, produzir a diferenciação dos muitos tipos de células em um organismo multicelular. As células interagem entre si e, essa interação revela instruções sobre os modos de diferenciação de cada célula. Os sinais moleculares chamados de fatores parácrinos são liberados por um conjunto de células e induzem mudanças na expressão genética nas células adjacentes a elas. Essas células adjacentes (ou vizinhas) com suas características recém-adquiridas, produzem seus próprios fatores parácrinos que podem mudar a expressão genética de sua vizinhança- as vezes, incluindo as células que originalmente induziram a mudança nelas mesmas (GILBET E EPEL, 2009).

A partir dessa rede de sinais entre as células, os órgãos são formados. Tais sinais moleculares não estão limitados aos fatores parácrinos gerados internamente, mas podem, também, provir de fontes externas ao organismo. Estes agentes ambientais são discutidos como componentes normais na determinação do fenótipo do embrião. Assim, o mesmo genótipo pode gerar diferentes fenótipos dependendo de quais condições estão presentes no ambiente, permitindo uma mudança na trajetória do desenvolvimento do embrião em decorrência da imposição ambiental (GILBET E EPEL, 2009).

Sultan (2007) resumiu o status moderno da eco-devo em uma recente revisão:

“Eco-devo” examina como os organismos se desenvolvem em determinados ambientes e objetiva fornecer um quadro integrado para a investigação do desenvolvimento nesses contextos ecológicos. Eco-Devo não é uma simples “reembalagem” dos estudos sobre plasticidade com um novo nome... Enquanto os estudos sobre plasticidade são referentes às análises da genética quantitativa e da seleção fenotípica para examinar os resultados do desenvolvimento e sua evolução como características adaptativas, eco-devo inclui um foco explícito nos mecanismos moleculares e celulares da percepção ambiental e da regulação gênica subjacentes a essas respostas e como esses padrões de sinalização operam em indivíduos, populações, comunidades e táxons genética/ ecologicamente distintos (p.575).

Na maioria das interações do desenvolvimento, o genoma fornece instruções específicas, enquanto o ambiente é permissivo. Isto quer dizer que os genes determinam quais estruturas serão produzidas e a única exigência do ambiente é que essa estrutura não perturbe o processo de desenvolvimento (GILBET E EPEL, 2009).

Cachorros irão gerar cachorros e gatos irão gerar gatos mesmo se esses animais viverem na mesma casa. Entretanto, na maioria das espécies, há circunstâncias no desenvolvimento em que o ambiente dita as instruções e o genoma é meramente permissivo. Nesses casos, o ambiente determina qual tipo de estrutura é feita- mas o repertório genético tem que ser capaz de construir essa estrutura. A habilidade genética de responder aos fatores ambientais tem que ser herdada, claro, mas nesses casos, é o ambiente que direciona a formação do fenótipo específico (GILBET E EPEL, 2009).

NORMAS DE REAÇÃO E POLIFENISMOS

Dois principais tipos de plasticidade fenotípica são reconhecidos atualmente: as normas de reação e o polifenismo. Na norma de reação, o genoma codifica uma faixa contínua de fenótipos potenciais e o encontro entre o indivíduo e o ambiente determina o fenótipo (GILBET E EPEL, 2009).

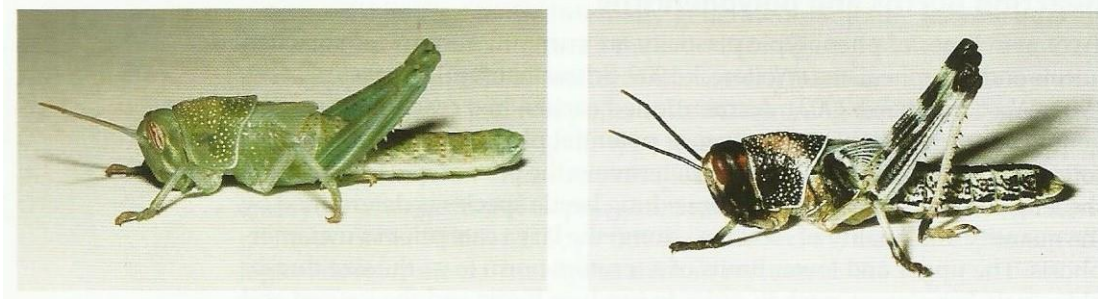
Por exemplo, o comprimento do chifre do macho em algumas espécies de besouros é determinado pela quantidade e pela qualidade do alimento que a larva come antes da metamorfose. O limite superior e inferior da norma de reação também é uma propriedade do genoma que pode ser selecionada. Espera-se que diferentes espécies de besouros sejam diferentes quanto a direção e quantidade de plasticidade que eles são capazes de expressar (GILBET E EPEL, 2009).

O segundo tipo de plasticidade fenotípica, o polifenismo, refere-se a fenótipos descontínuos suscitados pelo ambiente. Um exemplo clássico é a determinação do sexo da tartaruga, onde uma gama de temperaturas induz o desenvolvimento masculino do embrião, enquanto um conjunto distinto de temperatura suscita o desenvolvimento de

um embrião feminino. Entre esses dois conjuntos de temperaturas, há um pequeno intervalo que produz machos e fêmeas em diferentes proporções- mas não induzem sexos misturados (GILBET E EPEL, 2009).

Um importante exemplo de polifenismo pode ser visto no gafanhoto migratório *Schistocerca gregária*. Esse gafanhoto herbívoro existe em duas formas exclusivas: ou eles são de asa curta, colorida uniformemente e solitários, ou eles são de asa longa, brilhantemente coloridos e vivem em bandos. As diferenças fenotípicas entre essas duas morfologias são tão impressionantes que, apenas em 1921, um biólogo russo finalmente percebeu que esses animais pertenciam a mesma espécie (GILBET E EPEL, 2009).

As condições do ambiente determinam qual das morfologias um jovem gafanhoto irá desenvolver. O principal estímulo parece ser a densidade populacional. Quando as ninfas de gafanhotos estão aglomeradas de forma suficiente que determinado nervo na parte de trás do fêmur é estimulado por outras ninfas, seu padrão de desenvolvimento muda e a próxima vez que sofrer muda (ecdise) ele emergirá com asas longas e coloridas e comportamentos migratórios (GILBET E EPEL, 2009).



Baixa Densidade

Alta Densidade

Fig. 3 *Schistocerca gregária* com fenótipos diferentes em decorrência de polifenismo induzido pela densidade. A pigmentação intensa, asas e apêndices adequados para migração.

Agentes da plasticidade do desenvolvimento

A maioria dos embriões, provavelmente, tem um componente determinado pelo ambiente em seu fenótipo. Portanto, uma lista completa dos organismos com plasticidade fenotípica assemelhar-se-ia a uma lista com praticamente todos os eucariotos da árvore da vida, uma vez que inúmeros agentes ambientais contribuem para a produção do fenótipo: temperatura, nutrição, pressão e gravidade, luz, presença de condições de perigo (predadores ou estresse), presença ou ausência outros membros da mesma espécie.

TEMPERATURA COMO FATOR DE INFLUÊNCIA NO FENÓTIPO

Praticamente todas as atividades enzimáticas são dependentes da temperatura. A temperatura pode causar alterações no dobramento da proteína e, assim, determinar a forma do sítio ativo de uma enzima e os sítios de interação com outras proteínas (GILBET E EPEL, 2009).

Um exemplo dessa influência da temperatura na função da proteína é dado pela variante da enzima tirosinase encontrada em gatos siameses e coelhos himalaio. A tirosinase é fundamental para a síntese de melanina, o pigmento preto da pele dos vertebrados (de fato, mutações que bloqueiam a produção de melanina resultam em albinismo). A mutação que cria o fenótipo dos gatos siameses e dos coelhos himalaio transforma a tirosinase em uma enzima que é dependente da temperatura. Nesses animais, a tirosinase dobra-se corretamente em temperaturas relativamente frias, o que não ocorre em temperaturas mais quentes- inviabilizando a atividade enzimática (GILBET E EPEL, 2009).

As temperaturas mais frias são, normalmente, encontradas nas extremidades (ponta das orelhas, patas, rabos e em parte do focinho) e, as mais quentes, na maior parte do restante do corpo. Dessa forma, a tirosinase (e a produção da melanina) funciona apenas nas extremidades dos gatos siameses e dos coelhos himalaio, o que demonstra que as enzimas são afetadas pela temperatura e o resultado dessa influência pode gerar diferenças significativas nos fenótipos (GILBET E EPEL, 2009).



Fig. 4- Gato siamês e coelho himalaio com as extremidades escuras devido à síntese de melanina nas áreas mais frias do corpo.

POLIFENISMO SAZONAL EM BORBOLETAS

Uma vez que as enzimas (e presumivelmente outras proteínas, tais como os fatores de transcrição) podem ser influenciadas pela temperatura, animais envolvidos em condições termais diferentes podem apresentar fenótipos diferentes nas diferentes estações. Ecologistas descreveram que, na América do Norte, a pigmentação de muitas espécies de borboletas segue um padrão sazonal. Em grande parte do hemisfério norte, há ocorrência do polifenismo em borboletas da família Pieridae. Existem aquelas que eclodem durante os longos dias do verão e aquelas que eclodem no fim da estação, nos dias curtos do outono. O pigmento da asa posterior nas formas de dia curto é mais escuro do que nas borboletas de dia longo. Isso tem uma vantagem funcional durante os meses mais frios do outono uma vez que as borboletas mais escuras usam seus pigmentos para se aquecer entre os vôos. Os pigmentos mais escuros absorvem a luz mais eficientemente, aumentando a temperatura do corpo mais depressa do que os pigmentos mais claros (GILBET E EPEL, 2009).

POLIFENISMO NUTRICIONAL:

O alimento do organismo pode conter sinais químicos preponderantes para a indução de mudanças fenotípicas (como o exemplo da *Nemoria arizonaria*). Esse efeito é bastante comum em insetos (GILBET E EPEL, 2009).

Em insetos himenópteros (abelhas, vespas e formigas), a determinação das castas de rainha e operárias pode ser afetada por vários fatores, incluindo os genes, nutrição, temperatura e até mesmo componentes químicos voláteis eliminados por outros membros da colmeia. Entre as abelhas, novas rainhas são geradas dentro de duas semanas depois da morte da rainha anterior (ou se a colônia for dividida e uma segunda rainha tornar-se necessária). A “formação” da rainha depende quase que totalmente da alimentação. A larva que se alimenta da “geléia real” (um alimento rico em proteína que contém secreção das glândulas salivares das operárias) durante quase todo estágio larval será uma rainha (com ovários funcionais), enquanto a larva que se alimenta de uma dieta mais pobre nutricionalmente irá se tornar uma operária estéril.

Larvas podem se tornar rainhas caso alcancem um determinado tamanho antes da metamorfose (GILBET E EPEL, 2009).

Uma larva que alimenta-se, continuamente, por geléia real, a partir de uma fase precoce do desenvolvimento, mantém a atividade de uma estrutura chamada allata corpora ao longo de seus estágios larvais. Essa estrutura secreta um hormônio juvenil (HJ) que atrasa a metamorfose e permite que a larva cresça mais e tenha ovários funcionais. A taxa da síntese de HJ na “larva de uma rainha” é 25 vezes maior do que a

taxa sintetizada em larvas que não se alimentaram de geleia real. Caso uma grande quantidade de HJ seja ministrada em uma larva de operária, ela pode transformar-se em rainha. Assim, a rainha não alcança seu tamanho e fertilidade devido a uma predisposição genética, mas devido a uma suplementação nutricional (GILBET E EPEL, 2009).

De maneira similar, as colônias de formigas são predominantemente femininas e as fêmeas podem ser muito diferentes em tamanho e função. As fêmeas reprodutoras e muito maiores (rainhas) têm ovários funcionais; as operárias, não. Essas diferenças marcantes na anatomia e na fisiologia também são reguladas por um hormônio juvenil. A influência do ambiente nos níveis hormonais e na expressão gênica das formigas foi analisada por Abouheif e Wray (2002), que concluíram que a nutrição induz os níveis de HJ e regulam a formação das asas. Na rainha, tanto o disco da asa posterior quanto o da asa anterior desenvolvem-se normalmente, expressando os mesmos genes dos discos das asas da *Drosophila*. Entretanto, os discos das asas do imago operário, alguns desses genes não são expressos, e então, as asas não são formadas (GILBET E EPEL, 2009).

POLIFENISMO INDUZIDO POR PREDADOR

Em um exemplo anterior descrevemos uma situação em que um animal é frequentemente confrontado pela presença de um predador. Esse animal (presa) pode reconhecer as moléculas solúveis secretadas pelo predador e “usar” a sensibilidade a essas moléculas para ativar o desenvolvimento de estruturas que diminuiriam a probabilidade de captura da presa. Essa habilidade de modular o desenvolvimento na presença de predadores é chamada polifenismo induzido pelo predador. Os produtos químicos liberados pelos predadores que podem induzir mudanças morfológicas nas presas são denominados cairomônios (GILBET E EPEL, 2009).

Várias espécies de rotíferos têm sua morfologia alterada quando se desenvolvem em lagoas onde seus predadores crescem. O predador de rotíferos- *Asplanchna*-libera um composto solúvel que induz os ovos da presa da espécie *Keratella slacki* a desenvolver indivíduos com corpos ligeiramente maiores e espinhos anteriores 130% maiores do que seriam na ausência dos predadores, o que minimiza a propensão de captura da presa (GILBET E EPEL, 2009).

O caramujo *Thais lamellosa* desenvolve uma concha mais grossa e uma espécie de “dente” na abertura da concha quando está em água que contem espécies de caranguejos predadores dessa espécie. Em uma população mista de caracóis, os

caranguejos não irão atacar os caramujos de conchas mais grossas até que mais da metade dos caramujos de morfologia típica sejam devorados (GILBET E EPEL, 2009).

O polifenismo induzido por predador na pulga aquática *Daphnia* não beneficia apenas o indivíduo, mas toda ninhada. Quando a *Daphnia cucullata* encontra a larva do predador *Chaoborus*, sua cabeça cresce duas vezes mais do que o tamanho normal, tornando-se longa e adquirindo a forma de capacete. Esse aumento no tamanho diminui as chances da *Daphnia* ser predada pela larva voadora. Esse mesmo crescimento ocorre se a *Daphnia* estiver em águas onde o predador pode nadar (GILBET E EPEL, 2009).

Estudos mostraram que a ninhada da presa morfologicamente modificada pelo polifenismo induzido pelo predador, nasce com a mesma alteração na cabeça. Isto é possível porque o cairômonio liberado pelo *Chaeboborus* regula a expressão genética tanto no adulto quanto no desenvolvimento do embrião (GILBET E EPEL, 2009).

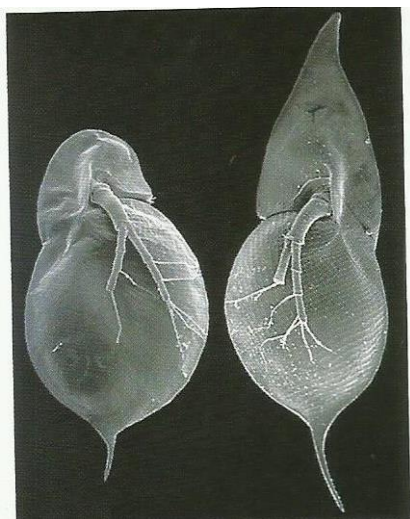


Fig.5- Foto de microscopia eletrônica para visualização do polimorfismo induzido por predador em *Daphnia*.

Não podemos reduzir completamente o fenótipo aos genes herdados. A partir dos exemplos acima, podemos constatar que o ambiente tem um incrível repertório de possibilidades para a geração de fenótipos (a sazonalidade, o tipo de alimentação, a presença de predadores, adaptações para fuga ou regulação térmica). Assim, a amplitude que a palavra “forjar” denota, incide no significado evolutivo da interação veemente resguardada entre os genes, os organismos e os ambientes. A quantidade de mecanismos adaptativos engendrados a partir dessa interação é objeto de grande potencial para entendermos a abordagem sistêmica da Biologia e porque ela é reiteradamente importante no cenário evolutivo.

Os exemplos apresentados tem grande potencial didático para discussão dessa caracterização integrada dos processos biológicos e das interações entre os diferentes níveis biológicos.

Nesse sentido, é de suma importância que o professor esteja atualizando-se constantemente- já que durante muito tempo o gene fora considerado o elemento exclusivo para muitas das explicações biológicas e a participação do ambiente, muitas vezes, mencionada de forma simplificada e equivocada- e que os conteúdos abordados na Formação Inicial não fiquem restritos a literaturas desatualizadas.

A leitura de artigos e de publicações estrangeiras é subsídio fundamental para que o professor possa buscar novos exemplos, compilações epistêmicas, desafios, suscitando novas dúvidas, indagações e colaborando com a formação de um professor e pesquisador cujo processo de formação permita um entendimento da real natureza do conhecimento biológico e suas vicissitudes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A. M. R.; EL-HANI, C. N. Um exame histórico filosófico da biologia evolutiva do desenvolvimento, *Scientiae Studia*, v.8, n.1, p. 9-40, 2010.
- AMUNDSON, R. **Historical development of the concept of adaptation**. In: ROSE, M.R.; LAUDER, G.V. (ed.) *Adaptation*. San Diego_CA: Academic Press. 1996.
- ANDRADE, M.A.B.S. **A epistemologia da Biologia na formação de pesquisadores: compreensão sistêmica de fenômenos moleculares**. 2011. 233f. Tese (Doutorado em Educação para Ciência). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus Bauru, São Paulo, 2011.
- ANDRADE, M.A.B.S.; et al. A formação de pesquisadores em um grupo de Epistemologia e Ensino de Biologia. In: **Atas do VII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências (ENPEC)**. Florianópolis- SC: ABRAPPEC, 2009.
- ANDRÉ, M. E. D. A; LÜDKE, M. **Pesquisa em Educação: Abordagens Qualitativas**, São Paulo, EPU, 1986.
- ARAÚJO, A. M. Está em curso o desenvolvimento de um novo paradigma teórico para a evolução biológica? **Ciências da Vida: Estudos Filosóficos e Históricos**, Associação de Filosofia e História das Ciências do Cone Sul, p.1-27, 2006.
- ARAÚJO, A.M. **“Genética e Evolucionismo”**, em G. Arias e Maria Irene B.M. Fernandes (eds.), *Ciência e Ética*. Embrapa, Brasília. pp. 35-55, 2001.
- AZEVEDO, M.; AYRES, A. C. M.; SELLES, S. E. Explicações teleológicas no Ensino de Biologia. In: **IX Congresso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias**. Girona, 2013.
- BARDIN, L. (1994). **Análise de conteúdo**. Lisboa: Edições 70.
- BEGON, M; HARPER, J. L.; TOWNSEND, C. R. **Ecologia: de indivíduos a ecossistemas**. Tradução de Adriano Sanches Melo. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2007.
- BIZZO, N. M. V. **Ensino de Evolução e História do Darwinismo**. 1991. 467f. Tese. (Doutorado em Educação). Universidade de São Paulo, campus de São Paulo, São Paulo, 1991.
- BRANDO, F.R. **Proposta Didática para o Ensino Médio de Biologia: As relações ecológicas no cerrado**. 2010. 217f. Tese. (Doutorado em Educação para Ciência). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus Bauru, São Paulo, 2010.
- BRANDO, F.R.; CALDEIRA, A.M.A. Análise Biossemiótica voltada para sistemas ecológicos. **Filosofia e História da Biologia**, v.02, p.141-157, 2007.
- BRANDON, R.N. Environment. In: Keller, E.F.; Lloyd, E. A. **Keywords in evolutionary biology**. Cambridge: Harvard University Press, p. 8186, 1992.
- BRZOZOWSKI, J.A. **Auto-organização e contingência da Biologia Evolutiva. 2007. 98f. Dissertação**. (Mestrado em Filosofia). Universidade Federal de Santa Catarina, campus Florianópolis, Santa Catarina, 2007.
- CALDEIRA, A.M.A. Didática e Epistemologia da Biologia. In: CALDEIRA, A.M.A; ARAÚJO, E.S.N.N. (Org.). **Introdução à Didática da Biologia**. São Paulo: Escrituras, p.73-86, 2009.

- CALDEIRA, A.M.A.; SILVEIRA, L.F.B. O processo evolutivo: Uma análise semiótica. **Revista Ciência & Educação**, v.05, n.1, p.95-100, 1998.
- CALDEIRA, A.M.A.; BASTOS, F. A Didática como área do conhecimento. In: CALDEIRA, A.M.A.; ARAÚJO, E.S.N.N. (Org.). **Introdução à Didática da Biologia**. São Paulo: Escrituras, p.13-33, 2009.
- CALDEIRA, Ana Maria de Andrade & SILVEIRA, Lauro Frederico Barbosa. O processo evolutivo: Uma análise semiótica. **Revista Ciência & Educação**, v.05, n.1, p.95-100, 1998.
- CAPONI, G. Aproximação epistemológica à biologia evolutiva do desenvolvimento. In: ABRANTES, P. C.; et al. (org). **Filosofia da Biologia**. Porto Alegre: Artmed, p. 211-224, 2011.
- CAPONI, G. Experimentos en biología evolutiva: ¿Qué tienen ellos que los otros no tengan? **Episteme**, V.16, p. 61- 97, 2003.
- CAPONI, G. O darwinismo e seu outro: a teoria transformacional da evolução, **Scientiae Studia**, v.3, n.2, p.233-242, 2005.
- CAPONI, G. **Réquiem por El Centauro. Aproximación Epistemológica a la Biología Evolucionaria del Desarrollo**, México, Centro de Estudios Filosóficos, Políticos y Sociales Vicente Lombardo Toledano, 2012.
- CARNEIRO, A. P. N. **A Evolução Biológica aos olhos de professores não licenciados**. 2004. 137 f. Dissertação (Mestrado em Educação Científica e Tecnológica). Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, UFSC, Florianópolis.
- CARNEIRO, M.H.S.; GASTAL, M.L. História e Filosofia das Ciências no Ensino de Biologia. **Ciência & Educação**, v. 11, n. 1, p. 33-39, 2005.
- CARROLL, S. B. **Infinitas formas de grande beleza**, Como a evolução forjou a quantidade de criaturas que habitam o planeta, Rio de Janeiro, Editora Jorge Zahar Ed., 2006.
- CASTRO, N.B. L, AUGUSTO, TG.S Análise dos trabalhos do ensino de evolução, In: Atas do **VII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências (ENPEC)**. Florianópolis- SC: ABRAPEC, 2009.
- CHEDIAK, K. **Filosofia da Biologia**, Rio de Janeiro, Editora Jorge Zahar, 2008.
- CHEVALLARD, Y. La Transposición Didáctica: Del saber sábio al saber enseñado. Buenos Aires: Aique, 1991, 96p.
- CICILLINI, G. A. **A produção do conhecimento biológico no contexto da cultura escolar do Ensino Médio**. 1997. 283f. Tese. (Doutorado em Educação). Universidade Estadual de Campinas, campus de Campinas, São Paulo, 1997.
- CORRÊA, A. L. **História e Filosofia da Biologia na Formação Inicial de professores: Reflexões sobre o conceito de evolução biológica**. 2010.137f. Dissertação. (Mestrado em Educação para Ciência). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus Bauru, São Paulo, 2010.
- CORRÊA, A.L.; NUNES, P.S.; CALDEIRA, A.M.A.; CAVASSAN, O. Proposta de aproximação entre a evo-devo e a teoria de construção do nicho: Perspectiva histórico-epistemológica para o Ensino de Biologia. In: **V Encontro Regional Sul de Ensino de Biologia (EREBIO-SUL)**- PR, Londrina, 2011.

- CRAWFORD, M. Genômica e modularidade morfológica: Como genes espectadores, sintenia genômica e arrastamento constroem e restringem opções evolutivas emergentes. **Cienc. Cult. [online]**, v.65, n.4, pp. 26-31, 2013.
- DENNETT, D. C. **A perigosa ideia de Darwin**. A evolução e os significados da vida, Rio de Janeiro, Editora Rocco, 1998.
- EL-HANI, C. N. Notas sobre o ensino de História e Filosofia da Biologia na Educação Superior. In: NARDI, R. (Org.). **A pesquisa em ensino de ciências no Brasil: alguns recortes**. São Paulo: Escrituras, p. 293-315, 2007.
- EL-HANI, C. N. Uma ciência da organização viva: Organicismo, emergentismo e ensino de biologia. In: SILVA FILHO, W. J. (Ed.). **Epistemologia e Ensino de Ciências**. São Paulo: DP&A, 2002.
- EL-HANI, C. N.; MEYER, D. A evolução da teoria darwiniana, **Scientific American do Brasil** - série História da Evolução, p. 76 - 85, 14 jun. 2007.
- EL-HANI, C.N. Between the cross and the sword: the crisis of the gene concept. **Genetics and Molecular Biology**, n. 30, v. 2, p. 297-307, 2007.
- EL-HANI, C.N.; MEYER, D. A evolução da Teoria Darwiniana. **ComCiência**, n.107, 2009.
- ETXEBERRIA, A.; MORENO, A. La Idea de autonomia em biologia. Logos. **Anales del Seminario de Metafísica**, n. 40, p. 21-37, 2007.
- FELIZARDO, A.B. Críticas atuais ao neodarwinismo: **A ampliação da janela explicativa da Teoria Evolutiva contemporânea**. 2006. 108f. Dissertação. (Mestrado em Filosofia). Universidade Federal de Minas Gerais, campus Belo Horizonte, Minas Gerais, 2006.
- FORQUIN, J.C. Saberes escolares, imperativos didáticos e dinâmicas sociais. **Teoria e Educação**, Porto Alegre, n.05, p. 28-49 1992.
- FRANCO, L.F. Biodiversidade e ambiente. In: COSTA, E. V; COSTA, V. R, **Biologia**, Brasília, UNESCO, 2006.
- FRANZOLIN, F. **Conceitos de Biologia da Educação Básica e na Academia: aproximações e distanciamentos**. 2007. 204f. Dissertação. (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática). Universidade de São Paulo, campus de São Paulo, São Paulo, 2007.
- FREIRE-MAIA, N. **Teoria da Evolução: de Darwin à Teoria Sintética**, São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 1988.
- FUTUYMA, D. J. **Biologia Evolutiva**, 3 ed., Ribeirão Preto, Sociedade Brasileira de Genética, 2009.
- FUTUYMA, D.J. **Evolução, Ciência e Sociedade**, Sociedade Brasileira de Genética, Editora: Virtuale comunicação, 2002.
- GAYON, J. Ensinar Evolução. In: MORIN, E. **A religião dos saberes: o desafio do Século XXI**. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil Ltda., 2001.
- GILBERT, S.F.; EPEL, D. **Ecological Developmental Biology**, Massachusetts, USA, 2009.
- GODOY, A. S. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. **Revista de Administração de Empresas**, v.35, n.3, p.20-29, 1995.
- GOEDERT, L. **A formação do professor de Biologia na UFSC e o ensino da evolução biológica**. 2004. 122f. Dissertação. (Mestrado em Educação Científica e Tecnológica). Universidade Federal de Santa Catarina, campus Florianópolis, SC, 2004.

- GOULD, E. J. **Darwin e os grandes enigmas da vida**, 2ed. São Paulo, Martins Fontes, 1999.
- GOULD, S. J. **Darwin e os grandes enigmas da vida**. São Paulo: Martins Fontes, 1999.
- GOULD, S. J. **Lance de Dados: a idéia de Evolução de Platão a Darwin**. Rio de Janeiro: Record, 2001.
- GOULD, S. J. LEWONTIN, R. **The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme**. London:Proceedings of the Royal Society of London, Series B Vol. 205, n. 1161, p.581/598, 1979.
- GOULD, S. J. **The Structure of Evolutionary Theory**. Cambridge, Mass. The Belknap Press of Harvard University Press, 2002.
- GOULD, S.; LEWONTIN, R. **The spandrels of San Marco and the Panglossian paradigm: a critique of the adaptationist programme**. Proceedings of The Royal Society of London v.205, pp. 581-598. 1979 (reimpresso em SOBER, E. (ED.) *Conceptual Issues in Evolutionary Biology*, 2ed. Cambridge-MA: MIT Press. 1994).
- GOULD, S.J. **A galinha e seus dentes e outras reflexões sobre História Natural**. Rio de Janeiro: Paz e Terra. 1992.
- GOULD, S.J. **Darwinism and the expansion of the evolutionary theory**. USA: Science 216, 1982.
- GOULD, S.J. **The Structure of Evolutionary Theory**. USA: Harvard University Press, 2002.
- HARTFELDER, K. Genética do desenvolvimento e evolução dos grandes grupos de animais. **Genética na Escola**, v.01, n.02, p.93-100, 2006.
- <http://sandwalk.blogspot.com.br/2013/03/learning-about-evo-devo.html> MORAN, 2013.
- JABLONKA, E.; LAMB, M.J. **Evolução em Quatro Dimensões- DNA, Comportamento e a História de Vida**. São Paulo, Companhia das Letras, 2010.
- JOAQUIM, L. M.; SANTOS, V. C.; ALMEIDA, A. M. R.; MAGALHÃES, J. C., EL HANI, C. N. (2007). Concepções de estudantes de graduação de biologia da UFPR e UFBA sobre genes e sua mudança pelo ensino de genética. In: **VI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências - SC**, Florianópolis: 2007.
- JOAQUIM, L.M.; EL-HANI, C.N. A genética em transformação: crise e revisão do conceito de gene. **Scientiæ Zudia**, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 93-128, 2010.
- JUNQUEIRA, J.; CARNEIRO, L.C. **Biologia Celular e Molecular**, Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 2012.
- JUSTINA, L.A.D.; MEGLHIORATTI, F.A.; CALDEIRA, A.M.A. A (re) construção de conceitos biológicos na Formação Inicial de professores e proposição de um modelo explicativo para a relação genótipo e fenótipo. **Revista Ensaio**, v.14, n.03, p.5-84, 2012.
- KELLER, E. F. **O século do gene**. Belo Horizonte: Crisálida, 2002.
- KELLER, E. F. The century beyond the gene. **Journal of Biosciences**, v 30, p. 3-10, 2005.
- LALAND, K.N.; ODLING- SMEE, J.; GILBERT, S.F. Evo-Devo and Niche Construction: Building Bridges. **J. Exp. Zool. (Mol. Dev. Evol.)** 310B, p. 549–566, 2008.
- LEWONTIN R. 2000. **Biologia como ideologia: a doutrina do DNA**. Ribeirão Preto: FUNPEC-RP.
- LEWONTIN, R. **A tripla hélice. Gene, organismo e ambiente**, São Paulo, Editora Companhia das Letras, 2002.

- LEWONTIN, R. Adaptation. **Scientific America**, v. 249, p. 212-222, 1978.
- MARICATO, F.E. **A (re) construção coletiva do conceito de interação biológica: contribuição para a Epistemologia da Biologia e a formação de pesquisadores e professores**. 2012. 222f. Tese. (Doutorado em Educação para Ciência). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus Bauru, São Paulo, 2012.
- MAYNARD SMITH, J., BURIAN, R., KAUFFMAN, S., ALBERCH, P., CAMPBELL, J., GOODWIN, B., LANDE, R., RAUP, D.; WOLPERT, L. Developmental constraints and evolution: a perspective from the Mountain Lake Conference on Development and Evolution. **The Quarterly Review of Biology**, v. 60, n. 3, p. 265-287, 1985.
- MAYR, E. (2005). **Biologia, ciência única**. São Paulo: Companhia das Letras.
- MAYR, E. **Charles Darwin e a Gênese do Moderno Pensamento Evolucionário**, Ribeirão Preto, Editora Funpec, 2006.
- MAYR, E. **Isto é biologia: a ciência do mundo vivo**, São Paulo, Companhia das Letras, 2011.
- MAYR, E. **O que é Evolução?**, Rio de Janeiro, Editora, Rocco, 2009.
- MEGLHIORATTI, F. A. **História da construção do conceito de Evolução Biológica: possibilidades de uma percepção dinâmica da ciência pelos professores de Biologia**. 2004. 247f. Dissertação. (Mestrado em Educação para Ciência). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus Bauru, São Paulo, 2004.
- MEGLHIORATTI, F.A. et al. A compreensão de sistemas biológicos a partir de uma abordagem hierárquica: contribuições para a formação de pesquisadores. **Filosofia e História da Biologia**, v.03, p.119-138, 2008.
- MEGLHIORATTI, F.A. **O conceito de organismo: Uma introdução à epistemologia do conhecimento biológico na Formação Inicial de graduandos de Biologia**. 2009. 254f. Tese. (Doutorado em Educação para Ciência). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus Bauru, São Paulo, 2009.
- MEGLHIORATTI, F.A.; EL-HANI, C.N.; CALDEIRA, A.M.A. O conceito de organismo em uma abordagem hierárquica e sistêmica da Biologia. **Revista da Biologia**, v.09, n.02, p.7-11, 2012.
- MEYER, D.; EL-HANI, C. N. **Evolução: o sentido da biologia**, São Paulo, Editora UNESP, 2005.
- NEVES, J. L. Pesquisa qualitativa: características, usos e possibilidades, **Caderno de Pesquisas em Administração**, v.1, n.3, 1996.
- NIJHOUT, H.F. The Developmental and Evolution of Butterfly Wing Patterns. Smithsonian Institution Press, Washington, DC, 1991.
- ODLING-SMEE, F.J.; LALAND, K.N.; FELDMAN, M.W. **Niche construction- The neglected process in evolution**. Princeton: Princeton University Press, 2003.
- ODUM. **Ecologia**. Tradução de Christopher J. Tribe. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988.
- OYAMA, S., GRIFFITHS, P.E., AND GRAY, R.D. **Cycles of Contingency: Developmental Systems and Evolution**. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2001.
- PATTON, M. Q. **Qualitative research and evaluation on methods**. 3 ed. Sage Publications, 2002.

- PIGLIUCCI, M. Do we need an extended evolutionary synthesis? **Journal compilation. The Society for the Study of Evolution.** 61-12: 2743-2749, 2007.
- PITOMBO, M.A.; ALMEIDA, A.M.R.; EL-HANI, C.N. Conceitos de gene ideias sobre função gênica em livros didáticos de Biologia Celular e Molecular do Ensino Superior. **Contexto e Educação**, v.22, n.77, p.81-110, 2007.
- REGNER, A.C.K.P. Uma nova abordagem para a estrutura do argumento geral da *Origem das Espécies*. In: Caderno de Resumos do **Encontro de História e Filosofia da Biologia**. Ribeirão Preto- SP: Filosofia/USP, 2014, p.18-20.
- RHEINBERGER, H. J. Gene concepts: **Fragments from the perspective of molecular biology**. In: Beurton, R.; Falk, R. & Rheinberger, H.-J. (Ed.). *The concept of the gene in development and evolution*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. p. 219-39.
- RICKLEFS, R. E. **A economia da natureza**. Tradução de Cecília Bueno, Pedro P. de Lima-e-Silva e Patrícia Mousinho. 5ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2003.
- RIDLEY, M. **Evolução**, 3. ed., Porto Alegre, Artmed, 2006.
- RUIZ-MIRAZO K.; ETXEBERRIA, A.; MORENO, A.; IBANEZ, J. Organisms and their place in biology. **Theory in biosciences** 119 (3-4): 209-233, 2000.
- SANTOS, J.V.A. **Concepções de progresso biológico em livros didáticos de Biologia aprovados pelo PNLD 2012**. 2013. 168p. Dissertação. (Mestrado em Educação Científica e Tecnológica). Universidade Federal de Santa Catarina, campus Florianópolis, SC, 2013.
- SANTOS, W.B. **Análise de livros didáticos e validação de sequência didática sobre pluralismo de processos e evo-devo no contexto do ensino de zoologia de vertebrados**. 2011. 506f. Dissertação. (Mestrado em Ecologia e Biomonitoramento). Universidade Federal da Bahia, campus Salvador, Bahia, 2011.
- SANTOS, W.B.; EL-HANI, C.N. A abordagem do pluralismo de processos e da evo-devo em livros didáticos de biologia evolutiva e zoologia de vertebrados. **Revista Ensaio**, v.15, n.03, p.199-216, 2013.
- SCHNEIDER, E.M.; et al. Conceitos de gene: construção histórico-epistemológica e percepções de professores do Ensino Superior. **Investigações em Ensino de Ciências**, v.16, n.02, p.201-222, 2011.
- SEPÚLVEDA, C.; EL-HANI, C. N. Obstáculos epistemológicos e ontológicos à compreensão do conceito darwinista de adaptação: implicações para ao ensino de evolução, **Cuadernillos de Investigación**, Bogotá, n.5, p. 1-28, 2007.
- SEPÚLVEDA, C.; EL-HANI, C.N. Adaptacionismo versus exaptacionismo: O que esse debate tem a dizer ao ensino de evolução? **Ciência e Ambiente**, v. 36, n.93, p.124, 2008.
- SEPÚLVEDA, C.; MEYER, D.; EL-HANI, C.N. Adaptacionismo. Em: ABRANTES, P. C.; et al. (org). **Filosofia da Biologia**. Porto Alegre: Artmed, 162- 193, 2011.
- SEPÚLVEDA, C; EL-HANI, C. N. Ensino de Evolução: uma experiência na formação inicial de professores de biologia. In: TEIXEIRA, P. M. M; RAZERA, J. C. C. **Ensino de Ciências pesquisas e pontos em discussão**. 1. ed. Campinas: Komedi, 2009, p. 21-45.

- STERELNY, K.; GRIFFITHS, P. E. **Sex and Death: an introduction to philosophy of biology**. Chicago; University of Chicago Press, 1999.
- SULTAN, S. E. Development in context: The timely emergence of eco-devo. **Trends Ecol. Evol**, n.22, p.575-582, 2007.
- TAVARES, M.L. **Argumentação em salas de aula de Biologia sobre a Teoria Sintética da evolução**. 2009. 336f. Tese. (Doutorado em Educação). Universidade Federal de Minas Gerais, campus Belo Horizonte, MG, 2009.
- TIDON, R. Gene, organismo e ambiente. **Genética na escola**, v.01, n.02, p.41-44, 2006.
- TIDON, R.; LEWONTIN, R. C. Teaching evolutionary biology. **Genetics and Molecular Biology**, v.27, n.1, p.124-31, 2004.
- WAGNER, G. What is the promise of developmental evolution? Part I: Why is developmental biology necessary to explain evolutionary innovations. **Journal of Experimental Zoology**, v. 288, p. 95-98, 2000.
- WEBSTER,G.; GOODWIN, B.C. A Structuralist Approach to Morphology. **Rivista di Biologia** 92: 495-498, 1999.