

# Ciências Biológicas

## Biologia Evolutiva

Vânia Marilande Ceccatto  
Edson Lopes da Ponte



Geografia



História



Educação Física



Química



Ciências Biológicas



Artes Plásticas



Computação



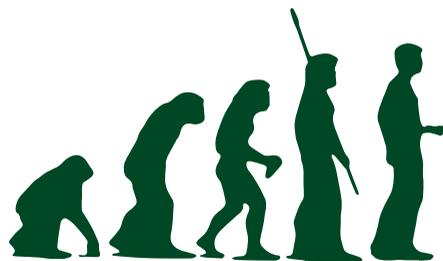
Física



Matemática



Pedagogia



# Ciências Biológicas

## Biologia Evolutiva

Vânia Marilande Ceccatto  
Edson Lopes da Ponte

2ª edição  
Fortaleza - Ceará



2015



Geografia



História



Educação  
Física



Química



Ciências  
Biológicas



Artes  
Plásticas



Computação



Física



Matemática



Pedagogia

Copyright © 2015. Todos os direitos reservados desta edição à UAB/UECE. Nenhuma parte deste material poderá ser reproduzida, transmitida e gravada, por qualquer meio eletrônico, por fotocópia e outros, sem a prévia autorização, por escrito, dos autores.

Editora Filiada à



<b>Presidenta da República</b> Dilma Vana Rousseff	<b>Conselho Editorial</b> Antônio Luciano Pontes
<b>Ministro da Educação</b> Aloisio Mercadante	Eduardo Diatahy Bezerra de Menezes
<b>Presidente da CAPES</b> Carlos Afonso Nobre	Emanuel Ângelo da Rocha Fragoso
<b>Diretor de Educação a Distância da CAPES</b> Jean Marc Georges Mutzig	Francisco Horácio da Silva Frota
<b>Governador do Estado do Ceará</b> Camilo Sobreira de Santana	Francisco Josênio Camelo Parente
<b>Reitor da Universidade Estadual do Ceará</b> José Jackson Coelho Sampaio	Gisafran Nazareno Mota Jucá
<b>Vice-Reitor</b> Hidelbrando dos Santos Soares	José Ferreira Nunes
<b>Pró-Reitor de Pós-Graduação</b> Jeffeson Teixeira de Souza	Liduína Farias Almeida da Costa
<b>Coordenador da SATE e UAB/UECE</b> Francisco Fábio Castelo Branco	Lucili Grangeiro Cortez
<b>Coordenadora Adjunta UAB/UECE</b> Eloísa Maia Vidal	Luiz Cruz Lima
<b>Direção do CED/UECE</b> José Albio Moreira de Sales	Manfredo Ramos
<b>Coordenação da Licenciatura em Ciências Biológicas</b> Germana Costa Paixão	Marcelo Gurgel Carlos da Silva
<b>Coordenação de Tutoria da Licenciatura em Ciências Biológicas</b> Roselita Maria de Souza Mendes	Marcony Silva Cunha
<b>Editor da EdUECE</b> Erasmus Miessa Ruiz	Maria do Socorro Ferreira Osterne
<b>Coordenadora Editorial</b> Rocylânia Isídio de Oliveira	Maria Salete Bessa Jorge
<b>Projeto Gráfico e Capa</b> Roberto Santos	Silvia Maria Nóbrega-Therrien
<b>Diagramador</b> Francisco Oliveira	<b>Conselho Consultivo</b> Antônio Torres Montenegro (UFPE)
<b>Revisora Ortográfica</b> Fernanda Ribeiro	Eliane P. Zamith Brito (FGV)
	Homero Santiago (USP)
	Ieda Maria Alves (USP)
	Manuel Domingos Neto (UFF)
	Maria do Socorro Silva Aragão (UFC)
	Maria Lírida Callou de Araújo e Mendonça (UNIFOR)
	Pierre Salama (Universidade de Paris VIII)
	Romeu Gomes (FIOCRUZ)
	Túlio Batista Franco (UFF)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Sistema de Bibliotecas  
Biblioteca Central Prof. Antônio Martins Filho  
Thelma Marylanda Silva de Melo – CRB-3 / 623  
Bibliotecária

C387b Ceccatto, Vania Marilande.  
Biologia evolutiva / Vania Marilande Ceccatto, Edson Lopes da Ponte. – Fortaleza : EdUECE, 2015.  
132 p. ; il. (Ciências Biológicas)  
ISBN: ISBN: 978-85-7826-341-6  
1. Biologia evolutiva I. Edson Lopes da Ponte . II. Título.

CDD 576

Editora da Universidade Estadual do Ceará – EdUECE  
Av. Dr. Silas Munguba, 1700 – Campus do Itaperi – Reitoria – Fortaleza – Ceará  
CEP: 60714-903 – Fone: (85) 3101-9893  
Internet: www.uece.br – E-mail: eduece@uece.br  
Secretaria de Apoio às Tecnologias Educacionais  
Fone: (85) 3101-9962

# Sumário

<b>Apresentação .....</b>	<b>5</b>
<b>Capítulo 1 – Pensamento evolutivo: impactos e tendências .....</b>	<b>7</b>
1. Aspectos gerais e históricos da biologia evolutiva .....	9
1.1 Breve histórico da biologia evolutiva.....	11
1.2 A teoria da evolução de Darwin.....	14
1.3 Seleção natural .....	17
2. Impactos e tendências da biologia evolutiva .....	19
2.1 A nova síntese .....	21
3. Noções de evolução humana .....	27
3.1. Classificação taxonômica .....	31
3.2. Paleoantropologia .....	31
3.3. O processo de evolução humana.....	32
<b>Capítulo 2 – Sistemática filogenética, desenvolvimento e genômica evolutiva .....</b>	<b>39</b>
1.1 Evolução de órgãos complexos: o olho .....	43
1.2. Homologia e homoplasia .....	47
2. A sistemática filogenética.....	50
2.1 Evolução e filogenia: conceitos .....	53
3. Desenvolvimento.....	55
3.1. Desenvolvimento de Drosophila .....	57
4. Genômica evolutiva.....	62
4.1. Evolução molecular .....	62
4.2. Evolução de genomas e filogenia .....	66
4.3. Árvore da vida .....	68
<b>Capítulo 3 – Origens das variações evolutivas .....</b>	<b>77</b>
1. Seleção natural, variação e adaptação .....	79
1.1. Aspectos gerais .....	80
1.2. Tipos de seleção natural .....	80
1.3. Variação .....	83
1.4. Adaptação.....	85
1.5 Exemplificando o conceito: seleção natural .....	88
2. Seleção sexual .....	90
2.1 Exemplificando o conceito: seleção sexual.....	91
3. Especiação .....	94
3.1. O que é espécie? .....	94

3.2. Os conceitos de espécie .....	95
3.3. Barreiras de isolamento e a variação intraespecífica.....	96
3.4. O processo de especiação .....	98
4. Coevolução.....	100
Evolução e doenças infecciosas .....	101
5. Irradiação e extinção.....	104
5.1. Irradiação adaptativa.....	104
5.2 Exemplificando o conceito: Irradiação adaptativa.....	105
5.3 Extinção .....	106
<b>Capítulo 4 – Ensino de Evolução .....</b>	<b>117</b>
1. Aspectos gerais .....	119
2. O ensino de evolução .....	120
3. Os livros didáticos e os conteúdos de biologia evolutiva.....	121
<b>Sobre os autores.....</b>	<b>132</b>

# Apresentação

Vamos dar início ao nosso estudo buscando olhar para o passado com uma reflexão sobre o que é responsabilidade histórica. Inicialmente, lembremos um talentoso homem do século XIX, Thomas Henry Huxley, médico, membro destacado da comunidade científica inglesa do século XVIII. Como seu ilustre colega Charles Robert Darwin, tornou-se assistente a bordo de uma nau militar de seu tempo, o H. M. S. Rattlesnake, em uma perigosa viagem de reconhecimento cartográfico da Marinha Britânica.

A viagem lhe rendeu muito prestígio, tanto pelos relatos de viagem quanto pelo envio à Inglaterra de dezenas de espécimes animais da Austrália e da Nova Guiné. Diferentemente do amigo, era de origem humilde, um dos poucos naturalistas britânicos da época que, pasmemos, precisava trabalhar para viver, atuando em diversos empregos. Inteligente, tenaz, estudioso, expressava suas opiniões de forma feroz. Foi um dos defensores mais importantes das ideias e também do enigmático mito de Charles Darwin. Sem medo de expressar suas opiniões, foi o maior defensor das ideias evolucionistas e conseguiu uma posição de destaque por pura determinação e vontade própria.

Não é preciso salientar que o grande protagonista deste momento único da história da biologia foi realmente, Charles Robert Darwin, cuja obra monumental recaiu sobre as ideias de como as espécies se modificam e porque são bem adaptadas ao meio em que vivem. Formulou na verdade duas teorias: evolução e seleção natural, compilando-as em diversos livros polêmicos. Huxley orgulhou-se de ser ponta de lança e advogado de ideias tão importantes para a história da ciência.

Huxley foi alcunhado por Darwin, como "seu agente geral" pela forma como o motivou e incentivou a publicar seus dados e análises. Sendo melhor orador e mesmo debatedor do que Darwin, não fugiu à sua responsabilidade de rebelar-se contra as ideias vigentes, sendo forte e incisivo o bastante para que Darwin recebesse a atenção necessária e que os pesquisadores da época entrassem na discussão.

Voltando ao tempo presente, como biólogos, vivemos o mesmo processo. Quase da mesma maneira daqueles notáveis cientistas do século XIX, somos constantemente confrontados com momentos de ruptura em que devemos expressar nosso conhecimento acerca de diferentes indagações da sociedade. Assim, muito mais que meras opiniões controversas, temos argumentos científicos a apresentar. O biólogo precisa sim, defender o ponto de vista de uma "verdade biológica".

Um exemplo: a defesa da biodiversidade e do meio ambiente não é mais uma mera discussão acadêmica e passou mesmo a ser um ponto focal do século XXI. A discussão ecológica, iniciada em meados dos anos 60, iniciou-se timidamente e foi extremamente criticada a princípio, especialmente devido interesses comerciais. Biólogos, estudantes, ambientalistas, ecólogos, políticos, a sociedade em geral, puseram em cheque a chamada **revolução verde**<sup>1</sup>, o desmatamento indiscriminado, a extinção das espécies, o mau uso da terra, a poluição, enfim, as mazelas pós-revolução industrial. Discutimos a possibilidade de ocorrer um aquecimento global e o mesmo ser consequência das ações humanas sobre o planeta, em razão de um estilo predatório de vida.

Com o estudo do DNA, que já foi, mas não é mais, um mistério, passamos a conhecer a informação genética e seus princípios básicos, definidos e caracterizados. A vida ainda não foi definida, mas conhecemos o suficiente para saber quais leis ela obedece e desobedece. Sabemos que ela é contra o equilíbrio físico, desafia a lei da Entropia ou a segunda lei da Termodinâmica.

Assim, como num quebra cabeça, a natureza produz estruturas cada vez mais elaboradas e acumula modificações descendentes de uma longa história de eventos transformadores ao longo de milhares de anos. O biólogo é então um contador de histórias, histórias do tempo, onde ele não esteve presente. Porém, a partir de fragmentos dispersos, conecta provas empíricas, reconstruindo a história viva parcial ou totalmente. Temos então que tentar entender nosso passado evolutivo e tentar melhorar não só o presente como também as possibilidades que nos reservam o futuro de nossa existência e de todos os organismos vivos.

**Os autores**

<sup>1</sup>Revolução verde: expressão foi cunhada na década de 60, em resposta à crescente necessidade de alimentos em nível mundial. Sementes modificadas, com altos níveis de resistência às doenças, utilização de agrotóxicos, fertilizantes, tecnização agrícola, tudo isso aumentou significativamente a produção agrícola. Não conseguiu seu intento de acabar com a fome mundial, porém teve sérias consequências para o ambiente, com o aumento das áreas desmatadas, devastação de matas ciliares para plantio, desastres ecológicos com o uso indiscriminado de agrotóxicos, expulsão dos pequenos produtores etc.

# Capítulo

# 1

## **Pensamento evolutivo: impactos e tendências**



## Objetivos

- Discutir os aspectos gerais e históricos, as ideias precursoras e as evidências da biologia evolutiva.
- Explicar as origens da teoria da evolução, o darwinismo e as bases teóricas das primeiras ideias sobre a evolução, entre outros conceitos introdutórios.
- Propiciar aos alunos conhecimentos básicos sobre a evolução humana.

### 1. Aspectos gerais e históricos da biologia evolutiva

A palavra “evolução” pode ter várias conotações e contextos. Pode ser entendida, de forma livre, como movimento ou desenvolvimento de algo, uma transformação progressiva. “Evolução” na contemporaneidade pode ser uma dança, uma expressão artística, como aquela feita por aves ou por aeronaves, evoluindo no céu, uma escola de samba em seu desfile. Conotações de uso diário são inúmeras para a palavra evolução: “*minha evolução como ser humano*”, – entende-se subjetivamente como uma melhora, em termos de personalidade, ou “*minha evolução na empresa*”, – histórico de sua carreira, promoção de cargo, “*evolução das taxas de juros*”, – variação das taxas de juros. Enfim, evolução disso, evolução daquilo, uma palavra que pode expressar vários aspectos, como: melhora, crescimento, desenvolvimento, história, avanço, adaptação, perspectiva etc.

De certa forma, todos os conceitos acima dizem que deve haver variação, uma mudança que seja de um ponto A para B (ou para C, ou D). Deve haver um “delta”, uma mudança final e uma inicial, pelo menos. Quantos pontos e qual a ordem dessas mudanças seria necessária para que alguém nos dissesse que ocorreu ali uma variação? Por exemplo, pensemos na variação de altura de um rio, a qual pode ocorrer do ponto A  $\rightarrow$  B ou de B  $\rightarrow$  A, digamos de 1,0 cm. Ou seja, o rio varia sua altura em 1,0 cm. Porém, com as chuvas, essa variação passa de B  $\rightarrow$  C, sendo que C corresponde a 10 cm. O total de variação ficou em 11 cm. Os ambientalistas que estudam a altura do rio poderiam dizer que durante o ano, o rio pode se manter numa variação “normal”, não maior que 1,0 cm e que no momento

das chuvas, essa variação torna-se realmente importante. Cremos que somente os especialistas nesta área poderiam dizer quando uma variação realmente se torna crítica ou levada em consideração. Em outras palavras a variação existe e pode ser medida.

Outra variável importante diz respeito ao tempo das variações. Voltemos ao nosso exemplo: a cada 10 anos essa variação de B → C passa a ser de 20 cm, a cada 20 anos a variação de B-C pode chegar a 30 cm. Portanto, esse rio apresenta variação anual como também ao longo do tempo. Essa dimensão de tempo refere-se à nossa perspectiva, perspectiva humana. Como podemos medi-la? Todos os dias, todas as horas, todos os anos... - a cada 20 anos... O economista poderia dizer que uma simples mudança na taxa de juros, durante uma hora, por exemplo, não significaria nada de importante para ele, mas em um ano, grandes variações podem ocorrer.

Poderíamos dizer então que algo *evoluiu* quando apresentou alguma variação, dentro de um determinado tempo e que o mesmo precisa ser medido e avaliado. Esse algo tinha uma concepção original, que se alterou, de mais ou para menos, tornando-se uma concepção derivada de outra original. Somente um sujeito que conhece bem esse algo subjetivo pode determinar essa variação. Um sujeito que estude esse algo e possa dizer o alcance e a subjetividade dessa variação. É possível que muitas coisas não possam ser medidas, pelo menos com a tecnologia atual. É possível medir uma enchente? Sim, mas quais são os parâmetros? Volume de água que saiu do leito do rio, volume de água que foi absorvido pelo solo, área invadida, altura das águas, um valor monetário refletido pelo prejuízo dos moradores, enfim, podemos pensar mil variáveis para esse problema, mas somente *nós* podemos dizer quais delas seriam realmente relevantes. Reflita sobre estes questionamentos.

Existe um contexto evolutivo e histórico relativo à chamada por todos como “teoria da evolução”. Assim ela aparece nos livros acadêmicos como um vasto domínio de conhecimento, com múltiplas facetas, as quais envolvem preceitos, explicações que sumarizam diversos modos e perspectivas, pelas quais podemos nos aproximar deste vasto domínio. O objeto de todas essas teorias é a transformação dos organismos durante o tempo. Dentro deste contexto apresentam-se diferentes disciplinas evolutivas, como a genética de populações, ecologia teórica, sistemática, biogeografia, morfologia e embriologia comparadas. Cada uma delas aborda as transformações exibidas pelos seres vivos a partir de diferentes pontos de vista, métodos e objetivos. Muitas vezes estas disciplinas comportam ou supõem outras ideias, às vezes mais gerais, outras vezes mais específicas, mais formalizadas, outras menos formais.

Uma teoria de verdade seria uma versão axiomática (formalizada) desses construtos. Porém, no caso da teoria evolutiva, esse contorno ainda não está bem definido.

É possível inclusive, verificar que dentro deste conhecimento, certas questões parecem incompatíveis, ou pelo menos, de difícil integração. Veja o caso da dificuldade de se compreender as relações entre as disciplinas de **genética clássica e genética molecular**<sup>2</sup>, que tratam praticamente do mesmo assunto, sob óticas distintas. Isso não impede que possamos utilizar seus conceitos, ora de uma disciplina ou de outra, indistintamente, sempre que precisamos. Possivelmente teremos que aceitar que várias incongruências coexistam dentro de um vasto campo de conhecimento como o é a evolução e que as várias abordagens não precisem necessariamente ser compatibilizadas.

Desta forma, a informalidade da teoria evolutiva é característica das **ciências empíricas**<sup>3</sup>. Buscar o raciocínio rigoroso, encadenado e rigidamente conceituado dentro da biologia geral, exceto pelos ramos confinados dentro da matemática ou lógica, torna-se uma atividade seriamente frustrante, face das lacunas, contradições, imprecisões e empirismo na apresentação de suas ideias. Discutir a biologia evolutiva hoje não é tarefa fácil, pois depende de escolhas. Verifique que, diferentes autores apresentam as mais diversas abordagens ao problema, tornando-a assim repleta de subjetividade. Essa subjetividade, entretanto, não impede que seja um dos mais importantes e talvez a teoria em ciência, que seja mais unificada, dentro de seu escopo, que é a biologia.

### 1.1 Breve histórico da biologia evolutiva

A vida, dentro de sua complexidade, sempre foi assunto de curiosidade e problematização. Dentro da Antiguidade Clássica, os gregos e seus grandes filósofos, como Platão e Aristóteles, reservavam extensas discussões sobre os organismos. Aristóteles valorizava a observação detalhada da natureza. Fazia constantes dissecações em animais, porém nunca em seres humanos. Discutiu sobre a reprodução animal e formulou a teoria da “pangênese” e argumentou que o filho de um pai mutilado não nasce mutilado. Empédocles concluiu que as diferentes partes dos animais se juntavam para formar animais bem e mal organizados. Os primeiros sobreviviam e os segundos teriam perecido, resvalando na questão da seleção natural. Platão destacou-se pela matemática para a compreensão dos fenômenos enquanto Aristóteles valorizava as soluções empíricas.

<sup>2</sup>Genética Clássica e Genética Molecular: A genética se divide em três áreas básicas superpostas, com objetivo mais didático do que prático: a genética clássica, molecular (ou de transmissão) e populacional. A primeira envolve técnicas e métodos anteriores ao advento da biologia molecular. Com a descoberta da estrutura da informação genética, enzimas de restrição entre outras ferramentas. Preocupa-se com os modos de transmissão da informação genética, os genes, genomas, cromossomos etc. A genética populacional envolve a distribuição e as alterações das frequências dos alelos que estão sob a influência das forças evolutivas, explicando a adaptação e a especiação, envolvendo também a genética quantitativa.

<sup>3</sup>Ciências empíricas: ciências que utilizam o chamado método científico. Consideremos empírico como sinônimo de experimental. Portanto, são ciências que se baseiam no método científico, o qual utiliza a observação e a experimentação.



## Saiba mais

Pangênese: hipótese atribuída ao filósofo grego Hipócrates, onde cada órgão do corpo produziria gêmulas, as quais teriam o poder de transmitir a hereditariedade. Estas gêmulas se agregariam, sendo encaminhadas ao sêmen, transmitindo as características para o filhote. Portanto, somente o pai era o responsável pelas características hereditárias, desconsiderando o papel das mães. Foi contestada por Aristóteles, que propôs que tanto a mãe quanto o pai teriam papéis iguais na liberação do material genético para os filhos. Como Buffon, Darwin eventualmente postulou que partículas invisíveis contribuíam para a herança da variabilidade. Futuramente, Leeuwenhoek (1667) descobriu a presença do espermatozoide no sêmen instaurando a teoria pré-formista. Somente no século XIX com avanços na microscopia foi que se verificaram os óvulos e os espermatozoides e seus respectivos papéis na formação do zigoto.

Quando **Charles Robert Darwin** apresentou sua sexta edição da *Origem das Espécies*, no ano de 1872, ele apresentou um compêndio histórico, citando 34 autores que anteciparam a ideia da evolução dos seres vivos (sem a ideia da seleção natural). Os autores que Darwin queria homenagear incluía Aristóteles, Louis Leclerc de Buffon, Jean-Baptiste Lamarck, Etienne Geoffroy Saint-Hilaire, William Charles Wells, Patrick Matthew e Herbert Spencer. A ideia da seleção natural, Charles Darwin concedeu somente à Alfred Russell Wallace.

A teoria da seleção natural foi apresentada por **Charles Robert Darwin** e **Alfred Russell Wallace**, conjunta e oficialmente em 1858 e Darwin publicou sua primeira edição de *A Origem das Espécies* em 1859, um ano após. A teoria que ele apresentou fornece inúmeras explicações para as transformações dos seres vivos ao longo das eras e para a origem das variações e adaptações biológicas. Exaustivamente debatida, ela começou a ser aceita somente ao final do século XIX.

Alguns teóricos postulam que não existem “teorias evolutivas” (no plural), de forma que a teoria da evolução já se constitui como um corpo teórico muito coerente, apenas com algumas questões em aberto e muitas discussões acirradas sobre várias controvérsias em seu interior. A teoria elaborada por Darwin em 1859 é solidamente corroborada, porém continua recebendo ataques de muitas partes. A teoria da evolução busca explicar a mudança das formas de vida pelo estudo das relações que ocorrem entre os organismos uns com os outros e entre eles e os contextos naturais em que estão inseridos.

A teoria darwiniana evidencia a “realidade” evolutiva: as espécies biológicas não são fixas num cenário imóvel de criação única, mas estão sim, constantemente sujeitas à transformação. Os mecanismos, os tempos e as modalidades dessa incessante evolução das formas orgânicas por divergência de antepassados comuns é fornecida pela base dessa teoria. A teoria também tenta determinar os princípios de raciocínio com base em uma ciência histó-

rica da natureza que, não obstante a fragilidade e a fragmentação dos dados de observação (como os fósseis, por exemplo) tenha a mesma dignidade das ciências experimentais.

Os trabalhos individuais de Darwin estão impregnados de admiração pela diversidade individual da extraordinária complexidade de formas elaboradas pela natureza, durante o curso evolutivo. Seus trabalhos individuais consistiram em entender como ocorria a fecundação de orquídeas pelos insetos, também nas minhocas e sua importância na agricultura, formação dos atóis de coral, sobre plantas parasitas, melhoramento genético em geral, biogeografia, botânica, experimentação em geral e psicologia animal.

Assim, o trabalho de Darwin consistiu em duas observações independentes, porém ligadas e uma conclusão que ele dizia ser "inevitável": a) os organismos apresentam como sua propriedade mais evidente a sua variabilidade individual. Pelo seu trabalho com animais domesticados, como os pombos e melhoramento genético, ele verificou que uma certa porcentagem dessa variabilidade individual era herdada, b) os organismos produzem muito mais descendentes ao que o ambiente pode suportar e evidentemente nem todos poderão sobreviver. Esta afirmação é atribuída à sua leitura de um tratado de 1838, de um economista inglês: **Thomas Malthus**<sup>4</sup>, o qual afirma a famosa colocação de que o alimento crescia aritmeticamente e as populações dependentes dele cresciam exponencialmente. A decorrência destes dois fatores era que os sobreviventes sobreviviam porque pelas suas próprias variações, eram favorecidos pelo ambiente e assim deixavam mais sobreviventes. Gradualmente havia um acúmulo dessas variações favoráveis na população, em decorrência da seleção natural.

**Jean-Baptiste Lamarck** foi um naturalista francês, um dos primeiros a perceber que havia mudança nas espécies ao longo do tempo. Nas suas publicações ("*Phylosophie Zoologique*", de 1809), ele argumenta que as espécies mudam ao longo do tempo e transformam-se em outras espécies. Entretanto, o modo como essas mudanças ocorriam é chamada atualmente de "transformismo", em contraponto ao "gradualismo" de Darwin. Lamarck ficou especialmente conhecido hoje em dia pelo seu mecanismo de transformação que é a **herança dos caracteres adquiridos**<sup>5</sup>.

Lamarck sugeriu que as modificações adquiridas pelo indivíduo seriam transmitidas aos seus descendentes. Porém, sabemos que esta ideia foi concebida pelos filósofos gregos. A espécie teriam um grande papel de fazer um "esforço" para atingir um tal patamar de modificação, a exemplo das girafas que esticariam, geração por geração, seus longos pescoços para alcançar as folhas mais altas dos topos das árvores. Lamarck e seus seguidores pontuavam que, estruturas vestigiais, não funcionais, aparentes no desenvolvimento embrioná-

<sup>4</sup>Thomas Henry Huxley: zoólogo, (1825 - 1895). Grande advogado do Darwinismo escreveu vários ensaios sobre tópicos da ciência, filosofia, religião e política. Entre seus trabalhos mais importantes, destacamos: "The Physical Basis of Life" (1868) – (ou "Bases Físicas da Vida"), "On the Hypothesis that Animals are Automata" (1874) – (ou "Hipóteses sobre a Automação dos Animais") e "Ethics and Evolution" (1893) – (ou "Ética e Evolução").

<sup>5</sup>Herança dos caracteres adquiridos: também conhecida como lei do uso e desuso. O uso e desuso de partes do corpo provocariam alterações no organismo que os contém. Estas alterações seriam transmitidas aos descendentes pela transmissão das características adquiridas. As novas espécies surgiriam pelas alterações daquelas já existentes. Também são chamadas de transformistas por propor que elas são importantes na evolução dos organismos.

rio, mostravam que organismos diferentes entre si compartilhavam um plano estrutural comum. Quaisquer similaridades entre organismos ocorriam devido às funções comuns, não à ancestralidade.

O papel de Lamarck no contexto histórico da biologia evolutiva, na verdade, foi no sentido enviesado de que muitos pensadores foram violentamente contra seus postulados. A reação contra foi tão grande, que de certa forma a teoria fixista tornou-se uma verdadeira ortodoxia entre os biólogos da época, notadamente pelo seu maior defensor, o anatomista **Jean Léopold Nicolas Frédéric Cuvier**. A escola deste anatomista estudava anatomia de animais buscando entender como ocorriam os planos fundamentais dos organismos e como elas seriam formadas.

Cuvier insistia que a integração funcional dos organismos levava a uma *ramificação*, classificando os animais em apenas quatro ramos: Vertebrata, Articulata, Mollusca e Radiata. Para ele, estas ramificações eram fundamentalmente diferentes umas das outras e não eram conectáveis pela ancestralidade. No século XIX, a maioria dos biólogos e geólogos seguiam os preceitos de Cuvier. Cada espécie então tinha uma origem individual e permanecia constante até ser extinta.

Foi neste contexto que surgiu Charles Robert Darwin, formando suas próprias ideias. Como naturalista a bordo do *Beagle*, no período de 1832 a 1837 coletou e catalogou centenas de espécies ao redor do mundo, retornando posteriormente à Londres. Começou então a arrumar suas anotações e buscar uma teoria evolutiva que pudesse perpassar todas as observações que fez nos longínquos lugares onde andou, mas que ao mesmo tempo também explicasse a evolução dos pombos em seu quintal.

## 1.2 A teoria da evolução de Darwin

A teoria da evolução é nosso pano de fundo para o entendimento da diversidade da vida. Na verdade, foi uma virada revolucionária no pensamento ocidental. Não há dúvidas que os naturalistas antigos intuíram que os seres vivos evoluíam, de forma que suas características e seus comportamentos variavam conforme o tempo passa. Darwin teve um mérito inigualável de, por toda a sua vida, coletar, reunir e avaliar provas empíricas e embasar amplamente a teoria da evolução.

Este esboço foi publicado somente no ano de 1859, somente 21 anos após a sua famosa viagem, apesar de ter começado a pensar nisso em 1838, esboçando seus pensamentos em 1842. Nesse meio tempo trabalhou arduamente com os cirripédios (crustáceos minúsculos que vivem agarrados às pedras), buscando novas provas para o processo de seleção natural. So-

mente com o aparecimento do ensaio análogo de Wallace, em 1859, que ele tomou a decisão de publicar seu texto, em maturação por três anos. Essa teoria embasou discussões fundamentais da época, destronou o “fixismo”<sup>6</sup>, ou seja, a realidade da evolução mostra que as espécies não são fixas num cenário imóvel, idílico e idealizado, fundamentado no **essencialismo aristotélico**<sup>7</sup>. Segundo, propôs mecanismos, tempos e formas naturais que divergem e diferenciam-se de seus ancestrais comuns.

A teoria da evolução fundamenta então uma ciência histórica da natureza, que, apesar da disposição fragmentada dos dados de observação, possui a mesma dignidade das ciências experimentais. Graças ao seu trabalho com métodos de seleção artificial nos melhoramentos genéticos de plantas e animais observou a variabilidade natural que ocorre nas proles e como elas podem ser alteradas. A interpretação do trabalho de Thomas Malthus o levou também a estas conclusões.

As conclusões deste trabalho, as quais o autor chama de “inevitáveis” podem ser resumidas: os organismos apresentam, como propriedade mais importante, a **variabilidade individual**, que por certa porcentagem, é herdada de seus pais e ancestrais. Segundo ponto é que, via de regra, os organismos têm um número de descendentes sempre maior que o ambiente pode sustentar e, por conseguinte, nem todos sobreviverão. Terceiro, é que esses descendentes, por terem melhores condições de vida, podem reproduzir-se ou, ter maior número de descendentes. O sucesso na reprodução é a acumulação de variações favoráveis, pela seleção natural.

Darwin postulou as teorias da evolução e da seleção natural, criando o evolucionismo darwiniano. A teoria rompia com princípios do senso comum e às convicções imutáveis de séculos. Darwin desafiou as ideias de que o mundo era imutável e de que a Terra teria apenas 4 mil anos e não alguns milhões ou bilhões que seriam necessários para que ocorra a evolução.

Devemos lembrar que Darwin sempre fez questão de afastar as implicações sociais e políticas sobre sua “luta pela sobrevivência”. O que ele chamava de “luta pela sobrevivência” devia ocorrer nas complexas inter-relações ecológicas entre os organismos e seu ecossistema e não se referia a qualquer tipo de **conotação humana social**<sup>8</sup> ou política. Uma frase deveras funesta e infeliz foi a famosa “*sobrevivência do mais apto*” que muitos utilizam erroneamente como síntese da mensagem da teoria evolutiva.

Na boca de muitos virou justificativa para várias utilizações de cunho racial e social. A autoria desta frase nem mesmo é de Darwin e sim de **Herbert Spencer** nos anos de 1860, adotada primeiro por Alfred Russel Wallace e depois, muito reservadamente por Darwin na sua sexta edição da *Origem das Espécies* (1872). Ao contrário, a teoria da seleção natural é que transpôs

<sup>6</sup>Fixismo: também chamado de criacionismo. O fixismo pretende explicar o surgimento dos seres vivos de forma especial, sendo que cada espécie seria prevista e projetada, adaptada ao ambiente para onde foi criada. Assim, não haveria um antepassado comum a todas as espécies. Perfeitas em seus respectivos habitats, as espécies não mudam, mesmo considerando o tempo geológico, pois o fixismo não entende ou não aceita as evidências concretas da evolução, como o registro fóssil. O aparecimento e a extinção de espécies não existem. Na atualidade, o fixismo se modernizou, incorporando aspectos científicos em seus argumentos contra a evolução das espécies.

<sup>7</sup>Essencialismo Aristotélico: podemos chamar de mundo contemplativo, os seres humanos aspiram ao bem e à felicidade, através de uma conduta virtuosa, buscando chegar à perfeição. Animais e plantas “aspiram” a ser perfeitos em sua essência. Originalmente foi apresentada por Aristóteles, porém foi influenciada por Platão. Os organismos estariam organizados em um plano eterno e imutável e quando assim formados, não teriam a possibilidade de serem alterados em suas características essenciais e perfeitas. Estas ideias formaram a base do fixismo.

<sup>8</sup>Darwinismo social:

O termo Darwinismo social surgiu no rastro do sucesso das teorias evolucionistas, motivando correntes de ideias nas ciências humanas e sociais. O objetivo, na época era, principalmente, tentar explicar a pobreza resultante da revolução industrial, sugerindo que os mais pobres eram indivíduos “menos aptos” (não importando o que isso queira dizer). Mais ainda, era usado para justificar o abuso do imperialismo europeu marcante na época. Mais atacado do que adotado, caiu em desuso e totalmente abolido. Posteriormente, deu lugar à ciência da Sociobiologia, a qual utiliza os diferentes campos da biologia para explicar comportamentos humanos em sociedade.

para o fenômeno da vida o que o economista Adam Smith postulou para a ordem econômica.

Ernst Mayr, eminente biólogo, define a teoria darwiniana dividindo-a em cinco “partes”:

**a) A evolução é fato e não teoria**, o mundo natural é governado por forças invisíveis, porém constantes e mecânicas, sem qualquer fundo de direcionamento.

**b) Todas as espécies descendem de um tronco central** que se divide e ramifica com o passar do tempo em um processo contínuo de ramificações. Ou seja, podemos ver a vida como uma grande árvore, a qual se entronca com poucos ramos na sua base e muitos ramos pequenos na parte de cima. A partir de descendências e derivações os seres humanos também se inserem nesta árvore e não são especiais.

**c) Para que novas espécies apareçam deve ocorrer variação dos indivíduos e conseqüentemente das populações.** Assim, as espécies não são imutáveis, porém se transformam incessantemente dentro do tempo de aparecimento das variações individuais.

**d) A mudança é gradual e ritmada** por acúmulo das pequenas graduações e se estendem em larga escala pelas gerações.

**e) A seleção natural é a força motriz da evolução.** Seleciona os mais adaptados dando sucesso a poucos portadores de mutações vantajosas. Estes podem continuar enquanto que aqueles que não contêm estas vantagens são sumariamente perdidos ao longo do tempo.

A seguir, são listadas as principais proposições da teoria Darwiniana, compilados a partir da “*Origem das espécies*”:

1. Atos sobrenaturais são incompatíveis com os fatos empíricos da natureza.
2. Toda a vida evolui de um, ou poucos mais, tipos de organismos.
3. As espécies evoluíram de variedades pré-existentes por meio da seleção natural.
4. O nascimento das espécies é gradual e de longa duração.
5. Grupos superiores (gênero, família etc.) evoluem pelos mesmos mecanismos que aqueles responsáveis pela origem das espécies.
6. Quanto maior as similares entre *taxa*<sup>9</sup>, mais fortemente correlacionados e evolucionariamente relacionados menor o tempo da sua divergência a partir de seu último ancestral em comum.
7. A extinção é primariamente o resultado de competição interespecífica.
8. O registro geológico é incompleto: a ausência de formas transicionais entre espécies e grupos superiores é devida à falhas do nosso atual conhecimento.

<sup>9</sup>Taxa: em latim, o plural de táxon é taxa. Nosso sistema de classificação segue os métodos estabelecidos por naturalistas dos séculos XVII e XVIII, especialmente os do sueco Carl von Linné. O sistema lineano expressa a Nomenclatura Binomial na designação das espécies e as organiza em categorias hierárquicas (táxons) para sua classificação.

O conceito de que todos os organismos da Terra teriam evoluído a partir de organismos pré-existentes comuns não foi inventado por Darwin ou Wallace. Podemos ver que a ideia básica de evolução pode ser traçada de volta às ideias de alguns filósofos gregos. Entretanto, Darwin resumiu um coerente corpo de observações que solidificaram o conceito de evolução numa verdadeira teoria científica.

Darwin propôs que as modificações deveriam ser leves e sucessivas (evolução gradualística ou *gradualismo*<sup>10</sup>). Na época, os registros fósseis ainda eram muito fragmentados. De fato, os primeiros registros fósseis (do período antes do Cambriano) eram totalmente desconhecidos ou inexplorados. Darwin concluiu que, para que sua teoria de evolução seja válida, as criaturas aquáticas devem ter existido antes do aparecimento evolucionário dos primeiros organismos de concha dura (como os trilobitas) no período Cambriano a cerca de 550 a 500 milhões de anos atrás. Um dos dilemas de Darwin, o desaparecimento dos fósseis do pré-cambriano, foi usado como maior argumento contra sua proposta 1. Este dilema está, na verdade, longe de realmente existir. Os pesquisadores tem explorado o Pré-cambriano em detalhes. Hoje sabemos que a vida é muito mais velha que se acreditava na época de Darwin. Também sabemos que as antigas formas de vida foram antecessoras de todos os organismos subsequentes.

### 1.3 Seleção natural

A evolução pela seleção natural envolve uma ideia simples e intuitiva: a de que os organismos podem ser modificados e que essa modificação pode ocorrer em todos os níveis, desde os mais básicos e microscópicos, como a bioquímica da célula, a sequência do DNA, entre outros, como a macroscópica, envolvendo tecidos, variação individual, comportamento e ecologia. Importante lembrar e faremos isso sempre, ao longo desta obra, é que a evolução pode iniciar-se a partir de um único indivíduo, mas somente *pode ser analisada ao longo de gerações, populações de indivíduos, grupos e ecossistemas*. É preciso então, muito cuidado com o que chamamos de evolução. Não é qualquer mudança que constitui evolução, conforme buscaremos esclarecer posteriormente. O entendimento destas questões é essencial para evitar mal entendidos.

Portanto, muita fecundidade dos organismos, aliada à competição acirrada pela sobrevivência nas espécies pode fornecer as condições iniciais para a nossa definição de seleção natural. Quando olhamos a seleção através de uma sequência de ideias biológicas lógicas, temos quatro condições básicas que devem sempre ser observadas:

**a) Possibilidade de reprodução:** só é possível evolução se (e somente se) os organismos tiverem reprodução, formando novos indivíduos, ao longo de

<sup>10</sup>Gradualismo: consiste na seleção e variação que acontece de forma gradual. Pequenas e sutis variações atingem os organismos tornando-os cada vez melhores e mais adaptados ao seu ambiente. Sobre um longo período de tempo, a população irá mudar. Essa mudança é lenta, constante e consistente.

muitas gerações. Gerações reproduzem-se, formam novas gerações e assim por diante. Basicamente, conhecem-se dois tipos: sexuada ou assexuada. Dentro desta categoria incluem-se inúmeras variantes.

**b) Os organismos possuem herança:** a herança pode ser definida, na genética, como a aquisição ou predisposição de organismos a apresentar semelhanças ao organismo que o gerou. Os organismos recebem e transmitem informações genéticas que se tornam características fenotípicas através da reprodução. Sabemos que são os genes, os responsáveis diretos pela hereditariedade. Esses genes, de forma geral estão na forma de alelos que tem herança mendeliana ou não. Indivíduos possuem uma hereditariedade individual e a espécie tem uma hereditariedade própria a cada uma. Assim, ratos dão origem a ratos similares aos pais, que são similares aos avós e assim por diante. Seres humanos são mais similares aos seus pais do que com outras pessoas indistintamente.

**c) A população apresenta variações entre seus membros individuais:** um caráter é uma característica, como cor de flor, número de sementes, altura etc. A população de hoje é ancestral da anterior que irá produzir uma próxima descendência. Os diferentes indivíduos devem diferir uns dos outros por um número variável de características. Cada indivíduo possui uma ou outra característica diferenciada de seu irmão ou de outro parente.

**d) Os indivíduos variam quanto à sua capacidade reprodutiva:** que em genética é chamada de aptidão (em inglês: *fitness*). Esta variação é um termo técnico, bem definido, que é o número de descendentes diretos deixados pelo indivíduo em relação à média populacional. Assim, assumimos que alguns indivíduos podem deixar mais descendentes que outros e que essa aptidão reprodutiva está relacionada a alguma característica (ou várias) que o tornou mais apto a isso, em comparação com outros. (Lembre-se: não confunda esta palavra com o sentido atlético que encontramos hoje em dia!).

Entendemos então, que só é possível estender estas questões todas ao conceito de espécie. Caso uma delas não ocorra, *não há seleção natural*. Vejamos: se a espécie não se reproduz, não há seleção natural. Se não há variação ou se ela não é herdada, não há seleção natural e assim por diante.

Um bom exercício para entendermos o que seria evolução por seleção natural seria tentar encaixar exemplos que possam ser atendidos pelas propriedades acima. Peixes se reproduzem, herdam características (nadadeiras longas, por exemplo), variam suas características entre seus indivíduos e os diferentes indivíduos divergem quanto à sua aptidão reprodutiva (talvez alguns peixes com nadadeiras maiores tenham mais sucesso que outros com nadadeiras menores). Portanto, peixes certamente *sofrem* seleção natural. Cristais de gelo têm variação individual (cada cristal de gelo possui variação na sua

forma), mas cristais de gelo não se reproduzem, então as outras três condições (herança, variação individual e aptidão reprodutiva) também não funcionam. Podemos dizer que cristais de gelo *não* evoluem por seleção natural.

As duas primeiras condições então se mostram particularmente fundamentais. Não há o que questionar em termos de que, organismos se reproduzem e que apresentam herança. As propriedades que podem ocorrer em termos de reprodução e tipos diferentes de herança certamente são muito importantes. Bactérias se reproduzem rapidamente, porém ratos levam cerca de 28 dias, enquanto que os elefantes levam quase dois anos para gestar a próxima geração. Estas diferenças devem ser entendidas como propriedades importantes que podem garantir a sobrevivência da espécie em um dado ambiente. A herança de uma característica (na grande maioria das vezes) é mendeliana, segregando os alelos de acordo com as leis de Mendel, como cor de semente em ervilhas, albinismo na espécie humana etc. Existem características que são quantitativas, com polialelismo, como número de sementes, peso de sementes, altura na espécie humana etc. Estas informações sobre o tipo de reprodução e o tipo de herança são essenciais no entendimento da seleção natural.

A variação biológica então merece mais questionamentos, pois pode ocorrer em níveis diferentes de organização. Esses níveis de organização podem ser caracterizados, desde a morfologia em si, como a forma de partes ou do todo de um organismo até os níveis mais básicos, microscópicos e moleculares, que a princípio, ninguém detectaria, a menos que tivesse um sequenciador de DNA disponível. Pense agora que *nem todas* essas variações são herdáveis e, portanto, não estão fazendo parte da evolução da espécie em questão. Um exemplo, as mutações no genoma das células somáticas de um organismo A só serão transmitidas ao seu descendente B se ocorrerem nas pré-células germinativas. Não importa em que momento ocorreu se na infância, na época reprodutiva etc. O descendente B só recebe as alterações genômicas do organismo A que vieram de seus óvulos ou espermatozoides. Suponha que A tenha tido um câncer de fígado, por exemplo. Isso não significa que B irá também ter a mesma patologia. Portanto, o câncer que A teve pode não ser herdável. Porém, se A transmitiu esse gene defeituoso para B, através de seus gametas, então sim temos uma variação herdável. Se B transmitir esta variação a C e assim por diante, dizemos que a variação é herdável.

## 2. Impactos e tendências da biologia evolutiva

Não é novidade que o trabalho apresentado por Darwin e seus defensores foi violentamente atacado em seu início. Na verdade, poucos compreenderam e muitos mais não aceitaram os postulados darwinianos.

<sup>11</sup>Sistemática Filogenética: sistemática baseada estritamente na evolução. Historicamente, a chamada Escola Fenética surgiu nos anos de 50 e 60, também chamada de taxonomia numérica. Esta classificação se baseava na ideia de maior semelhança na forma geral, baseando-se num método numérico bastante objetivo, intimamente relacionado com o desenvolvimento dos primeiros computadores, porém não levava em conta a evolução. Foi extinta, com o aparecimento, a partir da década de 70, da chamada “Escola Filogenética” (ou Cladismo), ou também chamada de Sistemática Biológica já que leva em consideração a estrita evolução dos grupos, por meio de métodos objetivos de avaliação das relações de parentesco, delimitando assim, grupos naturais, buscando compreender as origens da biodiversidade.

<sup>12</sup>Macromutação: para entender o contexto micro e macro evolução, temos apenas de refletir sobre a escala das mudanças evolutivas. Nos estudos de macroevolução avaliamos mudanças a partir da espécie ou de táxon mais elevado. Na microevolução que tem como objetivo a espécie ou populações dentro das espécies. Um exemplo de macroevolução é o aparecimento das penas nas aves (grupo acima de espécie). Evidentemente, podemos considerar a macroevolução como um conjunto de eventos de microevolução. A diferença entre os dois pode ser escala e tempo considerados.

A partir do impacto inicial e à medida que se tornou mais palatável, os impactos do Darwinismo sobre as Ciências Biológicas foram imensamente grandiosos, como por exemplo, os biólogos sistematas, anteriormente voltados unicamente à classificação dos organismos, passaram também a tentar descobrir a história evolutiva de seus objetos de estudo. Assim a **sistemática filogenética**<sup>11</sup> passou por um renascimento nos últimos 30 anos, desenvolvendo métodos de dedução da história filogenética dos organismos e mais recentemente, os dados foram enriquecidos pela biologia molecular, assim, a sistemática não só pode comparar as características morfológicas dos organismos, como também comparar as sequências do DNA.

As novas *relações* entre os organismos envolveriam então um passado comum, o que significa que todos nós temos ancestralidade comum com outros organismos. Entretanto, alguns pontos das teorias de Darwin, evolução e seleção natural não foram compreendidos justamente porque a ciência da época ainda estava amadurecendo. O próprio Darwin não podia explicar tudo, como por exemplo, as lacunas do registro fóssil. Outra crítica era de que a teoria não explicava muito bem a questão da hereditariedade.

As teorias da hereditariedade da época eram totalmente erradas, porém Darwin aceitava algumas delas. Darwin deixou claro que elegia a teoria da “miscigenação”, onde as características da descendência eram uma mistura dos progenitores. Essa ideia é totalmente contra a seleção natural, pois como poderia haver seleção se os organismos eram uma mistura de seus antecessores? Se isso for verdade, rapidamente uma população se torna homogênea e quaisquer variações surgidas seriam perdidas nesta miscigenação. Outro problema enfrentado era a força dos neo-lamarckistas, o que o próprio Darwin deu crédito algumas vezes. Esta discussão só foi encerrada com a redescoberta do trabalho de Mendel. Na verdade, até hoje existem pesquisadores que se deslumbram com a possibilidade de herança dos caracteres adquiridos!

Podemos imaginar então que a redescoberta do trabalho de Mendel, nos idos de 1900 (Charles Darwin morreu em 1882), da herança particulada fosse dar novo fôlego ao Darwinismo, mas inicialmente, foi tomada como um golpe mortal para a mesma. Alguns responsáveis por essa quase derrocada foram **Hugo de Vries**, **William Bateson** e outros, os quais eram pioneiros no renascimento do mendelismo. O que eles levantaram em termos dos postulados mendelianos foi exatamente contra o gradualismo, já que o mendelismo mostra que as variações são justamente não contínuas. Estes autores sugeriam que a evolução acontecia em grandes saltos, envolvendo mutações, estudando a herança das grandes diferenças entre organismos, por exemplo, por **macromutação**<sup>12</sup>. Esta diferencia radicalmente a prole de seus genitores, sendo herdada geneticamente.

Mesmo o Mendelismo teve no seu início, opositores, no início do século XX, especialmente pesquisadores chamados de biometristas, os quais estudavam as pequenas variações entre os organismos, deixando as grandes de lado, como o pesquisador Karl Pearson.

Enfim, se a espécie podia surgir de uma mutação, não haveria necessidade da seleção natural, descartando a mudança gradual. De forma geral, no começo do século vinte houve um desânimo quanto ao Darwinismo, aguardando que outras premissas o renovassem, ou enterrassem de vez através de novas opções. A visão dos cientistas na época era que a tanto a evolução quanto a seleção natural necessitava de um reforço de complementação. Pois foi exatamente o que aconteceu.

## 2.1 A nova síntese

O problema da Biologia Evolutiva, no início do século XX, foi conciliar a genética mendeliana, a qual tinha tomado um corpo de conhecimento considerado e o trabalho dos biometristas que descreviam a variação contínua em populações. Essa conciliação foi obtida pelo trabalho de R. A. Fischer mostrando que a maioria das heranças descritas pelos biometristas era mendeliana. Portanto, resolveu-se de vez que, as características contínuas têm base mendeliana e que as características adquiridas não são herdáveis. Terminou a disputa entre os mendelianos e darwinistas, juntando-se as duas teorias numa só, ficando conhecida como síntese moderna, neodarwinismo, ou teoria sintética da evolução. Vários pesquisadores chegaram aos postulados básicos independentemente: Ronald Aylmer Fisher, J. B. S. Haldane e Sewall Wright. Estes autores escreveram grandes obras, todas no período ao redor de 1930.

Esta nova teoria é título de um livro de Julian Huxley: *Evolution: The Modern Synthesis (Evolução: A Síntese Moderna)*, em 1942. Finalmente a teoria da evolução de Darwin repousava num terreno firme da hereditariedade. As demonstrações dos geneticistas mostrando a segregação dos genes, formando cumulativo efeito fenotípico.

O contexto científico da época era extremamente rico, pois se experimentou um aumento no conhecimento biológico como poucas vezes foi visto. A genética de populações emergiu no início dos anos de 1900 por G. Hardy e W. Weinberg, os quais provaram independentemente o “teorema de Hardy – Weinberg” (veja o seu livro de Genética desta mesma coleção). Esta teoria mostra as mudanças nas frequências dos alelos sob a seleção natural, mostrando que até mesmo pequenas intervenções da seleção podem afetar e introduzir mudanças evolutivas. Thomas Hunt Morgan e seu aluno Bridges inovaram com a genética das moscas das frutas – *Drosophila melanogaster* (a chamada Idade de Ouro da Genética).

Os estudos evolutivos transformaram-se em matéria extremamente técnica, incluindo novas informações. Com a elucidação da estrutura do DNA, em 1953, por James Watson e Crick os estudos com mutações, variação genética dos alelos, novas teorias matemáticas e moleculares insuflaram de tal forma as Ciências Biológicas que em determinados momentos houve desafio à nova síntese. O próprio conceito de seleção natural tornou-se cada vez mais amplo, incluindo agora os próprios genes, indivíduos, grupos, populações e espécies. Comportamento dos animais e a ecologia também foram incorporados aos estudos da nova Biologia Evolutiva, tornando-a cada vez mais rica. Portanto, trata-se de um conhecimento em construção, permeando todas as áreas da biologia. Evidentemente, quanto mais conhecimento, mais controvérsias.

Portanto, o nome “Síntese” é muito apropriado, pois na verdade, a teoria darwiniana do início transformou-se em uma nuvem de conhecimentos, em diversas áreas. A *síntese evolutiva* informa que as populações de organismos contêm variação genética devido às mutações nos organismos, acontecendo ao acaso (de forma que não é dirigida adaptativamente) e pela recombinação gênica. Os estudos biológicos foram cada vez mais conduzidos e incorporados à teoria evolutiva. Cada vez mais os processos biológicos dependem da Biologia Evolutiva dos mesmos, ou seja, da história dos organismos.

A teoria da síntese apresenta como fato fundamental a especiação. Para que ocorra a formação de novas espécies deve haver isolamento geográfico de duas populações, permitindo assim que seus recursos genéticos entrem em divergência e possam realmente se separar genética e fisiologicamente.

Vimos que Darwin não conhecia um mecanismo que pudesse explicar a hereditariedade. Mendel e Watson/Crick mostraram que as variações herdadas podem correlacionar-se com entidades discretas chamadas genes, fragmentos de DNA. Apesar da maioria das vezes as alterações no DNA terem pouco efeito no fenótipo, pode ser cumulativa e juntamente com outros meios criar novas e variadas características, a partir de pré-existentes.

Através de mecanismos agora conhecidos como microevolução e macroevolução, ocorrem mudanças em pequena ou larga escala, respectivamente, nas frequências gênicas em uma população, que pode ocorrer até em poucas gerações. Essas mudanças acontecem em nível genotípico por vários processos moleculares: mutação, fluxo gênico, deriva genética e seleção natural, obviamente. No caso da macroevolução existem mudanças em larga escala nas frequências ao longo de um grande período de tempo, que pode até culminar numa nova espécie. Na verdade, a diferença entre as duas é sutil, porque a primeira é cumulativa. Na maioria das vezes, a teoria da síntese não distingue entre micro e macro evolução já que são causadas pelos mesmos fatores.

Um dos grandes problemas ao processo de seleção natural é o fato de não encontrarmos registros fósseis suficientes que apresentem o desejado efeito de uma transição suave entre as espécies. A teoria do “Equilíbrio Pontuado” explica o porquê de formas transitórias serem às vezes perdidas. Entretanto, muitos concordam que elas existem (as lacunas) simplesmente porque a fossilização é um evento raro e seria até ingênuo, que tenhamos a sorte de ter todas as peças de um quebra cabeça de milhões de anos disponível, ao nosso prazer!

A Nova Síntese está sendo um dos grandes desafios intelectuais da Biologia. Emergida das tradições de Darwin e Mendel, a evolução das espécies pode então ser explicada: a diversidade dentro de uma população surge da produção randômica de mutações e o ambiente atua para selecionar os fenótipos mais aptos. Aqueles organismos, animais e plantas capazes de se reproduzir podem transmitir seus genes e ganhar então vantagens. Estes genes incluem, por exemplo, aqueles que codificam enzimas com melhores taxas de síntese e globinas com melhor capacidade de carregar o oxigênio. Assume-se que os mesmos tipos de mudanças (mutações gênicas ou cromossômicas) que causaram as mudanças dentro das espécies pode também causar evolução de novas espécies. A acumulação dessas mutações juntamente com um mecanismo de isolamento reprodutivo para que essa acumulação se processe e um novo fenótipo pode então ser produzido.

Não somente pode explicar a evolução dentro de uma espécie como pode explicar questões medicamente relevantes como, por exemplo, certos alelos podem mostrar-se deletérios (a variante do gene da hemoglobina pode resultar em uma anemia) pode ser selecionado em certas populações.

## Saiba mais



### Contribuições a evolução biológica

**Charles Robert Darwin:** naturalista (1809 - 1882). Nascido em Sherwsbury, Inglaterra, perdeu sua mãe, Susannah Wedgwood Darwin, aos oito anos. Tentou ser médico em sua juventude, em Edimburgo, mas percebeu que não tinha vocação. Seu pai, Robert Waring Darwin, preocupado com sua indefinição profissional, decidiu que o filho devia então orientar-se para o Clero, de forma que o mandou para Cambridge, para o Christ's College, formando-se em Teologia em 1831. Era então um jovem apaixonado pela natureza, especialmente pela botânica e entomologia. Logo se tornou amigo de reconhecidos cientistas locais: Robert Edmond Grant e William MacGillivray, John Stevens Henslow e Adam Sedgwick. Foi convidado pelo último a participar e o fez, a partir de seu embarque em 27 de dezembro de 1832, a uma viagem exploratória científica, no navio britânico H. M. S. Beagle. Darwin assumiu o papel de naturalista de bordo quando o titular voltou à Inglaterra. Coletou espécimes locais em Cabo Verde, Brasil, Galápagos e Nova Zelândia, enviando-os para os amigos da Grã Bretanha. A viagem durou cinco anos, de 1831 a 1836. Esta viagem deve ser vista como preparatória e essencial para o seu trabalho original. As relações verificadas em ilhas e terras continentais entre os animais vivos e extintos puderam estabelecer a interconexão dos fatos

com a provável modificação das espécies. Morreu em Down, Kent, em 19 de abril de 1882. É sabido, atualmente, que ele sofria da doença de Chagas, enfermidade tropical contraída em sua passagem pela América do Sul, causa da fragilidade que se acometeu da sua saúde até o fim da vida. Uma citação sua sobre o trabalho de naturalista "(...) o amor pela ciência, disposição para refletir pacientemente sobre qualquer tema, cuidado na observação e coleta de fatos, e uma razoável parcela de inventividade e bom senso”.

**Alfred Russell Wallace:** naturalista, (1823 - 1913), nascido em Usk, Monmouthshire na Grã-Bretanha. Um dos mais notáveis intelectuais do século 19. Cofundador da teoria da seleção natural, porém, nunca recebeu reconhecimento adequado. Teve uma vida sacrificada, deixando a escola e começando a trabalhar aos 14 anos. Começou sua carreira como naturalista interessando-se por botânica, posteriormente, viajando pelo Amazonas, de 1848 a 1950. Infelizmente toda a sua valiosa coleção foi perdida no incêndio que ocorreu na viagem de volta, porém suas anotações permitiram que publicasse um livro sobre a Amazônia. Posteriormente visitou o arquipélago malaio, entre 1854 a 1862. Em 1858 apresentou conjuntamente com Darwin um ensaio particular sobre a seleção natural e a evolução das espécies.

Este grande momento da primeira divulgação da teoria da seleção natural foi precedido pelo envio de um detalhado ensaio e uma carta sua sobre as ideias da seleção natural à Darwin. Darwin ficou mortificado. Apelou para seus influentes colegas, Lyell e Joseph Hooker para aconselhá-lo ao que fazer. Sem a permissão de Wallace, seus colegas decidiram apresentar seu ensaio juntamente com partes do livro ainda não publicado de Darwin, em uma reunião da Linnean Society of London, em 1 de julho de 1858. Estes documentos foram então publicados juntos no jornal da sociedade em 20 de agosto do mesmo ano, intitulado "On the tendency of species to form varieties; and on the perpetuation of varieties and species by natural means of selection". Wallace queixou-se posteriormente, que a impressão foi feita sem seu conhecimento e sem sua revisão. Este evento perturbou Darwin a ponto de querer abandonar a escrita de seu grande livro. Ao invés disso, acabou "resumindo" seu trabalho e publicando em novembro de 1859 seu famoso livro "On the Origin of Species".

Tornou-se posteriormente um grande escritor publicando cerca de 700 artigos e 22 livros. Os mais aclamados são *The Malay Archipelago*, *The Geographical Distribution of Animals, and Darwinism* ("O Arquipélago Malaio, A Distribuição Geográfica dos Animais" e "Darwinismo"). Tornou-se adepto da doutrina espiritualista, em contraponto ao materialismo científico da época, o que lhe rendeu muita ironia de seus colegas naturalistas, pois na época, a ciência era tratada como uma aliada ao materialismo.

**Thomas Robert Malthus:** economista inglês, (1766-1834). Foi uma das primeiras mentes que estudaram o crescimento populacional e sua relação com o bem estar. Estudou filosofia,

**Thomas Robert Malthus:** economista inglês, (1766-1834). Foi uma das primeiras mentes que estudaram o crescimento populacional e sua relação com o bem estar. Estudou filosofia, matemática e teologia em Cambridge tornando-se reverendo e professor de história e economia política no Colégio das Índias Orientais, próximo a Londres. Em 1798, Malthus publicou anonimamente, "An Essay on the Principle of Population, as it affects the future improvement of society". Malthus argumentou que o padrão de vida das massas não pode ser melhorado, pois "The power of population is indefinitely greater than the power of the earth to produce subsistence for man" ("o poder populacional é indefinidamente maior que o poder da terra em produzir a subsistência para o homem"). A população, segundo ele, quando não afetada pela guerra, fome ou doença, aumenta numa taxa geométrica enquanto sua subsistência aumenta em formato aritmético. Na metade do século 19, emergiu o chamado "neo-maltusianismo", parcialmente influenciado por Robert Owen, advogando o controle da população, especialmente àquelas mais pobres, teoria abandonada posteriormente pelos seus próprios criadores.

**Jean-Baptiste Pierre Antoine de Monet:** naturalista francês, (1744-1829). Cavaleiro de Lamarck. Nasceu em Bazentin-le-Petit, norte da França. De família nobre, foi o filho mais novo de 11 irmãos, ficando órfão aos 17 anos, foi soldado, bancário, escrevia textos para as enciclopédias e assim começou a dedicar-se aos estudos de medicina e botânica. Com a publicação de "Flore

Française” em 1778 (sob o mecenato de Buffon) Lamarck foi indicado como professor assistente do Jardim Botânico francês (“Jardin du Roi”), o qual, depois da morte na guilhotina de Louis XVI e Marie Antoinete, foi reorganizado como “Musée National d’Histoire Naturelle” (Museu Nacional de História Natural). Lamarck foi indicado para a área de invertebrados, assunto que ele pouco conhecia. Na verdade, a palavra “invertebrados” nem existia naquela época e foi Lamarck que a cunhou. Lamarck, apesar do pouco prestígio que gozava na época, tomou para si o desafio de organizar e classificar “insetos e vermes”, um novo campo da biologia. Lamarck publicou uma série de livros sobre zoologia dos invertebrados e paleontologia. Sua tese chamada “Philosophie zoologique”, publicada em 1890, mostrava claras evidências de suas ideias sobre a teoria da evolução. Seus trabalhos com invertebrados representaram um grande avanço sobre as classificações existentes. Foi o primeiro a separar os crustáceos, os aracnídeos e os anelídeos dos insetos. Além de classificar os moluscos e quebrou a tradição, removendo os tunicados de Molusca. Também antecipou a teoria de Schleiden & Schwann na teoria celular. Morreu sem reconhecimento e seu corpo foi dado como desaparecido com o tempo.

**Jean Léopold Nicolas Frédéric Cuvier:** anatomista francês, (1769 - 1832). Cuvier estudou os gatos e ibis mumificados obtidos pela invasão napoleônica no Egito e mostrou que eles não diferiam dos seus parentes vivos. Cuvier então utilizou estes argumentos para fundamentar o fixismo, ou seja, as espécies eram fixas no tempo. Organismos possuem corpos funcionais, qualquer alteração de uma de suas partes destruiria o delicado balanço. Ou seja, a função definia a forma e a forma não definia a função. Cuvier possuía uma legendaria habilidade de reconstruir organismos a partir de fósseis fragmentados, baseado nos seus princípios racionais. Era opositor de Buffon, Lamarck e Geoffroy St. Hilaire, que sugeriam que a morfologia animal poderia ser alterada e afetada pelas condições ambientais.

**Herbert Spencer:** filósofo e sociólogo inglês, (1820- 1903). Admirador da obra de Darwin e atraído desde cedo às ideias evolucionistas. Interessado na gênese científica, teoria das hipóteses, física, biologia e sociologia. Escreveu vários livros dando destaque à evolução (em termos gerais) como lei fundamental do Universo. Cunhou a frase “sobrevivência do mais forte” e deu início a uma corrente, denominada “Darwinismo social” onde tentava justificar a divisão da sociedade em classes.

**Ernst Mayr:** biólogo, (1904-2005). Ernst Mayr nasceu na Alemanha. Foi estudante de medicina, porém sua paixão por pássaros e biologia foi maior que os estudos médicos. Emigrou para os Estados Unidos e tornou-se curador do Museu Americano de História Natural trabalhando com a taxonomia de pássaros, enquanto formulava suas ideias sobre a evolução. Em 1942 publicou seu trabalho mais apurado: “Systematics and the Origin of Species” traduzido: “Sistemática e Origem das Espécies”. Mayr transferiu-se para a Universidade de Harvard em 1953, trabalhando como diretor da escola do Museu de Zoologia Comparativa, de 1961 a 1970. Desde então, ele publicou uma série de livros e capítulos e recebeu o prestigioso Prêmio do Japão para a Biologia em 1983. Mayr propôs em seu livro de 1942 que a teoria da seleção natural poderia explicar toda a evolução incluindo como os genes evoluem no nível molecular. Mayr propôs que quando uma população de organismos torna-se separada do grupo principal devido às questões geográficas e pelo tempo, eles eventualmente evoluem diferentes traços e podem eventualmente não serem mais intercruzáveis. Ele chamou estes traços de mecanismos de isolamento. “Without speciation, there would be no diversification of the organic world, no adaptative radiation, and very little evolutionary progress. The species, then, is the keystone of evolution”. Traduzindo de forma livre: “Sem a especiação, não haveria diversificação no mundo orgânico, não haveria radiação adaptativa e muito pouco progresso evolucionário. As espécies são a chave da evolução”.

**Hugo Marie de Vries:** botânico holandês (1848-1935). Professor de Botânica da Universidade de Amsterdam, onde começou seus experimentos genéticos com plantas em 1880. Seus experimentos de hibridização de plantas eram baseados nos experimentos de Mendel. Baseado nos seus próprios resultados, de Vries chegou às mesmas conclusões de Mendel.

Assim, ele publicou seu trabalho em 1900. Tornou-se um forte oponente da variação descontínua darwinista. De Vries confirmou que outras espécies surgem através de grandes e repentinas mudanças de características. Trabalhando com prímulas (*Oenothera lamarckiana*), ele observou que as plantas originais ocasionalmente apresentavam significativas variações em sua prole, como a forma da folha e tamanho da planta. De Vries acreditava que os descendentes "mutantes" eram novas espécies. Hoje sabemos que as variantes que o pesquisador isolou das prímulas são segregações cromossômicas aberrantes e não necessariamente mutações em genes específicos.

**William Bateson:** naturalista inglês (1861 - 1926). Consta que teria sido o pesquisador que teria cunhado o termo "genética". Evolucionista dedicado produziu estudos embriológicos que suportaram a ideia, em 1885, que os cordados evoluíram dos equinodermos primitivos, uma ideia agora totalmente aceita. Bateson notou que algumas características distintas frequentemente aparecem e desaparecem repentinamente em plantas e animais, o que o tornou reticente à variação contínua e gradual defendida pelos darwinistas. Juntamente com Hugo de Vries, Carl Correns e Erich Tschermak von Seysenegg foi um dos redescobridores do trabalho de Mendel. Ele traduziu o trabalho de Mendel para o inglês e junto com Reginald Punnett estendeu os princípios de Mendel aos animais. Infelizmente alguns de seus trabalhos foram desacreditados posteriormente, devido a problemas de interpretação dos dados genéticos na época.

**Karl Pearson:** estatístico inglês (1857 - 1936). Foi um dos maiores desenvolvedores da estatística, geneticista e biometrista. A famosa correlação de Pearson surgiu através de seus estudos envolvendo dados de altura de pais e filhos. Dedicou-se ao estudo da evolução de Darwin, aplicando os métodos estatísticos aos problemas biológicos relacionados com a evolução e hereditariedade. Escreveu um conjunto de 18 artigos denominados *Mathematical Contribution to the Theory Evolution* (1893-1912) ou *Contribuição Matemática para a Teoria da Evolução*, com contribuições extremamente importantes para o desenvolvimento da teoria da Análise de Regressão e do Coeficiente de Correlação, bem como do teste de hipóteses de Qui-quadrado. Infelizmente, era apaixonado eugenista, influenciado também pela ideia de "sobrevivência do mais forte" e seu impacto em nossa sociedade foi importante.

**Ronald Aylmer Fischer:** estatístico inglês (1890 - 1962) criador do famoso teste de Fischer e da equação de Fischer. Richard Dawkins chamou-o de "o maior biólogo desde Darwin". Foi geneticista de populações, trabalhando com ajustes de curvas de frequências, coeficientes de correlação (coeficientes de Fischer), análise de variâncias e técnicas de estimação de parâmetros, otimizando a avaliação de dados empíricos.

**John Burdon Sanderson Haldane:** naturalista inglês, (1862 - 1964), fascinado pela teoria Mendeliana da genética, foi o descobridor da ligação gênica (ou linkage), a qual ocorre entre diferentes alelos devido à sua proximidade dentro do cromossomo. Em 1933, tornou-se professor de genética na University College em Londres. Foi um dos fundadores da genética de populações. Foi o bioquímico responsável pelo entendimento da catálise enzimática.

**Sewall Wright:** biólogo americano, (1889 - 1988), foi um influente pioneiro na genética evolucionária. Formulou uma teoria matemática para a evolução, mostrando como as frequências de alelos e genótipos poderiam mudar a resposta às pressões evolucionárias da seleção natural, mutação e migração. Wright também examinou os efeitos do autocruzamento e da deriva genética na evolução e como isso influencia os vários métodos usados na análise evolucionária e a teoria do balanço genético.

**Thomas Morgan:** zoólogo americano (1866 - 1945). Nascido em Lexington, Kentucky, suas pesquisas com a *Drosophila melanogaster*, forneceram o fundamento da teoria cromossômica da hereditariedade e comprovaram o mendelismo. Formou-se em zoologia pela University of Kentucky e em biologia pela Johns Hopkins University, tornou-se um importante geneticista na Columbia University, juntamente com seus alunos e colaborado-

res Alfred H. H. Sturtevant (1891-1970), Calvin B. Bridges (1889-1938) e Herman J. Muller (1890-1967) publicaram “Mechanism of Mendelian Heredity” (Mecanismos da Herança Mendeliana, em 1915), em que descreviam o sistema dos genes e formulavam a teoria cromossômica da herança, descobrindo importantes princípios da Genética. Foi diretor do laboratório de biologia do California Institute of Technology, o Caltech (1928-1945), foi presidente da National Academy of Sciences (1927-1931) e da American Association for the Advancement of Science (1930). Ganhou o Prêmio Nobel de Medicina ou Fisiologia (1933) por descobertas sobre o papel dos cromossomos na hereditariedade.

### 3. Noções de evolução humana

O homem pertence à espécie *Homo sapiens*. Somos organismos placentários, da Ordem Eutheria. Nossos antepassados eram primatas arborícolas que deixaram as árvores possivelmente de 5 a 10 milhões de anos atrás. Os primatas possuem faces achatadas e cérebro grande. Essas características aproximam os olhos e deixam-nos com campo de visão mais amplo que outros mamíferos, garantindo a visão de profundidade, sem a qual seria impossível sobreviver nas florestas e savanas onde vivemos. A evolução humana é o longo processo de mudança pelo qual as pessoas se originaram a partir de ancestrais símiescos. Os chimpanzés atuais possuem um cérebro de 350 a 400 cm<sup>3</sup>. Os cérebros humanos atuais possuem 1.350 cm<sup>3</sup>. O cérebro humano pode ser considerado monstruoso, comparado aos chimpanzés.

A evidência científica mostra que os traços físicos e comportamentais compartilhados por todas as pessoas se originou a partir de ancestrais símiescos e evoluiu ao longo de um período de aproximadamente seis milhões de anos. Uma das primeiras definir traços humanos é o bipedalismo – a habilidade de andar sobre duas pernas – a qual evoluiu ao longo de 4 milhões de anos atrás. Em relação à anatomia, os cérebros grandes em relação ao tamanho do corpo são sempre associados à bipedalidade enquanto bipedalidade não é invariavelmente associada com cérebros grandes.

Outras importantes características humanas – além de um cérebro grande e complexo, são: a capacidade de fazer e usar ferramentas e a capacidade para a linguagem – desenvolvida mais recentemente. Muitos traços avançados – incluindo a expressão simbólica complexa, arte e diversidade cultural elaborado – surgiram principalmente durante os últimos 100.000 anos. Uma vez que uma criatura com cérebro do chimpanzé tem as características de andar ereto, torna-se um homínideo, e quando esse homínideo adquire características cranianas que sugerem um cérebro maior e quando artefatos são encontrados ao lado dos fósseis, torna-se um membro do nosso gênero *Homo*.

Os seres humanos são então, primatas. Semelhanças físicas e genéticas mostram que a espécie humana moderna, *Homo sapiens*, tem um relacionamento muito próximo a outro grupo de espécies de primatas, os macacos. Seres humanos e os grandes macacos (primatas de grande porte) da África - os chim-

panzês (incluindo bonobos, ou os chamados “chimpanzês pigmeus”) e gorilas – compartilham um ancestral comum que viveu entre 8 e 6 milhões de anos atrás. Os primeiros seres humanos evoluíram na África, e grande parte da evolução humana ocorreu naquele continente. Os fósseis dos primeiros seres humanos que viveram entre 6 e 2 milhões de anos atrás vêm inteiramente da África.

Os primeiros humanos migraram primeiro para fora da África para a Ásia, provavelmente, entre 2,0 milhões e 1,8 milhões de anos atrás. Eles entraram na Europa um pouco mais tarde, entre 1,5 milhão e 1,0 milhão de anos. Espécies de seres humanos modernos povoavam muitas partes do mundo muito mais tarde. Por exemplo, pessoas em primeiro lugar vieram à Austrália, provavelmente, nos últimos 60 mil anos e para as Américas nos últimos 30 mil anos ou assim. O início da agricultura e o aumento das civilizações ocorreram pela primeira vez nos últimos 12 mil anos.

Entretanto, nossa propriedade verdadeiramente única, como seres humanos é fisiológica. O andar ereto inclui características anatômicas especiais, tais como uma bacia estreita, a coxa virada para dentro e pés plantígrados. Na antiguidade as espécies que também andavam de forma ereta também mostram, na base do crânio, um forame occipital. Estes marcadores, para os paleontólogos são inconfundíveis, nos fósseis humanos.

A maioria dos cientistas atualmente reconhecem cerca de 15 a 20 espécies diferentes de seres humanos primitivos. Os cientistas não concordam, no entanto, sobre como essas espécies estão relacionados ou quais simplesmente desapareceram. Muitos dos primeiros da espécie humana – certamente a maioria deles – não deixou descendentes vivos. Os cientistas também debate sobre como identificar e classificar as espécies em particular dos primeiros humanos, e sobre quais fatores influenciaram a evolução e extinção de cada espécie.

## Saiba mais



### O genoma Neandertal e o homem moderno (“O Neandertal em nós”)

Em maio de 2010, um primeiro esboço do genoma a partir do núcleo obtido de fósseis de Neandertal foi publicado pela primeira vez (GREEN et al. 2010). Cerca de 4,0 bilhões de pares de bases, ou cerca de 2/3 de todo o genoma, foi sequenciado a partir de três indivíduos. Ainda mais interessante, a análise do genoma parece mostrar que os neandertais (Figura 1) cruzaram com os humanos (*Homo sapiens*), e que todos os seres humanos não africanos modernos contêm entre 1% e 4% de genes neandertais (um artigo mais tarde, Reich et al. (2010), estreitou o valor para 1,9% e 3,1% de genes neandertais). Porque os asiáticos, assim como os europeus têm esses genes neandertais, os pesquisadores acreditam que a explicação mais provável é que o cruzamento ocorreu

no Oriente Médio, quando os humanos modernos deixaram a África primeiro entre 60.000 e 80.000 anos atrás, e que se expandiu para o resto do mundo.

Esta tarefa científica que durou quatro anos foi concluída pela equipe de pesquisadores liderada por Svante Pääbo, diretor do Department of Evolutionary Genetics (“Departamento de Genética Evolucionária”) do Instituto Max Planck de Antropologia Evolucionária em Leipzig, Alemanha, publicando uma versão inicial ou rascunho, da sequência do genoma Neandertal na revista Science. Esta é uma conquista científica sem precedentes: apenas dez anos após a decodificação do genoma do Homo sapiens atual, os pesquisadores conseguiram fazer algo semelhante com o genoma de um homínido extinto que era o parente mais próximo dos seres humanos. Segundo as palavras dos mesmos, a comparação entre essas duas sequências genéticas nos permitiria descobrir onde o nosso genoma difere da de nosso parente mais próximo.

A sequência de Neandertal apresentada é baseada na análise de mais de um bilhão de fragmentos de DNA tiradas de vários ossos de Neandertal encontrados na Croácia, Rússia e Espanha, bem como do Neandertal original encontrada na Alemanha. A partir dos fragmentos de DNA presentes nos ossos, os pesquisadores desenvolveram maneiras de distinguir DNA Neandertal verdadeiro a partir do DNA contaminante, de micróbios, especialmente fungos, que viveram nos ossos ao longo dos últimos 40.000 anos. Fragmentos de DNA foram recuperados, o suficiente para dar conta de mais de 60% de todo o genoma neandertal. Uma comparação inicial das duas sequências trouxe algumas descobertas interessantes. Contrariamente à suposição de muitos pesquisadores, parece que alguns neandertais e humanos modernos cruzaram entre si. Segundo os cálculos dos pesquisadores, entre 1 e 4% do DNA de muitos seres humanos que vivem hoje provêm do Neandertal. “Aqueles de nós que vivem fora da África carregam um pouco do DNA Neandertal em nós”, diz Svante Pääbo.

Testes anteriores realizados sobre o DNA das mitocôndrias Neandertal, o que representa apenas uma pequena parte de todo o genoma, não tinha encontrado qualquer evidência de tais cruzamentos ou “mistura”. Para efeitos da análise, os pesquisadores utilizaram também cinco genomas humanos sequenciados, atuais, de origem Europeia, Asiática e Africana e os comparou com o Neandertal. Para sua surpresa, descobriram que o Neandertal é um pouco mais intimamente relacionado com os humanos modernos fora da África do que para os africanos, sugerindo alguma contribuição do DNA Neandertal para os genomas de hoje em dia somente para os humanos não africanos. Curiosamente, Neandertais mostram a mesma relação com todos os seres humanos fora da África, sejam eles da Europa, Oriente Ásia ou Melanésia. Eles viveram na Europa e na Ásia Ocidental. Os pesquisadores oferecem uma explicação plausível para esse achado. Para Svante Pääbo: “os neandertais provavelmente cruzaram com os primeiros seres humanos modernos antes da separação populacional do Homo sapiens em diferentes grupos na Europa e na Ásia. “Isso pode ter ocorrido no Oriente Médio entre 100.000 e 50.000 anos atrás, antes da disseminação da população humana em todo o Leste Asiático. Sabe-se de descobertas arqueológicas no Oriente Médio, que os neandertais e humanos modernos são sobrepostos no tempo, na região.

Para além da questão de saber se os neandertais e Homo sapiens cruzaram, os pesquisadores são altamente interessados em descobrir genes que distinguem os seres humanos modernos de seus parentes mais próximos e quais as vantagens evolutivas teriam sido dadas aos seres humanos modernos no curso da evolução.

Comparando Neandertal e modernos genomas humanos, os cientistas identificaram vários genes que podem ter desempenhado um papel importante na evolução humana moderna. Por exemplo, eles descobriram genes relacionados com as funções cognitivas, o metabolismo e o desenvolvimento de características do crânio, da clavícula e da caixa torácica. No entanto, análises mais detalhadas devem ser realizadas para permitir tirar conclusões sobre a

influência real desses genes. A equipe de investigação obteve a maioria do DNA utilizado para o estudo de um total de 400 miligramas de pó de osso, produzido a partir de ossos de três mulheres Neandertal que foram escavados a partir de Vindija, caverna na Croácia onde viviam mais de 38.000 anos atrás (Figura 2). O sequenciamento do genoma de uma espécie que viveu a dezenas de milhares de anos atrás representa um especial desafio, já que o DNA se desintegra em fragmentos pequenos ao longo do tempo e sofre outros tipos de danos químicos. Outra complicação surgiu na forma de contaminação. Desse material, mais de 95% do DNA em uma amostra originou-se a partir de genomas de bactérias e microrganismos que colonizaram os ossos do Neandertal após sua morte. Mesmo DNA humano, que pode contaminar as amostras durante a escavação ou no laboratório, também poderia prejudicar os resultados. Para isso estes pesquisadores utilizaram várias técnicas, algumas delas completamente novas, para eliminar a contaminação do DNA a ser sequenciado. Por exemplo, as amostras foram processadas em câmaras ultralimpas. Além disso, foi marcado cada fragmento de DNA do osso com um pequeno pedaço sintético de DNA, com um rótulo, para ser capaz de distingui-lo de qualquer DNA humano moderno introduzido mais tarde no processo do sequenciamento. Estas medidas foram cruciais para que fosse possível apresentar os dados de forma verdadeiramente científica e convencer a comunidade científica de achados tão importantes a respeito da evolução humana.



Figura 1 – Representação artística de um grupo de neandertalenses. Eram seres muito parecidos com os humanos modernos, porém robustos, com estrutura atarracada, adaptados ao frio do Pleistoceno europeu, pele branca, alguns indivíduos com olhos claros e cabelos ruivos. Apresentavam a testa baixa ou quase ausente.

Fonte: [http://www.eva.mpg.de/neandertal/press/press\\_kit.html](http://www.eva.mpg.de/neandertal/press/press_kit.html).

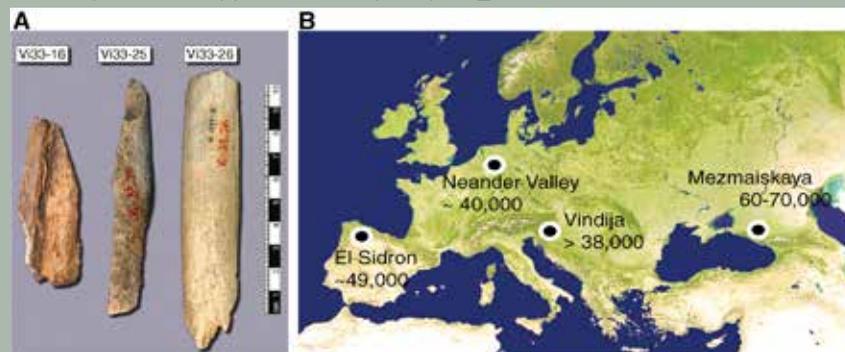


Figura 2 – (A) Fragmentos de ossos de três fêmeas de Neandertais encontradas na caverna de Vindija na Croácia. (B) Locais de escavação de fósseis Neandertais e suas idades presumíveis.

Fonte: GREEN et al. (2010). Fonte: Texto traduzido e modificado a partir de “The Neandertal in us”: Analysis of the Neandertal genome indicates that, contrary to previous beliefs, humans and Neandertals interbred. Max Planck Society. Press Release, May 7th, 2010.

### 3.1 Classificação taxonômica

#### CLASSIFICAÇÃO TAXONÔMICA CONFORME A PÁGINA DO GENBANK

- Supereino: *Eukaryota*;
- Reino *Metazoa*; *Eumetazoa*; *Bilateria*; *Coelomata*; *Deuterostomia*;  
*Filo Chordata*;
- Subfilo *Craniata*; *Vertebrata*;
- Superclasse: *Gnathostomata*; *Teleostomi*; *Euteleostomi*;  
*Sarcopterygii*; *Tetrapoda*; *Amniota*;
- Classe: *Mammalia*; *Theria*; *Eutheria*;
- Superordem: *Euarchontoglires*;
- Ordem: *Primates*;
- Subordem *Haplorrhini*;
- Infraordem: *Simiiformes*;
- Parvordem: *Catarrhini*;
- Superfamília: *Hominoidea*;
- Família: *Hominidae*;
- Subfamília: *Homininae*;
- Gênero: *Homo*;
- Espécie: *Homo sapiens*

(Fonte: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/Taxonomy/>):

### 3.2 Paleoantropologia

Paleoantropologia é o estudo científico da evolução humana. Paleoantropologia é um subcampo da antropologia, o estudo da cultura humana, sociedade e biologia. O campo envolve uma compreensão das semelhanças e diferenças entre seres humanos e outras espécies em seus genes, forma do corpo, fisiologia e comportamento. Paleoantropólogos procuram as raízes do ser humano: traços físicos e de comportamento. Eles procuram descobrir como a evolução moldou os potenciais, tendências e limitações de todas as pessoas. Para muitas pessoas, a paleoantropologia é uma área excitante científica porque investiga a origem, ao longo de milhões de anos, das características e definição universal da nossa espécie.

Os primeiros fósseis humanos e restos arqueológicos oferecem as pistas mais importantes sobre esse passado antigo. Estes restos incluem ossos, ferramentas e quaisquer outras provas (tais como: pegadas, indícios de fogueiras, ou marcas de chacina em ossos de animais) deixadas por povos anteriores. Normalmente, os restos foram enterrados e preservados naturalmente. Em seguida, são encontrados tanto na superfície (exposto pela chuva, rios e erosão eólica) ou por cavar no chão.

Ao estudar os ossos fossilizados, os cientistas aprendem sobre a aparência física dos seres humanos antes e como ela mudou. Tamanho dos ossos, forma e marcas deixadas por músculos podem nos dizer como os antecessores movimentados, ferramentas realizadas, e como o tamanho de seus cérebros foi alterado durante um longo tempo. Evidências arqueológicas se referem às coisas que as pessoas fizeram anteriormente e os lugares onde os cientistas encontrá-los. Ao estudar este tipo de provas, os arqueólogos podem entender como os primeiros seres humanos fizeram e usaram ferramentas e viveu em seus ambientes.

A velha escola dos antropólogos estava sempre à procura de antepassados que não apresentavam essas características, já que consideravam o andar ereto como descendente do andar quadrúpede por duplicações de genes e mutações. Entretanto, o *Australopitecus afarensis* (Lucy) era totalmente bípede. Parece que nosso ancestral quadrúpede ainda não foi encontrado.

### 3.3 O processo de evolução humana

O processo de evolução humana envolve uma série de mudanças naturais que causa uma espécie (populações de organismos diferentes) para surgir, se adaptar ao ambiente, e extinguir-se. Todas as espécies ou organismos se originaram através do processo de evolução biológica. Em animais que se reproduzem sexualmente, incluindo seres humanos, o termo espécie refere-se a um grupo cujos membros adultos regularmente cruzam, resultando em uma descendência fértil – ou seja, descendente capaz de reproduzir. Cientistas classificam cada espécie com um único nome científico formado de duas partes. Neste sistema, os humanos modernos são classificados como *Homo sapiens*.

A evolução ocorre quando há mudança no material genético – a molécula química, o DNA – o que é herdada dos pais e, especialmente, nas proporções de diferentes genes em uma população. Genes representam os segmentos de DNA que fornecem o código químico para a produção de proteínas. Informação contida no DNA pode mudar por um processo conhecido como mutação. A maneira como genes específicos são expressos – ou seja, como eles influenciam o corpo ou o comportamento de um organismo – também pode mudar. Os genes afetam a forma como o corpo e comportamento de um organismo se desenvolvem durante sua vida, e é por isso que as características herdadas geneticamente podem influenciar a probabilidade de sobrevivência de um organismo e reprodução.

A evolução não altera qualquer indivíduo. Em vez disso, ela muda os meios herdados de crescimento e desenvolvimento que caracterizam uma população (um grupo de indivíduos da mesma espécie que vivem em um habitat particular). Os pais passam adaptativas mudanças genéticas aos seus descendentes, e, finalmente, essas mudanças tornam-se comuns em toda uma população. Como resultado, os filhos herdam as características genéticas que aumentam suas chances de sobrevivência e capacidade de dar à luz,

que podem funcionar bem até que o ambiente mude. Ao longo do tempo, a modificação genética pode alterar de forma geral uma espécie de vida, como o que ela come, como ela cresce e onde ela pode viver. Evolução humana ocorreu como novas variações genéticas em populações ancestrais e favoreceu novas habilidades para se adaptar às mudanças ambientais, e assim, alterou o modo de vida humano.

## Síntese do Capítulo



A palavra evolução pode ter várias atribuições. Existe um contexto histórico e autoral conhecido como “teoria da evolução”, como um vasto domínio do conhecimento, com inúmeras facetas e ainda longe de um ponto final. Neste contexto, o autor principal é Charles Robert Darwin, naturalista inglês, cujos livros e discussões revolucionaram a biologia clássica e forneceu os fundamentos da biologia moderna.

Alfred Russell Wallace foi um coautor menos conhecido, porém de vasta importância na decisão final de Darwin. Na teoria da evolução, os organismos apresentam variabilidade individual, apresentam maior número de descendentes que o meio possa sustentar e o sucesso reprodutivo é essencial na acumulação das variações que possam ser selecionáveis pelo meio.

O processo darwiniano é o gradualismo, porém o gradualismo interpõe várias vertentes e dificuldades, como a questão da quebra do registro fóssil. A seleção natural interpõe o darwinismo mostrando que só é possível que aconteça quando existe: possibilidade de reprodução, herança e variação entre os membros individuais, além da variação na capacidade reprodutiva.

A nova síntese incorpora à histórica evolução de Darwin a questão mendeliana e molecular, além de outras importantes sub-revoluções como a genética populacional, essencialmente em seus primórdios. A nova síntese é um dos maiores desafios intelectuais da Biologia atual.

## Atividades de avaliação



1. Procure na Internet mais detalhes sobre as teorias básicas de Malthus e discuta como elas poderiam ou não ser aplicáveis à nossa atualidade.
2. Procure na Internet uma linha do tempo que reúna as ideias/pesquisas/publicações dos cientistas citados neste Capítulo.
3. Procure uma obra que contenha a biografia completa de Charles Robert Darwin, relate detalhes de sua vida em um fórum ou grupo de discussão, detalhes estes

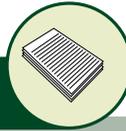
<sup>13</sup>Animais eusociais ou eusocialidade, são aqueles animais que vivem em colônia com somente alguns indivíduos capazes de se reproduzir. Usualmente existe uma divisão de trabalho com diferentes indivíduos desempenhando vários papéis diferentes, como defesa ou coleta. Os exemplos mais comuns são as abelhas, formigas e vespas. As colônias compreendem uma ou mais rainhas responsáveis pela reprodução. Três critérios foram definidos de forma a pretender classificar todas as espécies animais quanto à sociabilidade: a) indivíduos da mesma espécie que ajudam de forma cooperativa na criação dos jovens, b) indivíduos que se dividem e se especializam em tarefas reprodutivas e não reprodutivas, cuidando os inférteis dos filhos dos férteis e c) existência de uma sobreposição de pelo menos duas gerações, de forma que os filhos possam ajudar seus pais.

<sup>14</sup>Altruísmo biológico: Na biologia evolucionária, um organismo é dito apresentar comportamento altruístico quando beneficia outros organismos, a custo de si próprio. Este custo e benefício podem ser mensurados em termos de adaptabilidade ou número esperado de prole. Sendo altruísta o organismo reduz o número de sua prole, porém incrementa a do organismo que está ajudando. Lembre-se que não se trata de um comportamento consciente.

que podem ter direcionado sua mente aos questionamentos evolutivos.

4. Procure na Internet nomes de cientistas, pesquisadores, filósofos (tanto brasileiros quanto estrangeiros) vivos, que, na atualidade, sejam os grandes baluartes em suas respectivas áreas. Dê enfoque na biologia e no estudo evolutivo.
5. Procure o significado de *empirismo* em contraponto ao *racionalismo*, em ciências. Inclua na pesquisa o significado de método científico e experimentação.
6. Procure o significado mais amplo de *gradualismo* em contraponto à *teoria do equilíbrio pontuado*.
7. Proponha um plano de aula para o Nível Médio para este módulo.

### Texto complementar



#### Desafio à teoria da seleção natural: a eusocialidade<sup>13</sup> dos insetos

há que se admitir a existência de casos que apresentam especial dificuldade com relação à teoria da seleção natural. Um dos mais curiosos é o da existência de duas ou três castas definidas de formigas-operárias ou fêmeas estéreis na mesma comunidade de insetos (DARWIN, 1859).

O próprio Darwin, com a frase acima, traz um momento de flexibilização da teoria evolutiva, que atualmente vem alimentando atualizações: os indivíduos que são selecionados são aqueles que têm maior capacidade de deixar descendentes.

Porém, os insetos sociais são um exemplo de vida cooperativa. Segundo os especialistas, pouco é conhecido sobre os mecanismos moleculares envolvidos na transição de vida solitária para social e a manutenção e **eusocialização** em insetos. Como o comportamento não individual foi sobrepujado pelo social no curso evolutivo? Este problema perturbou os biólogos, como o próprio Darwin. Em “A Origem das Espécies” o autor declarou este paradoxo - em particular, para as formigas - como um dos mais importantes *desafios à sua teoria*. Os exemplos, muito conhecidos de **altruísmo**<sup>14</sup>, encontrados no reino animal e observados em várias espécies de insetos, foram considerados por Darwin como um dos pontos mais vulneráveis de sua teoria evolutiva. Como é possível explicar o sacrifício dos operários que, além de não se reproduzirem, travam batalhas e morrem em benefício de toda a colônia? Se um indivíduo é estéril, jamais poderá deixar descendente e não terá qualquer aptidão (capacidade de deixar descendentes diretos) algo que, pensando sob o olhar clássico da evolução, torna-se paradoxal. Esta dificuldade torna-se ainda maior se considerarmos que estas castas inférteis apresentam marcadas diferenças morfológicas: como essas diferenças poderiam ser selecionadas num sistema no qual não há reprodução. Isso não fornece valor adaptativo aos indivíduos, *ao contrário*.

A solução oferecida por Darwin é que toda a colônia deveria ser tratada como uma unidade única de seleção. Assim, colônias desprovidas das operárias suicidas seriam com mais frequência predadas e assim diminuiriam de frequência do que aquelas que possuem. A eusocialidade não é um fenômeno marginal no mundo vivo. Considerando somente formigas (entre as abelhas, vespas e outros insetos eusociais) estas compõem uma biomassa<sup>15</sup> de animais que, sozinha, constitui metade de todos

os insetos e excede a de todos os vertebrados terrestres não humanos! Estes “superorganismos<sup>16</sup>” são tão bizarros em sua constituição que devem constituir um nível distinto de organização biológica (Figura 1).

A primeira ideia bem elaborada sobre a eusocialidade foi estabelecida por Haldane J. B. S. em 1955, a qual foi completamente estabelecida por W. D. Hamilton em 1964. O conceito de grupo ganhou força até meados da década de 1960, mas foi grandemente destronada com a teoria alternativa de Hamilton.

A ideia principal expressa por Hamilton foi que a presença de um comportamento do indivíduo altruísta (operário) só poderia acontecer quando o decréscimo de aptidão característico do altruísta (no caso a reprodução, uma aptidão seletiva) é compensado pelo aumento da mesma aptidão no indivíduo que recebe os favores desse indivíduo altruísta (rainha). Esta relação pode ser posta como uma desigualdade,  $r > c/b$ . Esta relação significa que a cooperação é favorecida pela seleção natural,  $r$  é o coeficiente de parentesco genético entre o indivíduo altruísta e os indivíduos que recebem a ajuda,  $b$  é o incremento em aptidão obtido pelo indivíduo favorecido e  $c$  é o decréscimo de aptidão sofrido pelo altruísta. Ao mostrar que genes em um indivíduo poderiam ser selecionados mesmo que não tenham um valor adaptativo<sup>17</sup> direto, mas sim, indireto, os genes passaram a ocupar o lugar de indivíduos, como a unidade central sobre a qual a seleção natural atua. Essa mudança de foco foi extensamente apresentada por Richard Dawkins em 1976 (na obra “O gene egoísta<sup>18</sup>”). De forma genérica um gene poderia ser selecionado mesmo quando seus efeitos diretos na aptidão darwiniana sejam negativos. A visão nos genes foi e está sendo usada com sucesso para entender a evolução dos mais diversos tipos de interação.

Os artigos publicados por Hamilton em 1964 sobre a seleção de parentesco mudaram sensivelmente a biologia evolutiva. No trabalho intitulado “*Molecular evolutionary analyses of insect societies*” – traduzido: “Análise evolutiva molecular das sociedades de insetos”, publicado em 2011 na revista PNAS – *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America*, traduzido: Atualizações da Academia Americana de Ciências, os autores Fischman, Woodard e Robinson apresentam uma revisão que faz análise evolutiva sobre os insetos sociais, vistos de forma a identificar mudanças moleculares adaptativas envolvidas na evolução social da **eusocialidade**.

Autor: Vânia Marilande Ceccatto (a partir da literatura apresentada).



Figura 1 – Exemplos de insetos sociais, as abelhas.

Fonte: <http://onionesquereality.wordpress.com/2008/03/11/altrusim-in-animals/>

<sup>15</sup>Biomassa: A biomassa é um nome genérico para indicar um material formado por substâncias simples ou composta, de origem orgânica (vegetal, animal e microbiológica). Madeira, resíduos florestais, produtos e resíduos agrícolas, excrementos, lixo, carcaças etc. Pode ser medida como matéria fresca ou matéria seca ou mesmo em forma de cinzas, como carbono total.

<sup>16</sup>Superorganismo: Um conceito que define um organismo como composto de muitos organismos menores. O superorganismo modelo é uma colônia de insetos sociais. Assim, a seleção atua sobre o grupo todo como um organismo único e não sobre os seus genes como preconizado pela ideia de “gene egoísta”.

<sup>17</sup>Valor adaptativo: variável estatística estudada na genética (simbolizada por  $W$ ), também conhecido como adaptabilidade, aptidão ou “fitness”, é resultante da capacidade das espécies converterem recursos do ambiente em reprodução. O valor adaptativo é sempre genotípico e relativo a outros genótipos, porém é dependente dos fatores ambientais.

<sup>18</sup>“O Gene Egoísta”: Livro de Richard Dawkins de muito sucesso primeiramente publicado em 1976. A ideia central é que os organismos são máquinas de sobrevivência a serviço dos genes. Disponível de forma gratuita na Internet: <http://www.livrosgratis.net/download/344/o-gene-egoista-richard-dawkins.html>

## Leituras, filmes e sites



### Livros

DARWIN, C. **A origem das espécies** - Disponível em:

<http://ecologia.ib.usp.br/ffa/arquivos/abril/darwin1.pdf>

DI STASI, L. C.; HIRUMA-LIMA, C. A. **Plantas medicinais na Amazônia e na Mata Atlântica**. 2 ed. São Paulo: Editora da Unesp. 2002. 592 p. Disponível em: [http://www.livrosgratis.com.br/arquivos\\_livros/up000036.pdf](http://www.livrosgratis.com.br/arquivos_livros/up000036.pdf)

ZANONI, M. (Org.) **Transgênicos, terapia genética, células-tronco: questões para a ciência e para a sociedade**. Disponível em: [http://www.livrosgratis.com.br/arquivos\\_livros/md000028.pdf](http://www.livrosgratis.com.br/arquivos_livros/md000028.pdf)

### Filmes

O desafio de Darwin. Original americano: *Darwin's Darkest Hour*, Lançado em 2009. Direção: John Bradshaw. 104 minutos.

Criação. Original britânico: *Creation*. Lançado em 2010 (no Brasil). Direção: Jon Amiel. 108 minutos.

Planeta dos Macacos: a origem. Original americano: *Rise of the Planet of the Apes*. Lançado em 2011. Direção: Rupert Wyatt. 105 minutos.

O vento será sua herança. Original americano para a TV: *Inherit the Wind*. Lançado em 1965. Direção: George Schaefer.

Avatar. Original americano *Avatar*. Lançado em 2009, Direção: James Cameron. 162 minutos.

### Sites

*Darwinismo*: [www.brasilecola.com/biologia/darwinismo.htm](http://www.brasilecola.com/biologia/darwinismo.htm) e [darwinismo.wordpress.com/](http://darwinismo.wordpress.com/)

Site com notícias sobre biologia evolutiva e molecular: <http://www.biomol.net/>  
 Coleção de artigos em ensaios sobre a discussão das origens física e biológica. University of Ediacara: <http://www.talkorigins.org/>

Termo *evolução* em: *IEP - The Internet Encyclopedia of Philosophy* PBS Evolution (biografia de Ernst Mayr): <http://www.iep.utm.edu/evolutio/>

Página da WGBH Educational Foundation com dezenas de aplicativos para visualização de questões evolutivas (em inglês). Aplicativos para professores e estudantes. <http://www.pbs.org/wgbh/evolution/>

## Referências



BENSON, D. A.; KARSCH-MIZRACHI, I.; LIPMAN, D. J.; OSTELL, J.; SAYERS, E. W. GenBank. **Nucleic Acids Res.**, v. 37, p. 26-31, jan. 2009.

GREEN, R. E. A draft sequence of the Neandertal genome. **Science**, v. 328, n. 5979, p. 710-722, may 2010.

NOWAK1, M. A.; TARNITA1, C. E.; WILSON, E. O. **The evolution of eusociality**. V. 2, 2010. 466p. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21690385>

SAYERS, E. W. et al. Database resources of the National Center for Biotechnology Information. **Nucleic Acids Res.**, v. 37, p. 5-15, jan. 2009.

WILSON, D. S.; WILSON, E. O. Rethinking the theoretical foundation of sociobiology. **Quarterly Review of Biology**, v. 82, p. 327-348, 2007.



## Capítulo

# 2

# Sistemática filogenética, desenvolvimento e genômica evolutiva



## Objetivos

- Apresentar os aspectos gerais da sistemática e evolução de estruturas complexas.
- Caracterizar os conceitos essenciais da sistemática, como homologia e outros.
- Entender como são feitas as filogenias e qual suas vantagens e dificuldades.
- Verificar como os genes do desenvolvimento são interessantes na biologia evolutiva.
- Apresentar a evolução e a sistemática de genes e a evolução molecular.

### 1. Aspectos gerais da sistemática e evolução de estruturas complexas

Para compreender a evolução poderíamos orientar nossa busca em perguntas ou hipóteses, do tipo: *como, quando e porque a vida veio a ser do jeito que é?* Sabemos que a estrutura dos organismos é fruto de um desenvolvimento histórico, onde eventos de seleção e variação passados, acontecidos temporalmente, geralmente em sequência de transformações, determinaram a situação atual.

Para o biólogo evolutivo, entender porque existem antas na Ásia e América e não existem na África, ou porque lagartos de Komodo exibem gigantismo insular (um fenômeno que acontece em alguns animais que vivem em ilhas, que crescem de forma incomum, comparados aos da mesma espécie em outros lugares) entre outras questões, envolve saber o histórico desses fatos. Para determinar os mecanismos históricos das novidades evolutivas é preciso conhecer também aspectos genéticos e ecológicos destas variações e o quanto o ambiente influenciou para torná-las do jeito que são. Para isso é preciso conhecer a paleontologia e a sistemática biológica. Frequentemente esses dados são perdidos ou fragmentados.

Os taxonomistas entendem que de alguma forma, a classificação deva refletir a história evolutiva do organismo. Parece ser um consenso para todos, mas o significado disto pode variar para os diferentes grupos de estudiosos do assunto. Um táxon como *Reptilia* facilmente pode ser entendido como um

grupo que possui um ancestral comum, portanto chamado de monofilético ou forma um único ramo evolutivo. O grupo dos “peixes” (*Pisces*) não é monofilético, nem mesmo uma unidade taxonômica, pois é um termo geral que descreve um vertebrado aquático com brânquias, membros, se presentes, na forma de nadadeiras, e normalmente com escamas de origem dérmica no tegumento. O grupo monofilético forma um clado. Portanto, os táxons não devem ser polifiléticos. No caso dos répteis alguns sistematas chamam de *parafilético*, pois não inclui todos os descendentes de um ancestral, já que as aves teriam surgido a partir dos répteis e hoje constituem um grupo à parte (mais “avançado”). Essa evolução paralela das aves constitui um *grado*.

As diferentes filosofias de classificação acabam gerando ambiguidades, um taxonomista pode dividir um grupo de espécies em dois gêneros caso a sua experiência indique quanto são importantes às diferenças entre elas ou simplesmente juntá-las todas, caso essas diferenças lhe pareçam pouco significativas. Para a biologia evolutiva é essencial entender a história evolutiva e a sistemática filogenética, além do registro fóssil. A sistemática dá forma e fornece a linguagem adequada para os estudos evolutivos.

O registro fóssil (Figura 1) na verdade não funciona como uma leitura direta que o pesquisador pode fazer para registrar a história evolutiva dos grupos. Existem grupos inteiros que não são facilmente fossilizáveis. Poucas vezes encontramos séries graduais de fósseis com as séries de transformações que desejamos ver. É muito comum verificar que uma espécie fóssil não é o ancestral de uma espécie recente, mas somente uma aparentada, que se extinguiu. No registro fóssil, aves aparecem antes de serpentes. As aves aparecem no registro fóssil no Jurássico e as serpentes no Cretáceo. Entretanto, isso não significa que todas as características primitivas das primeiras aves são mais primitivas que aquelas apresentadas em serpentes. Nem que as serpentes divergiram das aves! Os fósseis corroboram hipóteses: répteis são anteriores aos mamíferos e existem numerosas formas intermediárias entre répteis e os posteriores mamíferos. Não é possível que somente nos fósseis nos esclareçam as premissas da vida.

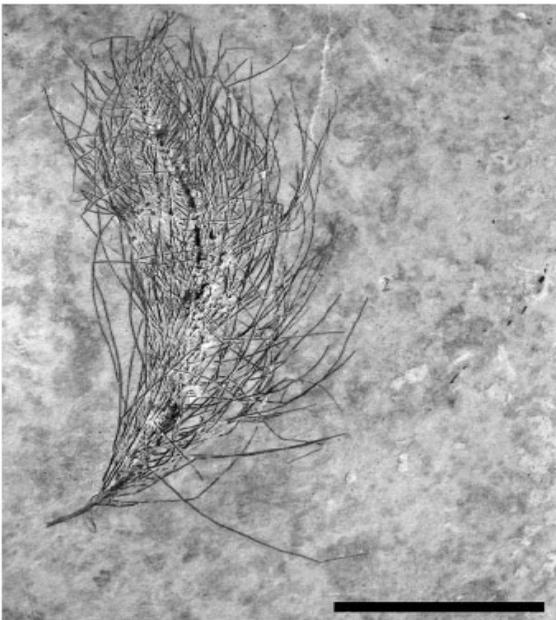


Figura 1 – Pena de ave fossilizada da Formação Crato/CE. A figura informa que o fóssil está depositado no Museu de Paleontologia de Santana do Cariri-CE, com o seu respectivo registro. Como característica apresentada no fóssil, não apresenta barbulas. A barra negra informa a escala.

Fonte: SAYÃO; SARAIVA; UEJIMA (2011).

A evolução do modelo filogenético melhorou substancialmente na última década. Os biólogos admitem que os modelos não são perfeitos e que será um longo caminho antes que os modelos possam capturar com precisão todos os processos evolutivos. Apesar deste obstáculo, eles são energizados com a perspectiva de delinear a evolução no nível de sequência dos ácidos nucleicos e aminoácidos, em vez de se paralisar pelos desafios.

Nunca é fácil o trabalho do biólogo e do sistemata. A tradição alcançada pela sistemática filogenética baseada na morfologia a tornam mais segura e ainda, muito em voga. Pétalas, ossos, espinhos, manchas, pêlos, número de ovários, número de segmentos, tamanho de ovos, modo de acasalamento etc., não são mais nem menos interessantes que as sequências de DNA ou de proteínas. A vida e sua história não podem ser reduzidas à análise de algumas características, mas essa história pode ser contada de diferentes maneiras e em diferentes contextos. O importante é que essa história seja tanto verdadeira quanto possível e passível de ser discutida e atualizada.

### 1.1 Evolução de órgãos complexos: o olho

Olhos são estruturas biológicas que, evolutivamente, são talvez, as mais complexas. Poucos pesquisadores da biologia evolutiva se arriscam a traçar o desenvolvimento dos olhos dos vertebrados em termos de como eles teriam evoluído. Os olhos mostram uma grande variação em sua complexidade e inúmeras adaptações requeridas pelos organismos. Variam em acuidade, na faixa de comprimentos de onda que podem detectar, na sensibilidade para os níveis de luminosidade, na sensibilidade para detectar movimento ou na resolução dos objetos, além da discriminação de cores.

A evolução de órgãos complexos, como o olho, é um exemplo de homologia de órgãos, a qual pode ser presenciada em uma grande variedade de grupos taxonômicos. Os componentes dos olhos, como os pigmentos visuais<sup>19</sup> parecem ter ancestralidade comum, a qual se supõe que tenha ocorrido antes da radiação dos animais. Entretanto, os olhos capazes de formar imagens teriam evoluído de 50 a 100 vezes mais, usando somente as mesmas proteínas e blocos genéticos comuns em sua construção. Como isso teria ocorrido?

Charles Darwin escreveu na *Origem das Espécies* que a evolução do olho, por meio da seleção natural seria, “em alto grau de possibilidade, um absurdo”. Essa afirmação decorre do fato, especialmente porque na época havia poucos recursos tecnológicos, que o olho é um aparelho de extrema complexidade e não haveria tempo hábil entre as gerações para que as variações surgidas passassem por seleção. Ele sugeriu, corretamente, porém superficialmente, usando suas próprias palavras, que haveria ocorrido, em prin-

<sup>19</sup>Pigmentos visuais: Os fotorreceptores são moléculas que traduzem luz em sinais elétricos. Uma molécula chamada retinal combina-se com proteínas chamadas opsinas para formar quatro tipos de pigmentos visuais. Dependendo da forma de ligação com a opsina, o retinal absorve diferentes comprimentos de onda da luz visível. O retinal é relacionado à vitamina A (chamado trans retinol) e é sintetizada a partir dela.

cípio, uma gradação a partir de um simples nervo óptico, meramente coberto por pigmento, e mais nenhum outro mecanismo, chegando até um moderado estágio de perfeição, com graus intermediários de evolução.

Os primeiros fósseis foram encontrados no período Cambriano (cerca de 540 milhões de anos). Os complexos olhos dos vertebrados se modificaram em poucos milhões de anos, num rápido “salto” evolutivo, com a rápida evolução, especialmente animal, da explosão do Cambriano, levando a uma rápida diversificação (lembre-se que evolução só pode ocorrer na presença de variação). Não existe evidência de olhos antes do período Cambriano. Esta diversificação fica clara no Médio Cambriano, num campo de fósseis canadense chamado de “Burgess Shale Formation”<sup>20</sup>, onde se verificou extraordinária diversidade marinha.

Na teoria do zoólogo Andrew Parker<sup>21</sup>, vista na obra de 2003 “*In the Blink of an Eye*” traduzido – “*Em um piscar de olho*”, essa diversificação verificada se deveria uma “corrida armamentista” entre os organismos, culminando com o desenvolvimento da visão e intensificação do poder de predação. Com a predação, partes do corpo de interesse, tanto na fuga quanto na predação, seriam positivamente selecionadas. Em 2006 ele escreveu o livro “*Seven Deadly Colours*” traduzido: “*Sete cores mortais*”, descrevendo a variedade de métodos de produção de cores produzida na natureza e sua possível evolução. Parker, um agnóstico, rejeitou amplamente as questões criacionistas no desenvolvimento dos organismos. Estes argumentos foram reunidos em seu livro de 2009, “*The Genesis Enigma*” traduzido: “*O Enigma do Genesis*”.

Os predecessores do olho foram simples proteínas fotorreceptoras que conseguiam detectar a luz, encontradas em organismos unicelulares como a *Euglena*. Estas proteínas podem somente detectar a presença ou ausência de luz, a qual pode sincronizar os ritmos circadianos ou o fotoperiodismo do animal. Estas proteínas são insuficientes para a visão, não distinguem formas ou a direção da luz. Estas proteínas são encontradas em todos os grupos animais. Na *Euglena*, uma mancha destas proteínas chamada *estigma*, é localizada na parte anterior. Esta consegue então, apontar a direção do batimento do flagelo, em direção à luz e assim consegue fotossintetizar. Esses pigmentos visuais também são encontrados em pontos dos cérebros dos organismos complexos, e existem teorias que estes poderiam ter papel na sincronicidade dos ciclos lunares, detectando sutis alterações na iluminação dia/noite, sincronizando a maturação dos ovos e espermatozoides, maximizando a sua probabilidade de fertilização.

A visão é proporcionada por uma bioquímica básica comum a todos os tipos de olhos. O que varia, de forma incrível, é como esse *kit* básico

<sup>20</sup>The Burgess Shale Formation: campo de fósseis descoberto pelo paleontologista Charles Walcott em 1909, no Canadá, com datação de aproximadamente 505 milhões de anos. A fauna encontrada mostra-se típica de depósitos do médio pré-cambriano, especialmente formada por invertebrados, daí sua importância.

<sup>21</sup>Andrew Parker: nascido em 1967, pesquisador graduado em Ciências Naturais em 1976 e doutor pela Universidade de Cambridge. É professor de fisiologia no St John's College e pesquisador em visão, cognição e neurociência.

é usado para interpretar o ambiente, com grande variação de estruturas e formas. Nos organismos *protostomáticos* (moluscos, vermes anelídeos e artrópodos) a célula receptora é um *microvilo*, como uma extensão ou protrusão da membrana celular (Figura 2). Nos *deuterostomos* (cordados e equinodermos), as células receptoras são *cílios*. Esta variação pode ser ainda mais complicada, alguns microvilos podem ter traços de cílios. Essas duas linhagens divergiram no pré-cambriano, onde somente se verificam estes primitivos receptores de luz, os quais se desenvolveram em olhos mais complexos independentemente.

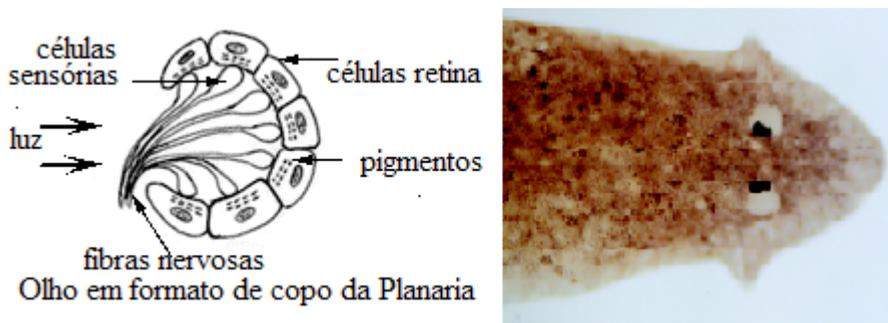


Figura 2 – Esquema de olho em **Planaria**. Fonte: connecticutvalleybiological.com

A célula fotorreceptora, a qual é a unidade básica da visão, é uma célula especializada contendo basicamente dois tipos de moléculas na sua membrana: as *opsinas*<sup>22</sup>, uma proteína sensível à luz, as quais circundam um pigmento denominado de *cromóforo*<sup>23</sup>, o qual é capaz de distinguir cores. O desenvolvimento de um sistema óptico que discrimine a direção da luz, mesmo pouco desenvolvido, é encontrado em somente seis dos (mais ou menos) trinta filos animais existentes, possuem tal sistema. Entretanto, estes seis grupos correspondem a cerca de 96% das espécies vivas (para maiores discussões a este respeito veja referência “The evolution of the eyes” no final deste capítulo). Este sistema óptico complexo que possibilita a habilidade de direcionar o sistema em direção ao brilho da luz basicamente se estrutura como um esquema multicelular interencaixado, formando o globo ocular, no formato de copo ou cálice (Figura 3).

Figura 3 – Esquema de evolução do olho em cordados, desde os mais primitivos aos mais complexos. Fonte: Traduzido e modificado de [http://www.bio.miami.edu/dana/dox/irreducible\\_complexity.html](http://www.bio.miami.edu/dana/dox/irreducible_complexity.html)

<sup>22</sup>Opsinas: são cadeias polipeptídicas, formadas por 348 aminoácidos, fazendo parte da rodopsina (parte proteica). A rodopsina é uma proteína transmembranar, encontrada nos bastonetes, os quais são células encontradas no epitélio pigmentar da retina de olhos. Uma parte não proteica da rodopsina é um derivado da vitamina A, o 11-cis-retinal. Algumas opsinas também são relacionadas (fotopsinas) diferindo em apenas alguns aminoácidos, o que basta para que absorvam em diferentes comprimentos de onda. Estes pigmentos também são encontrados nos cones da retina e é a base para a visão em cores.

<sup>23</sup>Cromóforo: parte ou conjunto de átomos responsável pela cor. Substância que tem muitos elétrons capazes de absorver a energia da luz visível, excitando-se e emitindo em cores.





## Saiba mais

O aparelho visual é constituído por dois órgãos pares e simétricos situados anteriormente no crânio: os olhos ou globos oculares, os quais se ligam diretamente ao encéfalo pelos nervos ópticos. Em cada globo encontramos três espaços cheios de líquido: a túnica fibrosa externa, que se divide em córnea e esclerótica, a túnica vascular ou úvea, membrana intermediária que se divide numa parte posterior (coróideia), intermediária (corpo ciliar) e numa anterior (íris), perfurada pelo orifício pupilar ou pupila, a qual apresenta uma cor na parte anterior que varia segundo o grau de pigmentação, a túnica nervosa, ou retina, membrana mais interna, formada por duas camadas, externa ou epitélio pigmentado e, interna, o cristalino, elemento que tem a função de lente e que está ligado ao corpo ciliar, a íris, a câmara anterior, compreendida entre a córnea e a íris, a câmara posterior, compreendida entre a íris e o cristalino, a câmara vítrea, atrás do cristalino.

Pelas câmaras anterior e posterior, circula o humor aquoso e na câmara vítrea encontra-se o humor vítreo. O olho dos vertebrados funciona como uma máquina fotográfica: o cristalino e a córnea desempenham função de lente que projeta as imagens que passam através da íris, na superfície fotossensível da retina. A íris, da mesma forma que o diafragma da câmara, regula a quantidade de luz que chega à retina e, juntamente com o cristalino, contribui para tornar nítida a imagem focada na retina. Nesta, a luz chega a receptores especiais que transformam as imagens luminosas em estímulos nervosos, que acabam alcançando o córtex cerebral.

As planárias podem direcionar um pouco a visão em direção à luz em virtude do formato de taça de seus proto-olhos. A informação visual torna-se mais e mais precisa, à medida que se aprofunda esse cálice e aumentam o número de células fotorreceptoras. Medusas como *Cladonema*, têm olhos bem elaborados, mas como não têm um cérebro, os olhos acabam mandando mensagens diretamente para os músculos, sem que haja um processamento necessário, o qual só pode ser fornecido pelo cérebro.

Nos olhos tipo câmara, como os nossos, cuja estrutura proporciona a redução da abertura da entrada de luz, o organismo obtém uma imagem verdadeira. Esta novidade foi inicialmente verificada em organismos como o *Nautilus*. Mesmo sem córnea (ou lente), falta que fornece imagens de fraca resolução, já são um grande avanço. Com o crescimento de células transparentes que permitem a entrada de luz, mas impedem a contaminação e a infestação de parasitas, a câmara fica segregada e protegida, estando agora imersas com humor transparente, o que permite a filtragem de cores, eleva o índice de refração, bloqueia a radiação ultravioleta e possibilita a operação dos olhos dentro e fora d'água.

As células transparentes possuem duas câmaras com um líquido entre elas. O líquido pode servir como fluido circulatório de oxigênio, nutrientes, resíduos e funções do sistema imunológico, permitindo que possa correr maior espessura e maior proteção mecânica. As várias interfaces sólida e líquida aumenta a potência óptica, permitindo ângulos de visão maiores e resolução de imagem maior. Esse tipo de layout óptico não pode ser encontrado em fósseis, pois a fossilização raramente conserva tecidos moles.

## 1.2 Homologia e homoplasia

A cultura indú reserva o chamado “terceiro olho”, como o olho da sabedoria, também, chamado de “*sexto chakra*”, uma espécie de fonte de energia. O terceiro olho, invisível, estaria situado no ponto entre as sobrancelhas e seria associado a uma certa capacidade intuitiva do ser humano. Evidentemente que o olho da sabedoria indú não se corresponde exatamente ao que conhecemos como olho comum. O chamado “*olho na nuca*” é uma referência a pessoas que parecem enxergar atrás de si... Independente da sua utilidade, não seria nada mal contar com olhos extras, em certas partes do corpo!

Olhos extras podem ser produzidos em moscas e em camundongos (Figura 4A). Tudo começou em 1915, ao se descobrir uma mosca mutante contendo olhos reduzidos devido a uma mutação recessiva em um gene chamado *eyeless*. Esse gene (chamado *ey*) é essencial para a produção do olho normal em moscas. Da mesma forma, o gene *Pax6* é necessário em camundongo. Insetos e vertebrados<sup>24</sup> possuem olhos muito diferentes. Estes dois genes têm sequências de DNA muito semelhantes. Até meados de 1990, olhos de insetos e vertebrados eram chamados de estruturas análogas, já que, aparentemente, tinham ancestralidade diversa, mas para a mesma função.

Com o sequenciamento do gene e sua comparação, verificou-se que esta proposição poderia não ser verdadeira, apesar do olho do inseto ser um olho composto e o do vertebrado (no caso os camundongos) não. O gene *ey* foi introduzido geneticamente nas células de mosca, em locais impróprios, como pernas, antenas e asas e nasceram olhos. Estes olhos ectópicos<sup>25</sup> não eram somente estruturas parecidas com olhos, mas tinham córnea, fotoreceptores e cones e respondiam à luz. As moscas não podiam utilizá-los porque não tinham conexão ao sistema nervoso. Camundongos que receberam o gene *ey* desenvolveram olhos compostos. A Figura 4B apresenta um invertebrado marinho fóssil, apresentando a característica de olho composto.

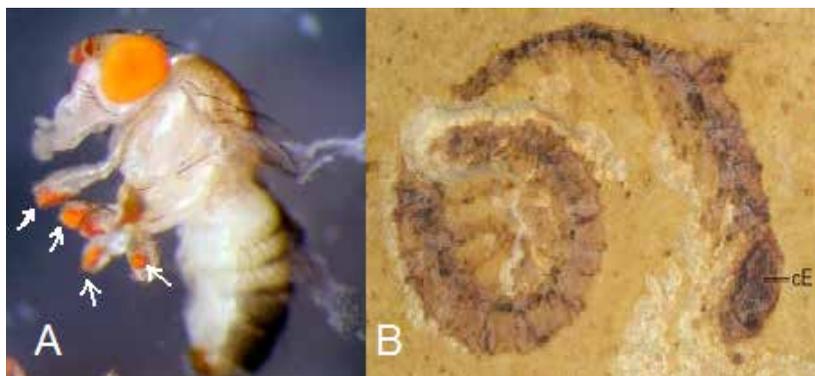


Figura 4 – (A) Olhos ectópicos produzidos nas pernas de *Drosophila* (setas); (B) Fóssil de *Cardiodictyon catenulum*, (invertebrado marinho) do período Cambriano de Chengjiang (China) com olho composto (cE) em sua cabeça, datado em 525 milhões de anos.

Fonte: HOU et al. (2007); GEHRING (2011).

<sup>24</sup>Formação das imagens no olho dos vertebrados superiores: as imagens se formam no fundo do olho, o cristalino regula a luz que entram, pela frente do olho, a lente do cristalino, sendo mais grossa no centro que nas bordas, curva a luz em direção ao centro da lente. Essa lente é convexa e arredondada na frente e atrás. Os raios de luz no centro do cristalino finalmente o atravessam e produzem uma imagem que fica gravada na retina. Ao focalizarmos um objeto distante, o cristalino envia uma imagem nítida e adequadamente focalizada sobre a retina. Isso ocorre somente quando os músculos ciliares da retina estão relaxados e o cristalino achatado. A imagem produzida é invertida, mas o cérebro ajusta de forma a termos a imagem correta.

<sup>25</sup>Ectópicos: significa fora de lugar, em posicionamento não natural, como gravidez ectópica

Dessa forma é difícil manter a proposição de analogia para olhos de moscas e camundongos. Portanto, haveria um elemento de homologia entre os ancestrais dos dois grupos. É possível pensar em dois tipos de homologia, neste caso:

- a) apesar de terem se desenvolvido de forma independente, ambos são frutos específicos do mesmo gene ancestral. O organismo tinha olhos, certamente mais simples, ao invés de não tê-los.
- b) a homologia refere-se a uma ancestralidade comum, relativa a um ponto específico do cérebro, possivelmente a parte frontal da cabeça, o ancestral comum tinha uma cabeça e um cérebro e genes homólogos que permitiam controlar esta parte do corpo, portanto, seria uma homologia em um nível mais abstrato.

Qual o significado que podemos inferir da homologia? E o que seria não homologia?

Uma homologia consiste num caráter compartilhado entre duas ou mais espécies. Um caráter homólogo deve ter a mesma origem ontogenética (ou embrionária). Deve-se começar com um caráter que é semelhante, em duas ou mais espécies, ou táxons, daí retrocedemos até chegar ao seu ancestral comum. Se verificarmos que esse ancestral continha o mesmo caráter, talvez em condições mais modestas, então este caráter apresenta uma ascendência evolutiva e é uma homologia. Atenção ao fato que não necessariamente esta homologia significa que a função é a mesma, mas o que importa aqui é se a origem ontogenética o é.

## Saiba mais



### Homologias ancestrais e derivadas

As homologias ditas *ancestrais (plesiomorfia)* são características que estavam presentes no ancestral comum a todos os táxons estudados. As homologias *derivadas (ou apomorfias)* são características que evoluíram posteriormente, em um ou mais táxons estudados, após o ancestral comum. Portanto, a distinção entre os dois tipos de homologias depende do número de táxons estudados. Não há sentido em falar em homologia derivada caso estejamos estudando somente duas espécies, teria que ter uma terceira espécie, no mínimo.

Assim, comparamos duas em conjunto, com a terceira. Um exemplo: estudando a característica de pata pentadáctila (cinco dedos) entre cão, cavalo e rã, verificamos que nas espécies cão e rã essa característica tem homologia ancestral, em cavalo não. No entanto, essa característica não pode então ser usada como relação filogenética, pois não reflete a ancestralidade comum. Pata pentadáctila mostra-se então como homologia ancestral (no caso, entre cão e rã).

Adicionamos a este estudo, os peixes. O caráter tornou-se uma homologia derivada após a adição do grupo dos peixes, porque não estava presente no ancestral comum, mas apareceu posteriormente. Este estudo mostra que essa característica não pode ser usada nas relações filogenéticas deste conjunto de táxons. Tanto as *homoplasias* quanto as *homologias ancestrais* não são confiáveis na preparação de filogenias.

Se o ancestral não possui a característica estudada, então é uma homoplasia. Um exemplo fácil é o seguinte: humanos e chimpanzés apresentam estruturas nervosas bem características e um cérebro. O ancestral primata de ambos também o possuía, portanto, cérebro é um caráter homólogo entre os referidos organismos. Esta ligação estabelecida entre os táxons, mesmo que parcial, permite que se criem inferências, relativas a outros caracteres, muitas vezes, não tão simples assim, como veremos. Veja que se humanos e chimpanzés têm cérebro, será que apresentam outras morfologias em comum? Note que as estruturas não têm que ser idênticas entre si, mas apenas compartilhar uma informação morfológica entre elas, informação que pode ser muito sutil. As homologies indicam relação filogenética entre os grupos estudados. As homoplasias não.

Nas homoplasias, caracteres que são morfológicamente parecidos podem dar indícios errôneos de ancestralidade comum. A causa das homoplasias é a evolução convergente, a evolução convergiu para um mesmo resultado, com caminhos evolutivos diferentes, a mesma pressão seletiva atuou sobre os grupos estudados. Um exemplo clássico é a homoplasia encontrada entre as asas dos morcegos e as asas das aves. A estrutura das mesmas é diferente, a das aves têm penas, dos morcegos é coberta com pele, a das aves é sustentada pelo segundo dígito e dos morcegos, do 2º ao 5º. A mesma resposta dos dois grupos foi dada a um estímulo ambiental, uma pressão seletiva, que no caso é o voo, os grupos evoluíram separadamente, mas a resposta final foi bem parecida, porém estruturalmente são realmente desiguais em essência, o que caracteriza a evolução convergente.



## Saiba mais

### Glossário importante

**Homoplasias:** Podemos distinguir três tipos de homoplasias: a) paralelismo: quando a partir do mesmo estado primitivo surgem duas ou mais o mesmo estado derivado, b) convergência: a partir de diferentes estados primitivos surgem duas ou mais vezes o mesmo estado derivado, c) reversão: caso em que, a partir do estado derivado ocorre uma aparente volta secundária, reversão para o estado primitivo, parecendo ser, equivocadamente o estado primitivo (veja plesiomorfia).

**Plesiomorfia ou plesiomorfismo:** estado mais antigo ou pré-existente de um caráter em uma série de transformações. Esta condição tanto é temporal, ou seja, já existia antes de uma outra que seja homóloga a ela, quanto material, uma condição alterada por uma ou mais mutações que geraram a forma apomórfica correspondente.

**Convergência:** ou evolução convergente. Trata-se de uma relação de semelhanças entre condições não homólogas de caracteres, produzida pela alteração de condições plesiomórficas distintas resultando em condições apomórficas semelhantes, é um caso particular de homoplasia.

<sup>26</sup>Homologia: Característica derivada de um ancestral comum compartilhada por duas ou mais espécies, com ou sem modificações

<sup>27</sup>Apomorfia: Estado derivado de um carácter em uma série de transformações. O conceito demanda tanto quanto ao tempo: uma condição mais recente que outra homóloga pré-existente, quanto material: uma condição que resultou da ocorrência de uma ou mais mutações que alteraram a forma plesiomórfica correspondente.

<sup>28</sup>Sinapomorfia: Compartilhamento da condição apomórfica de um caráter por todo um conjunto de populações ou de espécies.

<sup>29</sup>Novidade evolutiva: alteração de uma estrutura pré-existente resultando numa estrutura nova. Podemos pensar em mutação no DNA, a qual seria a base genética dessa alteração. Pode ser também uma alteração na parte física do cromossomo, o que também vai criar uma mutação, em nível estrutural, como uma inversão ou transversão. Também se refere ao efeito fenotípico que essa mutação resultou.

<sup>30</sup>Cladística: padrões ramificados, na cladística a classificação ocorre via sequência de acontecimentos pelos quais as espécies divergiram de um ancestral comum.

## 2. A sistemática filogenética

Após conhecer o que é homologia<sup>26</sup>, passemos então ao estudo das relações filogenéticas através das apomorfia<sup>27</sup> e sinapomorfia<sup>28</sup>. A reconstrução das relações de parentesco vai depender do levantamento e análise de características dos organismos consideradas similaridades especiais, os chamados caracteres derivados (modificados), homologia derivada, ou *apomorfias*. Quando as apomorfias são compartilhadas por pelo menos dois grupos, elas são definidas como *sinapomorfias*.

Com o advento da Teoria Evolutiva, tornava-se impossível deixar de lado a perspectiva evolutiva na classificação dos organismos. A taxonomia acrescenta objetividade metodológica necessária à criação dos sistemas de referência necessários à classificação dos organismos vivos. Willi Hennig, eminente entomólogo alemão, foi o primeiro a propor, com sua obra “*Phylogenetic Systematics*”, traduzido “*Sistemática Filogenética*”, em 1966, um método para se estabelecer as relações de parentesco entre os seres vivos. Hennig formou as bases para que a prática classificatória levasse em conta as questões evolutivas<sup>29</sup> e não meramente, o que era comum, a opinião do naturalista. Essa sua fundamentação, pela primeira vez, considerava as proposições de Darwin em seu livro *A Origem das Espécies*. Assim, ele propôs que os organismos deveriam ser relacionados entre si através de uma metodologia que não contrariasse a descendência desses organismos a partir de seus ancestrais comuns, com modificação. Criou-se assim a grande ciência da Sistemática Filogenética ou Cladística<sup>30</sup>. Essa reviravolta influenciou de forma profunda o pensamento biológico, até hoje. Os adeptos da visão de Hennig, chamados de filogeneticistas, defendem a estrutura de classificações deve refletir de maneira precisa e inequívoca, o conhecimento disponível sobre as relações filogenéticas entre os táxons. Existem várias maneiras para se chegar a este resultado, criando classificações estritamente filogenéticas.



### Saiba mais

#### Willi Hennig

Willi Hennig: entomologista alemão, nascido em 1913 em Dürrhennersdorf, Alemanha. Faleceu em 1976, em Ludwigsburg, Alemanha. Hennig foi chamado ao serviço militar durante a II Guerra Mundial, porém foi severamente ferido quando estava na Rússia, em 1942, recuperando-se muitos meses depois, em diversos hospitais. Posteriormente ele foi servir nos Serviços Médicos Militares, na prevenção da malária na Itália. Tornou-se prisioneiro de guerra sendo então libertado pelos aliados, porém como um colaborador no serviço antimalária dos britânicos. Ele e sua família foram morar no setor americano da Berlim ocupada, após a guerra. Para trabalhar no então conhecido como

German Entomological Institute ele tinha que passar pela polícia de fronteira entre os dois lados oriental e ocidental de Berlim, o que levava 4 horas por dia, na fronteira, para que ele retornasse para casa. Com a construção do muro de Berlim, ele acabou desistindo, sendo empregado pelo Department for Phylogenetic Research at the State Museum of Natural History (Departamento de Pesquisa Filogenética do Museu Estadual de História Natural) em Stuttgart. Hennig tornou-se evidente na ciência da taxonomia com a revisão para o inglês de seu original em alemão de “Phylogenetic Systematics” em 1966.

Para saber mais sobre a importância do monofiletismo para a sistemática, acesse o trabalho de Charles Morphy Dias dos Santos, intitulado: Os dinossauros de Hennig: sobre a importância do monofiletismo para a sistemática biológica, publicado pela Scientiae Studia. O trabalho está em formato pdf e é grátis. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ss/v6n2/03.pdf>

A Sistemática Filogenética na verdade é uma escola de pensamento, que fornece métodos objetivos para a reconstrução da história evolutiva dos grupos. Dessa forma, ela trata da origem e da evolução da biodiversidade, inferindo as condições básicas e as séries de transformações que poderiam ou teriam ocorrido para as características, ou seja, busca inferir como as modificações ocorreram, assim formulando as hipóteses entre o parentesco entre os táxons. Por meio da sistemática filogenética, a ideia da evolução orgânica foi alterada de uma narrativa sobre a história da vida para uma teoria científica que versa sobre a organização do mundo natural por meio de uma estrutura hierárquica particular.

A escola anterior à Sistemática Filogenética poderia ser chamada de “tradicional”. Para fazer a ordenação dos grupos dependia-se da experiência e digamos da autoridade do pesquisador. A aparência morfológica externa e as semelhanças ou falta delas, era o fundamento dos grupos. Essa escola, como vimos, era Aristotélica e Lineu foi seu maior propagador. O homem tornou-se um ser à parte, fruto da criação especial, sendo que os demais organismos tornam-se superiores ou inferiores, uma abordagem válida para os animais e vegetais, porém perigosa, pois pode ser muito mal interpretada, levando os iniciantes a interpretar a evolução como algo a ser conquistado pelo organismo, que haveria um ponto final em algum momento, finalista, que é uma ideia errônea.

Desde Aristóteles e da antiguidade clássica, buscavam-se jeitos de se identificar, na natureza, quais grupos realmente seriam reais e quais seriam apenas fruto de opiniões ou inferências humanas errôneas. Sabe-se que as primeiras classificações não tinham qualquer finalidade filética (saber a origem e parentesco entre eles), pois se acreditava que todos os seres vivos tinham uma origem única e atemporal, ou seja, surgiram todos ao mesmo tempo. Não haveria graus de parentesco, pois o mundo dividia-se em animais e vegetais. Não é preciso, por conta disso, afirmar que a classificação Lineana era *artificial*, pois a própria palavra torna-se

pejorativa, a um dos maiores trabalhos efetuados na Biologia. Porém, deve-se levar em conta que ela é não natural.

Este pensamento levou à formação da escola evolutiva ou “gradista”. Esta escola é impregnada de conceitos de “progresso” ou “perfeição”. Assim, os chimpanzés são mais “evoluídos” porque se aproximam do homem e outros, mais primitivos, estão em direção oposta. Essa ideia de “involução” sugere degeneração anatômica ou funcional. A capacidade de adaptação torna o grupo promovido graças à sua diversificação em relação ao “padrão primitivo”. Muitas classificações gradistas são usadas até hoje. Esta escola busca refletir a evolução, porém, em determinados momentos, essa opção era preterida em relação a tais «graus evolutivos». Por exemplo, os peixes “pulmonado” são evolutivamente mais próximos dos tetrápodos, ainda são colocados como Classe Pisces – Vertebrata.

A escola “Numérica” ou “Fenética” surgiu junto com a Cladística, nos anos 50. Encontra base no advento da informática, com algoritmos computacionais, não leva em conta a questão filogenética, mas apenas o grau de semelhança ou similaridade entre os organismos. A metodologia numérica produz dendrogramas<sup>31</sup> chamados de fenogramas. Os feneticistas defendem que o grande número (as vezes milhares) de caracteres provavelmente representará a filogenia do grupo. A taxonomia numérica possui técnicas atraentes que são utilizadas pelos sistematas filogenéticos, produzindo as **árvores filogenéticas**<sup>32</sup>.

A inferência filogenética trata de agrupar organismos em grupos monofiléticos, refletindo a ancestralidade comum, sem se deixar enganar pelas homoplasias. Para reconhecer um **grupo monofilético**<sup>33</sup>, segundo Hennig trata-se de saber se os membros compartilham estados de caráter unicamente derivados: sinapomorfias que surgiram unicamente uma vez. Exemplo: a presença de **âmnio**<sup>34</sup> é uma sinapomorfia que une répteis, aves e mamíferos em um grupo: Amniota. Dentro de Amniota encontramos avestruzes e pinguins que compartilham a sinapomorfia penas, característica que os colocam em Aves, um grupo monofilético (Figura 5).

<sup>31</sup>Dendrograma: significa qualquer gráfico ramificado que conecta elementos. Uma “filogenia” de forma geral é um dendrograma cujos elementos são táxons e cujas conexões indicam maior proximidade genealógica ou ancestralidade comum.

<sup>32</sup>Árvores filogenéticas: são dendrogramas que expressam relações filogenéticas tanto entre táxons terminais (espécies recentes ou uma espécie fóssil), quanto em espécies ancestrais e espécies descendentes.

<sup>33</sup>Grupo monofilético: táxon que consiste de espécies, todas derivadas de um táxon ancestral comum. Em taxonomia cladística, o termo descreve um táxon cujos componentes descendem todos de um mesmo ancestral. Na escola gradista é chamado de grupo holofilético.

<sup>34</sup>Âmnio ou bolsa amniótica: bolsa em formato de saco repleta de líquido amniótico que tem função protetora de choques térmicos ou mecânicos. Nas aves e répteis situa-se nos ovos dos mesmos, envolto pelo alantocórion. Nos mamíferos é envolto pelo córion que por sua vez está envolvido pela placenta.

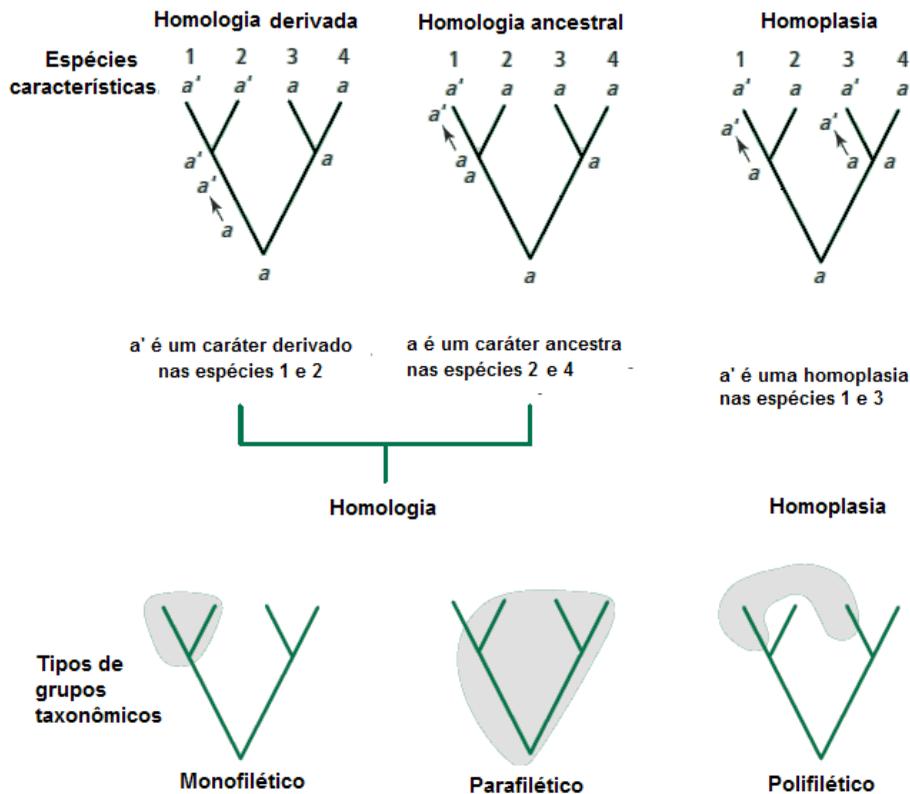


Figura 5 – Diferentes tipos de caracteres e grupos taxonômicos: monofilético, parafilético e polifilético.

Fonte: Traduzido de RIDLEY (2006).

## 2.1 Evolução e filogenia: conceitos

Verificando alguns conceitos, no processo de anagênese a forma se modifica com o tempo. Por exemplo, uma mutação permite que um indivíduo de *Escherichia coli* apresente uma mutação qualquer. Toda a população dessas bactérias, num determinado local, é sensível ao antibiótico ampicilina, mas uma mutação nesse único indivíduo, totalmente ao acaso, deixou o mesmo resistente à ampicilina. Num evento qualquer esse antibiótico foi adicionado ao caldo dessa população. O genótipo mutante agora passa a ser privilegiado, por ter ganho uma vantagem competitiva, antes inútil, porém silenciosa. Esse genótipo irá prevalecer e seus descendentes tomarão o lugar dos outros no caldo de cultura. Ao final da anagênese dessa população (ou espécie) não ocorreu aumento da diversidade. Agora todos são descendentes do mutante, que na verdade se tornou a forma selvagem.

Para que haja aumento da diversidade é necessário que essa bactéria dê origem a duas espécies descendentes: a e b, a partir da cladogênese (es-

peiação). Para que isso ocorra, o fluxo de genes entre a e b deve cessar e os mesmos devem ficar isolados para que se tornem duas espécies distintas (veja os eventos de especiação neste material). Portanto, para que haja uma divisão efetiva, uma quebra espacial geográfica pode ser necessária para que se originem novas espécies. Portanto, a modificação de estruturas é devido à anagênese e a diversidade à cladogênese.

Um dos conceitos fundamentais para a Sistemática Filogenética é a proposição de grupo monofilético. Grupos monofiléticos são aqueles que contêm o ancestral comum mais recente e todos os descendentes desse ancestral e podem ser identificados por compartilharem características exclusivas, as sinapomorfias, resultantes do processo evolutivo. Hennig propôs que apenas os grupos monofiléticos podem ser considerados naturais, pois são eles que carregam a informação da história evolutiva dos grupos em discussão e, portanto, refletem diretamente o processo de descendência com modificação.

Para compreender Hennig temos que considerar que, entre os organismos somente podem ser conhecidas as relações de parentesco ou de grupos-irmãos (do tipo 'A' e 'B' compartilham um ancestral comum exclusivo, ausente em um terceiro grupo, 'C') e não as relações de ancestral descendentes (do tipo 'A' deu origem a 'B'). Independentemente da quantidade de informações disponíveis, nunca se pode estabelecer se um determinado grupo foi o ancestral de qualquer grupo recente. A partir do reconhecimento das relações desses grupos, expressas em gráficos como os cladogramas<sup>35</sup>, verifica-se e reconhece-se a relação filogenética e a história evolutiva.

Para iniciar a discussão sobre a relação de parentesco entre duas espécies (ou duas OTUs<sup>36</sup> - "*Operational Taxonomical Unit*" – Unidade Taxonômica Operacional) em estudo, iniciamos a partir de uma hipótese de que teria existido pelo menos um ancestral comum a ambas. Se estivermos estudando três, formulamos a hipótese de que há um ancestral comum a duas delas que não é comum à terceira. Aumentando o número de espécies, aumentamos este raciocínio até completar todas as espécies. Não se pode esquecer que só existe uma real história evolutiva e de parentesco entre aquelas espécies, não pode haver mais de uma filogenia. Porém, a árvore filogenética é uma hipótese de como ocorreram e em que momento ocorreu a separação destas espécies. A filogenia pode ocorrer em vários níveis, desde grandes árvores que abarcaria toda a vida, como aquelas mais restritas, somente a grupos bastante relacionados, como gênero por exemplo.

Para se construir a Filogenia de um determinado grupo é necessário considerar as seguintes etapas:

- determinar o grupo monofilético focal, ou seja, o grupo dos organismos cuja filogenia se quer determinar;

<sup>35</sup>Cladograma: é um dendrograma que expressa relações filogenéticas apenas entre táxons terminais, evidenciadas por sinapomorfias. Assim, um cladograma nunca inclui a indicação que uma espécie descende de outra, mas apenas que um grupo de espécies deve ter tido uma espécie ancestral, conforme indicam uma ou mais sinapomorfias. Portanto, os cladogramas sempre, representam hipóteses em permanente transformação à medida que nosso conhecimento da diversidade biológica de táxons aumenta.

<sup>36</sup>OTU: sigla para "*Operational Taxonomical Unit*" – Unidade Taxonômica Operacional, especialmente usado na taxonomia fenética para designar os táxons terminais no universo de uma análise, podendo ser um acesso, uma espécie, um táxon, um gene, uma população etc.

- escolher as características que serão usadas na análise filogenética e identificar suas possíveis formas;
- determinar as características ancestrais e derivadas e
- distinguir entre características homólogas e homoplásicas.

Nas filogenias, uma das maiores dificuldades é distinguir características ancestrais e derivadas porque algumas características são tão diferentes de seus estados ancestrais que se tornam irreconhecíveis; apesar do que, o que diferencia uma característica da outra é apenas um caráter; por isso, esse processo de escolha é chamado de **polarização do caráter**<sup>37</sup>. Com base na teoria da evolução, sabe-se que uma característica ancestral é encontrada não apenas entre as espécies do grupo focal, mas também nos grupos externos. Muitos elementos de cladística são numéricos e utilizam recursos computacionais.

O problema principal para o sistemata filogenético tanto no caso do estudo morfológico, ou mesmo no uso de sequências de DNA ou proteínas (veja abaixo), distinguir entre homologias e homoplasias. Caracteres diferentes podem gerar agrupamentos filogenéticos diferentes, chamados “conflitos de caráter”. Veja: supomos que uma mutação X seja capaz de agrupar {{A,B}, {C,D}} e outra mutação Y que favorece o grupo {{A,C}, {B,D}}, gerando hipóteses filogenéticas diferentes e conflitantes. Como escolher entre qual das duas mutações utilizar? A resposta reside em mutações acessórias, que podem apoiar uma ou outra hipótese. O critério chamado “**parcimônia**”<sup>38</sup> permite a tomada de uma decisão, a melhor hipótese é aquela que tem menor número de passos, o que minimiza o conflito de caracteres. Assim, a presença de muitos dados, onde podemos encontrar ajuda acessória à busca principal, pode garantir uma análise parcimoniosa.

### 3. Desenvolvimento

Ao revelar os mecanismos genéticos e embrionários subjacentes às variações, a evo-devo permite que contrastemos as vias evolutivas de diferentes grupos. Podemos agora desvendar antigos mistérios, como o mimetismo batesiano em borboletas, o melanismo em mariposas e até mesmo a evolução do tamanho e da forma dos bicos de tentilhões. Em breve teremos um panorama detalhado de muitos dos exemplos clássicos da seleção natural, e *entenderemos a fundo o surgimento e a seleção das variações* (CARROL, 2006).

A evolução morfológica do organismo é um novo campo de pesquisa, que vem se desenvolvendo nos últimos 10 ou 15 anos. Muitos genes que controlam o desenvolvimento foram identificados. Para isso, inúmeras técnicas moleculares podem ser usadas para estudar como esses genes evoluíram

<sup>37</sup>Polarização do caráter: os dois extremos de uma série de transformações em um determinado caráter. Inclui o(s) mais antigo(s) - plesiomórfico (s), e o(s) mais recente(s) - apomórfico (s). É importante para determinar a ordem em que as transformações ocorreram durante o curso evolutivo.

<sup>38</sup>Parcimônia: (do latim: *parco*, simples). No estudo epistemológico, as hipóteses mais parcimoniosas são as mais econômicas. Estas são aquelas que exigem um pequeno número de premissas. Em análise filogenética, significa a escolha mais simples ou mais econômica em face de um conjunto de dados, sobre quais são os caracteres sinapomórficos, dentre um conjunto de apomorfias compartilhadas que apresentam conflito ou incongruência. Assim, para uma mesma base de dados, o cladograma ou os cladogramas que admitem um menor número de eventos de surgimento de apomorfias seriam mais aceitáveis que os cladogramas que admitem um número maior de eventos. Trata-se de um conceito bastante intuitivo, quanto mais antigo é o grupo mais mutações surgiram à mais tempo do que as recentes e que são restritivas a um grupo só.

em diferentes espécies. Portanto, à medida que novas técnicas aparecem para solucionar um determinado problema, novas descobertas exigem novas técnicas. Esse é o moto perpétuo da ciência moderna.

Temos certeza que o leitor já ouviu o mote “*a ontogenia recapitula a filogenia*”. Lançada no século XIX, a teoria da recapitulação, foi atribuída a Ernst Haeckel e alcançou status de ser uma das ideias mais influentes e apoiadas da Biologia pós-Darwin, na época. Como munição para esta teoria, temos toda uma disciplina de anatomia comparada, disciplina muito desenvolvida no século XIX. Ilustrando essa colocação, veja a Figura 6.

Cada etapa do desenvolvimento seria uma recapitulação de uma etapa ancestral da história evolutiva da espécie. Nos estágios ontogenéticos precoces, surgiríamos como peixe, réptil, ave etc. A aparência transitória de estruturas semelhantes a fendas branquiais no desenvolvimento dos mamíferos, incluindo o homem, é um exemplo dos mais clássicos. Assim, recapitulamos um momento evolutivo onde teríamos passado por esse estágio ancestral. A partir da década de 20, verificou-se que, a proposta é absurda, da maneira clássica como foi colocada. *Não que o fenômeno da recapitulação não ocorra*. Sugeriu-se então uma perspectiva mais abrangente e atualizada para o fenômeno da recapitulação.

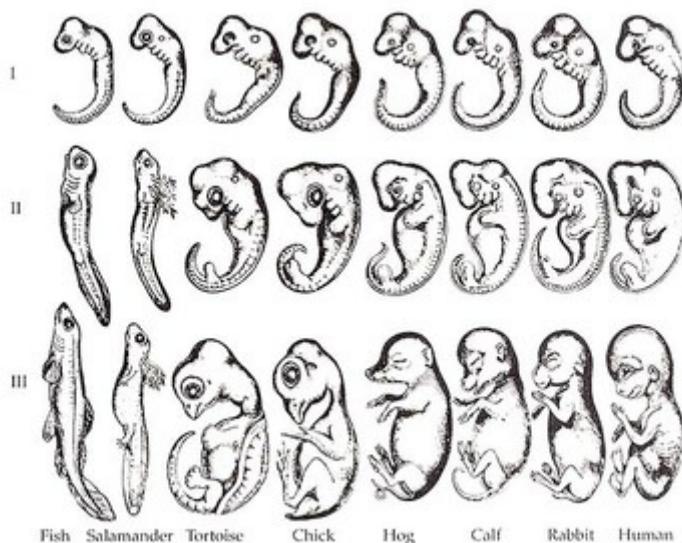


Figura 6 – Famoso desenho feito no século XIX, atribuído a Ernst Haeckel<sup>38</sup> esquematizando a correlação entre diferentes estágios de desenvolvimento em embriões de vertebrados. Atenção: Apesar da beleza e aparente consistência deste estudo, hoje sabemos que o pesquisador fraudou as imagens de embriões para maximizar as semelhanças entre as diferentes espécies. Ele também modificava as formas e as escalas, para adequá-los aos seus princípios artísticos.

Fonte: LENT, (2010).

A teoria da recapitulação funciona bem somente quando temos evolução por adições terminais. A adição terminal foi explicada pelo naturalista americano Stephen Jay Gould. Imagine que um organismo, nas suas etapas iniciais de desenvolvimento, desenvolve-se por intermédio de estágios: A, B e C. Uma adição terminal mostra que o estágio A, de desenvolvimento, “passa” para estágio B e posteriormente o estágio B para C (A à B à C).

Neste caso temos adição terminal e recapitulação da história evolutiva das formas adultas ancestrais. No entanto, cada vez mais aparecem exemplos que mostram que, no desenvolvimento larval (como a lagarta dos lepidópteros) não são estágios ancestrais, e sim, são meras modificações precoces destas larvas (A à C à B). Resumindo: frequentemente a evolução ocorre por adição terminal, mas as fases iniciais podem ser modificadas alterando seu desenvolvimento e isto pode simplesmente indicar mudanças de regulação nos gradientes do crescimento precoce. Novas ideias e descobertas têm ajudado na elucidação das antigas observações dos naturalistas.

A biologia evolutiva do desenvolvimento ou popularmente evo-devo (Evolutionary Developmental Biology) estuda o desenvolvimento através de disciplinas como a embriologia, ontogenia e genética, conjuntamente com estudos de paleontologia, buscando compreender a evolução de estágios intermediários entre estruturas muito díspares, mas possivelmente, homólogas, não encontradas no registro fóssil. O evo-devo poderia então fechar algumas lacunas por produzir paralelos entre o desenvolvimento individual de organismos e a história evolutiva de um atributo de um grupo.

Os estudos evolutivos, classificações biológicas e reconstruções filogenéticas, têm assumido a perspectiva de uma grande disciplina integrada, utilizando informações das mais diferentes fontes, em particular da morfologia comparada, genética, biologia do desenvolvimento e paleontologia. Nenhuma dessas abordagens pode ser colocada como superior às outras. A contribuição dos diferentes campos abriu novas perspectivas para a solução de problemas que não podem ser esgotados em uma única disciplina.

Como todo iniciante inexperiente, seu início se caracteriza pelo exagero das expectativas, como é de praxe em qualquer nova área da ciência que aporte um grande número de pesquisadores, esforço conjunto e dinheiro. O uso da evo-devo ligada a estudos de paleontologia e sistemática, desde que corretamente utilizados os conceitos dessas áreas tradicionais, promete bons resultados para o entendimento de questões da biologia evolutiva. A história ainda mal começou...

### 3.1 Desenvolvimento de *Drosophila*

Todos já ouviram falar de células-tronco, totipotentes, capazes de se desenvolver em qualquer tipo de célula. As células animais são totipotentes somente num curto estágio embrionário e logo se comprometem com a diferenciação celular, mesmo após algumas poucas divisões celulares. A totipotência é limita-

da, exatamente porque um gene específico torna-se expresso precocemente, desencadeando uma cadeia de reações moleculares que vão determinar o destino daquela célula (Figura 7). Apesar de bons avanços, as bases da diferenciação celular ainda são um desafio da moderna biologia evolutiva.

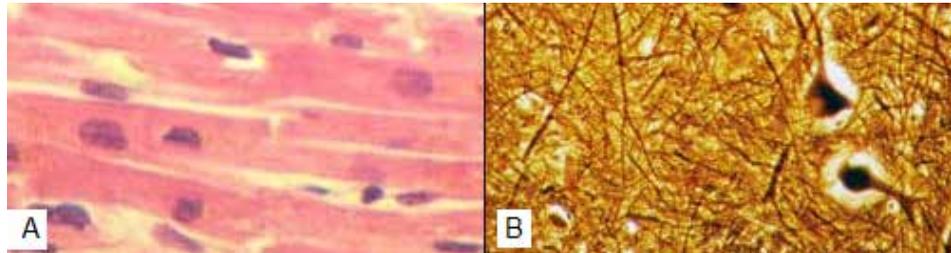


Figura 7 – Dois exemplos de diferenciação celular. Organismos multicelulares como nós possuem milhares de tipos celulares diferentes. Cada um desses tipos está otimizado para uma função ou estrutura. Entretanto, o DNA de todos eles é exatamente o mesmo. Essa diferenciação envolve a expressão de genes específicos para cada célula. Em A - células cardíacas; B - células neurais.

Fonte: <http://www.pbs.org/wgbh/nova/genes/fate-01.html>

Se todas as células dos organismos possuem o mesmo genoma, sendo derivadas da mesma célula original, como surgiriam os tipos diferentes de células? Durante certo tempo, os pesquisadores acreditavam que, com o desenvolvimento, *genes eram perdidos*. Um experimento muito conhecido foi feito por Robert William Briggs e Thomas King, no começo da década de 50. Eles removeram os núcleos de ovócitos não fertilizados de sapo *Rana pipiens*, isolaram os núcleos de blástulas de sapo (um estágio embrionário inicial) e injetaram estes núcleos individualmente nos ovócitos, bastante parecido com o processo de fertilização in vitro, só que com um núcleo não fertilizado. Os ovócitos se dividiram em girinos completos que se transformaram em sapos.

Esse é o princípio do que se chama hoje em dia de “clonagem” (não é clonagem molecular, visto no material de biologia molecular). Em 1997, os pesquisadores do *Roslin Institute* da Escócia anunciaram o processo de clonagem de ovelhas, utilizando como núcleos de células diferenciadas de um animal adulto. Note que, se o material genético fosse perdido durante o desenvolvimento, o núcleo adulto teria acumulado perda de genes e, portanto, a clonagem não teria sucesso em produzir um animal completo, já que estariam faltando informações!

As moscas das frutas possuem um dos sistemas mais bem conhecidos de como se processa o desenvolvimento. Já que genes *não* são perdidos durante o desenvolvimento, como ocorre a expressão diferencial de genes durante o desenvolvimento? Como as células regulam a expressão de genes de uma maneira coordenada para que o organismo passe por todos aqueles estágios de desenvolvimento embrionário sem tropeços?

As moscas das frutas possuem três partes corporais básicas: cabeça, tórax e abdome. O tórax contém três segmentos: no primeiro segmento torácico possui um par de pernas, o segundo, possui um par de pernas e um par de asas e o terceiro possui um par de pernas e um par de halteres (rudimentos de asas). No abdome encontramos nove segmentos. No momento da fecundação de um oócito de mosca das frutas o seu núcleo diploide se divide em nove vezes, sem que haja divisão do citoplasma, formando uma célula multinucleada. Inicialmente estes núcleos estão concentrados no citoplasma, mas posteriormente se espalham, migrando para a periferia da célula embrionária, continuando a se dividir, formando uma espécie de cinturação de núcleos interno a membrana celular.

Após esta fase, a membrana celular se invagina criando uma camada de aproximadamente 6.000 células na superfície do embrião. Quatro núcleos numa extremidade formam células polares, que terminam por dar origem às células germinativas. O embrião então sofre uma nova fase de desenvolvimento em três estágios: observa-se um eixo ântero-posterior e o eixo dorso-ventral, aparece a separação entre os segmentos individuais e por fim, cada segmento assume a sua identidade. Três categorias de genes regulam este desenvolvimento: genes de polaridade embrionária, genes de segmentação e genes homeóticos, conforme a Figura 8. Os primeiros estabelecem os eixos corpóreos principais, os genes de segmentação determinam o número e polaridade dos segmentos corpóreos e os genes homeóticos estabelecem a identidade de cada segmento.

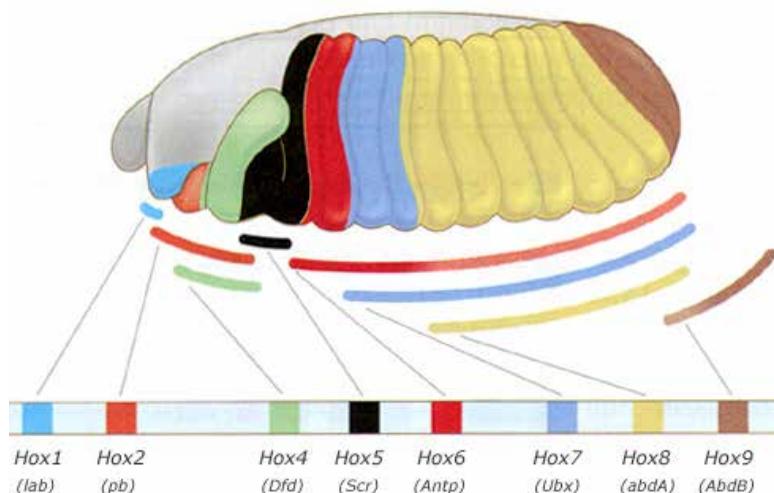


Figura 8 – Expressão dos diferentes genes *Hox* em embrião de mosca das frutas. As linhas curvas mostram a localização da expressão dos genes no corpo da larva. A barra indica o cromossomo e a disposição desta família de genes. Alguns dos genes e suas funções são citados no texto.

Fonte: <http://www.pbs.org/wgbh/nova/genes/fate-03.html>

Genes de polaridade embrionária são responsáveis em estabelecer os dois eixos principais de desenvolvimento. Estes genes são transcritos em mRNA durante a formação do ovócito no genitor materno, e esses mRNAs são então traduzidos em proteínas que regulam a transcrição de outros genes que determinam as polaridades. Estas proteínas distribuem-se assimetricamente no citoplasma, formando a polaridade do embrião. No caso do eixo dorso-ventral, pelo menos 12 genes diferentes determinam este eixo e um dos mais importantes é o gene dorsal. Onde a proteína produzida por este gene se posicionar, esse lado será o dorso da mosca.

Os genes da polaridade segmentar afetam a organização dos segmentos. As mutações nestes genes fazem com que parte de cada segmento seja deletada e seja substituída por uma imagem especular de parte ou todo do segmento adjacente. Por exemplo, as mutações no gene *Gooseberry* fazem com que a metade posterior de cada segmento seja trocada pela metade do segmento adjacente.

Após a segmentação da mosca for concluída, tem lugar a atividade dos genes homeóticos, trazendo características que fazem a identificação dos segmentos. Mutações nos genes homeóticos fazem com que partes do corpo apareçam em segmentos errados. As mutações homeóticas são muito úteis para estudos do desenvolvimento. Naturalmente algumas mutações ocorrem como a mutação chamada *Antennapedia* (*Antp*) (Figura 9), onde as moscas apresentam pernas no lugar de antenas.

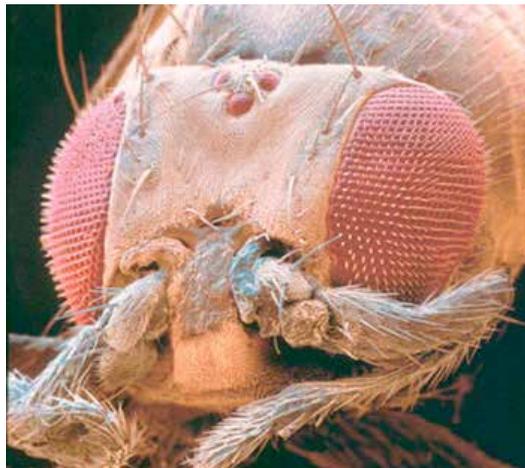


Figura 9 – Micrografia de mosca apresentando a mutação *Antennapedia* (*Antp*).

Fonte: <http://home.comcast.net/~mjmayhew42/Biology%20notes/gene%20reguation%20notes.htm>

Genes homeóticos fazem a identidade das células do segmento, informando que dentro de tal limite elas fazem parte de determinado segmento. Se o gene homeótico é mutado, o endereço é errado e as células acabam se desenvolvendo como se estivessem em outro lugar no embrião. Genes similares pode

ser parte de uma via de desenvolvimento comum a várias espécies, com efeitos bem diferentes. Um gene chamado *Hox AbdB* ajuda a definir a extremidade posterior da *Drosophila*<sup>39</sup>. Um grupo similar deste mesmo gene em aves divide a asa em três segmentos (veja abaixo). Genes homeóticos chamados *Ultrathorax (Ubx)* são ativados por concentrações específicas de proteínas chamadas Hunchback. As concentrações adequadas destas proteínas só ocorrem na região média do embrião e assim *Ubx* é expresso somente nestes segmentos.

As proteínas regulatórias são proteínas que se ligam ao DNA, ativando ou desativando genes através de sua ligação com o aparelho de transcrição (lembre-se da enzima RNA polimerase). Cada gene caracteriza-se por possuir um *homeobox*<sup>40</sup>, que consiste num grupo de cerca de 180 nucleotídeos que codificam 60 aminoácidos que servem como domínio de ligação ao DNA. Estes *homeobox* são encontrados nos genes de segmentação e também em outros genes que têm função estrutural e de desenvolvimento espacial.

Os genes homeóticos chamados *Hox* formam uma família de genes (Figura 10) e, como vimos, podem ser encontrados similarmente em vários organismos. Utilizando sondas moleculares (verifique seu material de Biologia Molecular sobre sondas moleculares e outras técnicas) que se hibridizavam com estas sequências de DNA, foram encontrados genes *Hox* e seus respectivos *homeobox* em todos os animais estudados (mamíferos, aves, répteis, insetos etc.). Também são encontrados em fungos e plantas, revelando que surgiram cedo na evolução dos eucariontes. Nos vertebrados, encontramos quatro grupos de genes *Hox*, cada um com 9 a 11 genes. Um fator evolutivo importante que podemos perceber é que exibem quase a mesma relação de ordem no cromossomo e expressão ao longo do eixo antero-posterior de *Drosophila*. Codificam fatores de transcrição que ajudam a determinar a identidade dos segmentos corpóreos ao longo do eixo anterior-posterior.

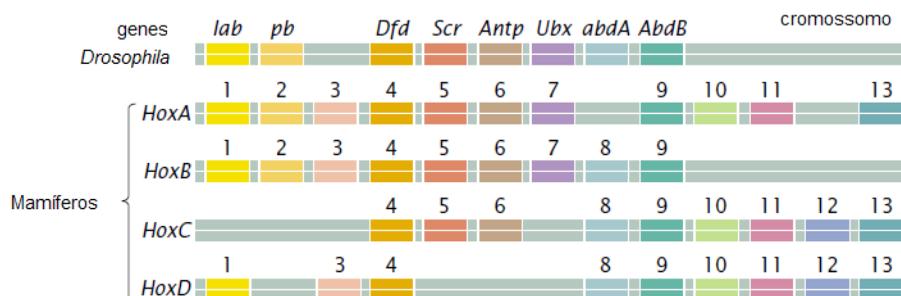


Figura 10 – Genes homeóticos são homólogos entre si mostrando similaridades entre os encontrados em *Drosophila* e mamíferos. Os genes estão designados na parte de cima e os nomes foram substituídos por números. A barra cinza é o cromossomo. Note que *HoxB* de mamíferos são muito similares em sequência dos genes nos cromossomos com a *Drosophila*, situando-se na mesma ordem.

Fonte: Modificado de PIERCE (2003).

<sup>39</sup>Conheça o site “*The interactive fly*” ou “*a mosca interativa*” com guia para o desenvolvimento de *Drosophila* e evolução de metazoários. Disponível em: <http://www.sdbonline.org/fly/aimain/1aahome.htm>. Acesso em janeiro/2012.

<sup>40</sup>Homeobox: os genes *Homeobox* e as proteínas que eles codificam, chamadas proteínas que contém homeodomínios, foram descobertos em 1983. Eles não somente são genes controladores do desenvolvimento como também possuem cruciais papéis na embriogênese, são encontrados em praticamente todos os organismos. O chamado homeodomínio é um local específico na proteína que se liga ao DNA de uma forma específica.

## 4. Genômica evolutiva

### 4.1 Evolução molecular

O DNA é formado por nucleotídeos que podem ser substituídos nas mutações (veja seu material de biologia molecular). O DNA codifica RNAm que é trocado por aminoácidos formando as cadeias polipeptídicas que formam as proteínas. O DNA forma o genótipo dos organismos, sua expressão em RNAm e proteínas produz o fenótipo em função das necessidades do ambiente. Como é possível que a evolução ocorra tanto no genótipo quanto no fenótipo? As mutações no DNA são deletérias à evolução, ou são elas que garantem a variabilidade necessária onde a seleção pode atuar?

A definição de mutação é tão complicada quanto à definição de gene. Mutações podem ser muito abstratas. Podemos dizer que é a mudança nas sequências de bases do DNA, mas também pode ser usada na variação do número de cromossomos, quebras, inversões e transversões (alterações no cariótipo) etc. O termo gene, até bem pouco tempo atrás poderia ser tratado como o segmento de DNA que codifica um RNA ou um polipeptídeo. Entretanto, muitos se perguntam se íntrons e sequências regulatórias do DNA (produzem ou se ligam a proteínas regulatórias) poderiam ou deveriam constar na definição de um gene.

Os polimorfismos gênicos (Figura 11) ou as diferentes formas que uma sequência de DNA pode assumir são informações preciosas para o biólogo. Existem áreas do DNA mais polimórficas que outras, portanto, são áreas mais ricas em informação. O polimorfismo de DNA permite que possamos isolar uma área, amplificá-la e sequenciá-la, contando as alterações que podemos encontrar. Uma vantagem do uso do DNA para estudar os organismos e trabalhar na sua sistemática é que o DNA não varia com o tempo, ou seja, o mesmo conjunto genômico do nascimento acompanha o organismo até sua maturidade e morte, e não deve ser alterado pelo ambiente.

A morfologia muda com a idade, o sexo, condições patológicas, condições ambientais e ecológicas submetidas ao organismo em questão. Pesa a favor do uso de dados de DNA em detrimento da morfologia, que a base genética da morfologia é geralmente desconhecida. Por exemplo, asas de besouros de espécies diferentes podem ser distintas em coloração ou venação, mas não sabemos quantos genes definem estas características.

A presença ou ausência de espinhos em uma planta conta como dado morfológico, tipo presente/ausente, porém o espinho, aparentemente tão simples, pode ser o resultado de dezenas de genes em interação, uma herança poligênica. Não que isso possa ser um problema para o sistemata, pois não importa se essa herança dessa característica é multigênica. Depende então da pergunta. Se a pergunta é sondar quais as mudanças moleculares estão por trás de uma alteração morfológica, então se torna importante que conheça e se trabalhe as sequências dos genes candidatos.

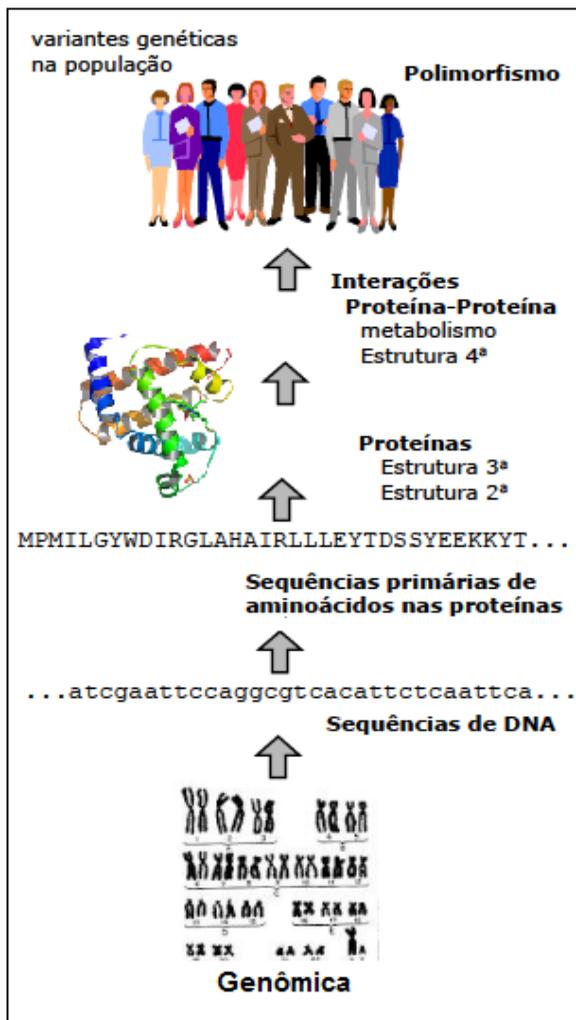


Figura 11 – Relação entre o estudo da genômica e a sociedade humana, de forma geral. A genômica é um conhecimento básico que envolve a estrutura dos cromossomos e a sequência do DNA e a identidade dos genes. Outros estudos envolvem o RNA (transcriptômica), proteínas (proteômica) e metabolismo (metabolômica). Na sociedade, temos o polimorfismo gênico inerente às populações. Este polimorfismo relaciona-se à herança dos alelos dos ascendentes e descendentes de todos os indivíduos. Estas variantes conferem a diversificação necessária à espécie. Estas variantes podem ser devidas à variação em um único nucleotídeo ou todo um cromossomo.

**Fonte:** Esquema dos autores.

A influência do ambiente sobre a morfologia das espécies é vista como prejudicial às análises do sistemata. Por exemplo, um organismo com uma pelagem que muda de cor sob a influência da dieta poderia ser definido como “claro” ou “escuro”, num ambiente diferente. A diferença de cor existe, porém não é hereditária, apenas um reflexo de mudanças ambientais, uma manifestação fenotípica. Dados genéticos são também mais objetivos e não deixam margem para ambiguidades; os nucleotídeos são apenas quatro. Na morfo-

logia podemos ter características intermediárias, características ambíguas como “curto” ou “longo” etc. Grupos que divergiram a pouco tempo, ou com cladogênese recente) geralmente apresentam escassez de dados morfológicos para os estudos filogenéticos. Os dados moleculares podem apresentar polimorfismo suficiente para separar grupos, mesmo em organismos aparentemente idênticos. O genoma de um organismo compreende o conjunto completo de seu DNA. Para se conhecer como os genomas mudam durante a evolução (veja parte de seu material de Biologia Molecular).

Outra vantagem é que dados moleculares são muito abundantes, podendo ser tabulados em grande quantidade. Os bancos de dados disponíveis na rede mundial de computadores (como o *GenBank*) são de acesso público e contém trilhões de sequências de DNA, RNA, proteínas e estruturas. Só o projeto *Genoma Humano* possui 3,5 bilhões de nucleotídeos. Esse recurso é extremamente valioso para os estudiosos da evolução. Uma última vantagem é que é possível extrair DNA de carcaças, peles, dentes, ossos, fezes, pelos etc., o que possibilita que animais que com a morte perderam as características fenotípicas, ainda podem ser utilizados na filogenia molecular.

Dados moleculares também são úteis na comparação de organismos que se separaram a muito tempo, como mamíferos, multicelulares e bactérias. Porém, existem moléculas ubíquas na natureza, ou seja, que se mantêm presentes, mesmo em organismos remotamente aparentados. São moléculas que apareceram cedo na história dos organismos por desempenharem funções fundamentais aos organismos, como as da função de replicação e síntese proteica, que surgiram cedo na história da vida. Utilizando o gene 16S, que codifica a respectiva unidade ribossomal, é possível inferir uma filogenia de organismos tão evolutivamente distantes, como bactérias, arqueobactérias<sup>41</sup> e eucariotos. Note que o ancestral comum aos mesmos remonta entre 3 e 4 bilhões de anos.

<sup>41</sup>Arqueobactérias: ou *Archaea* foram descobertas com estudos de DNA. Formam um grupo monofilético dentro do grupo das bactérias. São procariontes que sobrevivem em condições extremas como as *termófilas* (lembre-se de *Thermus aquaticus*, do seu material de Biologia Molecular), ou que produzem metano, as *metanogênicas*, entre outras.

## Saiba mais



### Glossário importante

**Multipotência:** As células-tronco multipotentes têm a capacidade de gerar um número limitado de células especializadas. Elas são encontradas em quase todo o corpo, sendo capazes de gerar células dos tecidos de que são provenientes. São responsáveis também pela constante renovação celular que ocorre em nossos órgãos. As células da medula óssea, as células-tronco neurais do cérebro, as células do sangue do cordão umbilical e as células mesenquimais são exemplos de células-tronco multipotentes.

**Pluripotência:** capacidade de gerar células dos três folhetos embrionários (tecidos primordiais do estágio inicial do desenvolvimento embrionário, que darão origem a todos os outros tecidos do organismo. São chamados de ectoderma, mesoderma e endoderma). Em oposição às células-tronco totipotentes, as células pluripotentes não podem originar um indivíduo como um todo, porque não conseguem gerar tecidos extra-embrionários. O maior exemplo de células-tronco pluripotentes são as células da massa celular interna do blastocisto, as chamadas células-tronco embrionárias.

Além das filogenias e do estudo evolutivo, é possível utilizar os genes marcadores moleculares para verificar a variabilidade de uma espécie ou táxon. Para a melhoria genética com vistas a melhoramento, é importante saber se as plantas ou animais a serem cruzados apresentam polimorfismo, muitas vezes não explícito nas características morfológicas de algumas variedades ou cultivares. Note que essas árvores filogenéticas não são enraizadas porque não existe a perspectiva evolutiva e sim a perspectiva recente de avaliação dessas OTUs (Figura 12). Na medicina, é possível rastrear a origem de vírus e bactérias que provocam doenças e saber, por exemplo, se houve evolução desses organismos, com a verificação das taxas de mutação de determinados marcadores moleculares. Com as facilidades atuais, poucas semanas após o aparecimento da doença é necessário para sequenciar o genoma de um vírus ou bactéria e utilizando alinhamentos, construir filogenias.

A filogenética, portanto, tornou-se um tipo de biologia evolutiva aplicada, que inclusive pode resolver problemas forenses e médicos, além de ecológicos e genéticos. Existem e vão existir, problemas não resolvidos, que certamente, são os mais difíceis e que demandam mais esforço e mais pesquisa.

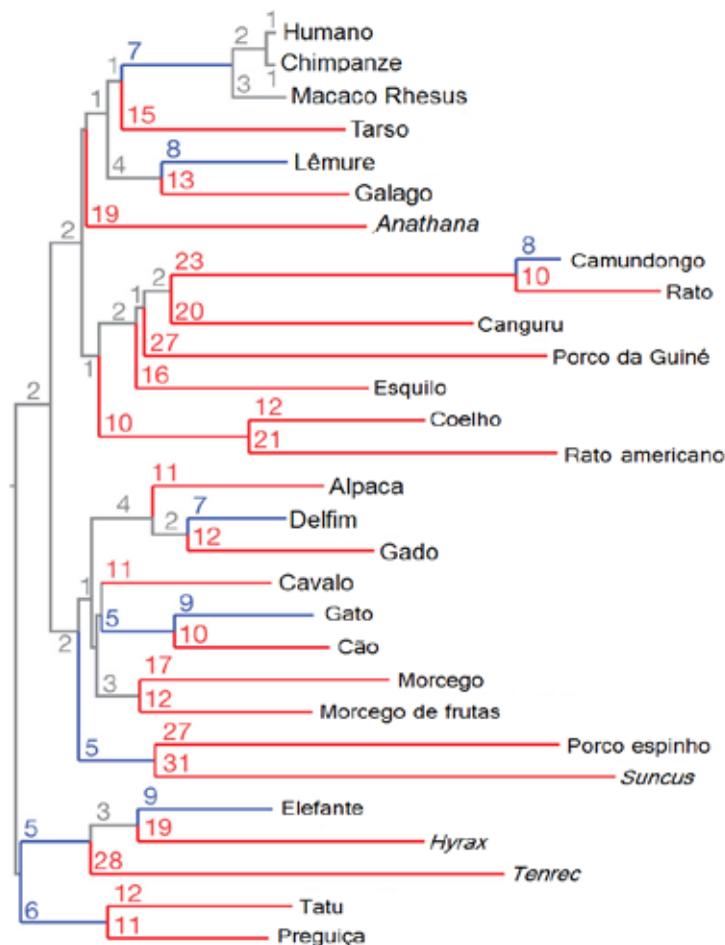


Figura 12 – Árvore filogenética apresentando o estudo de 29 tipos de mamíferos com base de alinhamentos de seqüências genômicas. Os números representam a distância evolutiva relativa. Note que os números referem-se ao tamanho dos clados. Quanto mais distante é a OTU da raiz mais distante essa OTU está do seu suposto ancestral. Alguns animais como o Anathana, Suncus, Hyrax, Tenrec, não tinham tradução para o português, possivelmente por pertencerem a faunas endêmicas exógenas, por isso foi posto o nome de um gênero que pareceu mais próximo.

Fonte: Traduzido de LINDBLAD-TOH et al., (2011).

<sup>42</sup>Apesar das vantagens apresentadas, existem também desvantagens para o uso de DNA nos estudos filogenéticos. Talvez a principal delas seja a dificuldade na análise dos dados, resultados ambíguos e muitas vezes contraditórios. Existem inúmeros programas computacionais, algoritmos e “pacotes” destinados a analisar dados de DNA. Estas ferramentas são muito úteis, porém, podem produzir resultados difíceis de interpretar para o usuário inexperiente.

## 4.2 Evolução de genomas e filogenia

Como os genomas podem evoluir? Quais os genes que podem ser utilizados? Estas e outras perguntas devem ser feitas pelos interessados em trabalhar com as sequências de DNA<sup>42</sup> ou de proteínas. Uma das primeiras questões a serem respondidas é qual é a taxa de mutação dessa sequência ou dessa molécula a ser utilizada como marcador molecular. Estes elementos podem ser usados como relógios, cujos ponteiros giram em velocidades diferentes. Se um usar um relógio muito rápido para uma filogenia muito antiga, haverá tanta variação que as OTUs serão tão diferentes que não haverá modo de agrupá-las.

No contrário, uma filogenia muito recente, com um relógio muito lento, não teria dado tempo para que ocorresse o polimorfismo. Também não haveria informação suficiente para agrupar. O RNA ribossômico (RNAr) torna-se muito útil, pois tanto são encontrados em procariotos, eucariotos e, além do núcleo dos eucariotos, também na mitocôndria. Os genes mitocondriais evoluem de forma mais rápida que os genes nucleares, pois estão mais livres da pressão seletiva.

Assim, são melhor utilizados na faixa de 10 a 100 milhões de anos enquanto que o RNAr nuclear pode ser usado na faixa das centenas de milhões de anos. Portanto, são necessários relógios lentos para inferir relações filogenéticas com tal grau de antiguidade.

Sabemos que durante a evolução dos genomas, ocorreu grande quantidade de duplicação de genes. Estes genes são duplicados por várias razões moleculares, como a presença de transposons, *crossing over* desigual, alterações do cromossomo etc., formando versões diferentes que divergem umas das outras à medida que as mutações se acumulam nestes genes. Formam famílias de genes como vemos nos genes *Hox*, nas globinas, imunoglobulinas e um sem número de outros.

É possível notar no genoma, que quanto mais mutações aparecem, menos aquela sequência está sendo submetida à pressão seletiva. Perceba no contrário, quanto menos mutações surgem numa sequência, significa que ela é muito utilizada. É que quando um gene é muito solicitado, significa que sua proteína é necessária para a sobrevivência do seu portador, portanto, as alterações que naturalmente podem acontecer à esse gene serão negativamente selecionados, ou seja, terão frequência reduzida na população ou até mesmo desaparecer, com o tempo.

Fica estranho falar de homologia dentro de famílias de genes. Genes chamados “ortólogos” são duplicatas de um mesmo gene, do mesmo loco. Genes “parálogos” também são genes duplicados, porém situam-se em locos diferentes. A inferência filogenética deve sempre ser feita entre genes ortólogos, porém pode haver perda destes genes e acabaremos utilizando parálogos, inadvertidamente. Verifique estes conceitos na Figura 13.

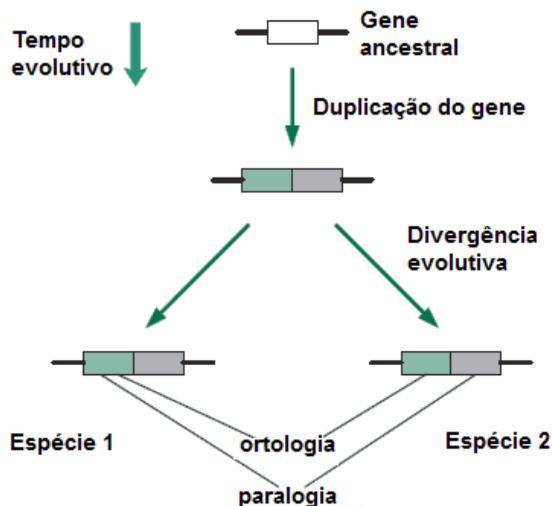


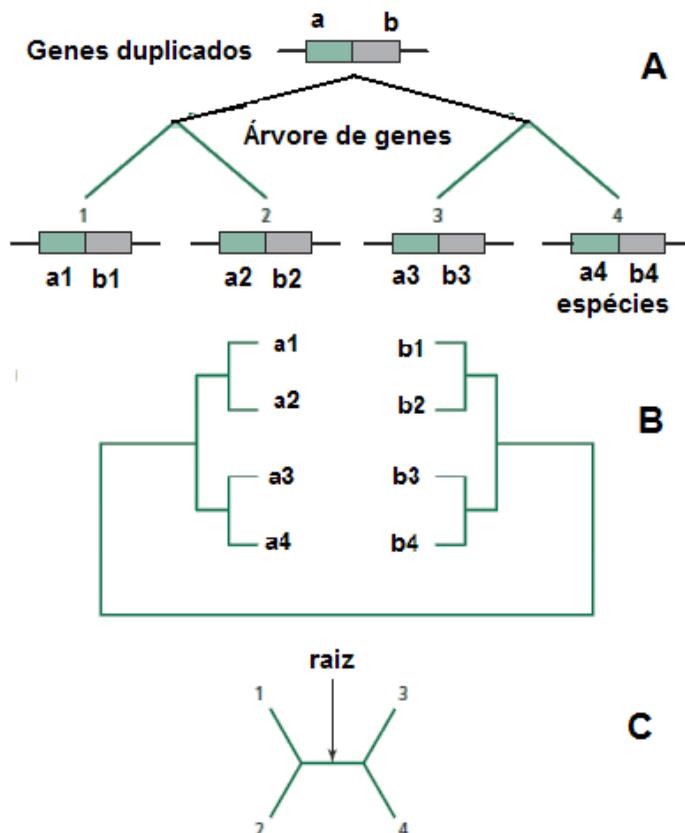
Figura 13 – Homologia entre genes duplicados, os genes ortólogos e parálogos são resultado de duplicação de genes. As cópias que se tornam diferentes são parálogos e ocupam locos diferentes.

Fonte: Traduzido e modificado de RIDLEY (2006).

Nas filogenias, às vezes torna-se necessário encontrar a raiz da mesma. A posição da raiz da filogenia mostra onde se encontra o suposto ancestral comum e marca a origem temporal da evolução. A posição da raiz pode ser obtida pelos métodos conhecidos cladísticos, como a polarização de caráter, ou comparação com grupo externo. Os genes parálogos podem ser usados no enraizamento da árvore: ao construir uma filogenia de genes parálogos construímos uma árvore como num espelho, bastando colocar essa raiz na metade desta imagem especular. Veja as etapas desse enraizamento na Figura 14.

Figura 14 – Utilização de gene parólogo em enraizamento de filogenia. (A) Duplicação de genes separando-se em vários locos, obtendo-se neste caso, quatro espécies descendentes. (B) Os oito genes produzidos formam uma família de genes que é usada para produzir uma árvore de genes, sem raiz. (C) O enraizamento faz-se utilizando o ponto médio dessa árvore especular, significando que ali é o ponto de origem de todo o processo de duplicação.

Fonte: Traduzido e modificado de RIDLEY (2006).



### 4.3 Árvore da vida

Tanto os cientistas naturais e físicos apresentam a classificação biológica como uma maneira pela qual os organismos são classificados, de acordo com características comuns ou compartilhadas. Dois organismos serão localizados em proximidade dentro de um sistema de classificação se esses dois organismos têm características semelhantes. Quanto maior o número de características comuns, a aproximação dos dois organismos aumenta.

A capacidade de classificar organismos é provavelmente um reflexo da noção de que todos os organismos vivos compartilham um ancestral comum. Em essência, a evolução darwiniana já criou um esquema de classificação. O trabalho do sistemata é ilustrar este esquema em um contexto taxonômico. Nossa capacidade de recapitular a filogenia da vida depende, naturalmente, a nossa capacidade de identificar todas as formas de vida e descrever essas formas de vida a um nível suficientemente detalhado, o que nos permite identificar características comuns resultantes de ancestralidade comum.

Os biólogos fizeram um grande progresso em seu esquema de classificação durante os últimos dois séculos. A Figura 15 apresenta alguns aspectos da Árvore da Vida e sua evolução em 100 anos de Biologia Evolutiva. Por exemplo, Edouard Chatton apresentou o seu esquema de classificação que divide a vida em duas categorias. Em 1920, ele dividiu a vida em procariotos e eucariotos (Figura 15A). As células eucarióticas encapsulam o seu DNA genômico, enquanto que as células procarióticas não têm organelas.

De uma perspectiva evolutiva, e por definição, procariontes (que significa antes de núcleo) foram os progenitores para eucariontes. Organismos procarióticos mostram-se microscópica e morfológicamente semelhantes, mas metabolicamente, tornaram-se extremamente diversificados em sua capacidade de habitar “extremos” ambientes. Inversamente, os organismos eucarióticos mostram-se microscópica, macroscópica e metabolicamente semelhantes, mas morfológicamente eles tornaram-se muito diversificados em virtude da sua multicelularidade.

A perspectiva procariótica/eucariótica parecia razoável justamente porque procariontes são, na sua maior parte, morfológicamente “simples” organismos unicelulares, enquanto eucariontes eram na sua maioria “complexos” organismos multicelulares. O uso de simples e complexo são termos naturalmente antropomórficos. Um verme seria considerado complexo porque morfológicamente *parece* mais semelhantes aos seres humanos do que dizer o mesmo de uma simples bactéria, mesmo que a bactéria tenha características de pode viver sem luz, poder viver em ambiente anóxico, fervente etc. A noção de semelhança e complexidade, no entanto, seriam incrivelmente implodidas quase 50 anos após a classificação de Chatton, como resultado de uma revolução da bioquímica e biologia molecular.

Carl Woese e George Fox viriam a tornar-se um dos expoentes dessa revolução. A informação da sequência de DNA foi utilizada para construir árvores filogenéticas. Usando os princípios básicos da taxonomia, uma análise filogenética tem base na similaridade. Outro ponto que deve sempre ser considerado é que filogenia baseada em *genes parálogos* é fortemente dependente de modelos explícitos de evolução de sequência (que pode induzir em erro ou distorcer os resultados).

Os genes dos rRNA conforme já comentamos, é um dos genes eleitos como marcador molecular (ou relógio molecular). Certas porções desse gene acumulam mutações muito lentamente, de forma que podem ser usadas para elucidar as relações evolutivas extremamente antigas, na árvore da vida. A análise filogenética de sequências de rRNA por Woese e Fox mostram que os procaríotos são divididos em dois grupos, e que somente um destes grupos partilha um ancestral comum com eucariotos (Figura 15B). Este trabalho mostrou que os procaríotos não devem mais ser considerados grupo monofiléticos.

A noção darwiniana da árvore da vida implica que existe um tronco (ancestral comum) a partir da qual todos os ramos devem estender-se. O “enraizamento” das árvores é teoricamente possível se, a partir deste gene ancestral comum, ocorreram cópias e estas foram mantidas em todos os três domínios posteriores. Este é atualmente o ponto de vista predominante para enraizar a árvore da vida.

Em uma visão alternativa, um *anel* substituiu os ramos e clados para ilustrar a taxonomia de vida. O anel da vida sugere que genomas foram criados por vários eventos de fusão durante a evolução da vida primitiva e que estas fusões são contrárias ao nosso conhecido padrão bifurcado (Figura 15C). Uma vantagem dessa visão é que ela considera a transferência horizontal de DNA (veja abaixo).

Outra abordagem para obter o enraizamento é a utilização de observações morfológicas ou fenotípicas, em uma tentativa de definir uma bifurcação. Por exemplo, através de dados de arquitetura da membrana ou mutações do tipo inserção/deleção (conhecidos como “*indels*”), em sequências de genes. Essas características têm sido usadas para argumentar que a raiz da árvore da vida existe dentro do domínio bactéria, e não sobre o ramo que separa as bactérias archaea/eucariotos (Figura 15C).

Um dos desafios mais recentes tem sido a constatação de que o DNA não é exclusivamente transmitido de uma forma vertical para descendentes. Vários estudos têm mostrado que a transferência horizontal de genes (espécie para espécie) seria um novo paradigma para a filogenia, que teria desempenhado um papel importante no fluxo de informações genéticas entre organismos, especialmente na filogenia da vida de uma forma geral.

Outra alternativa interessante é apresentada no “*coral da vida*” (Figura 15D). Este conceito foi proposto por Peter Gogarten, e como o anel da vida,

permite que a informação genética possa fluir em outros paradigmas. Ao contrário do anel da vida, porém, o coral da vida permite um caminho dominante de herança vertical para ter ocorrido para a vida antiga no fundo de uma filogenia.

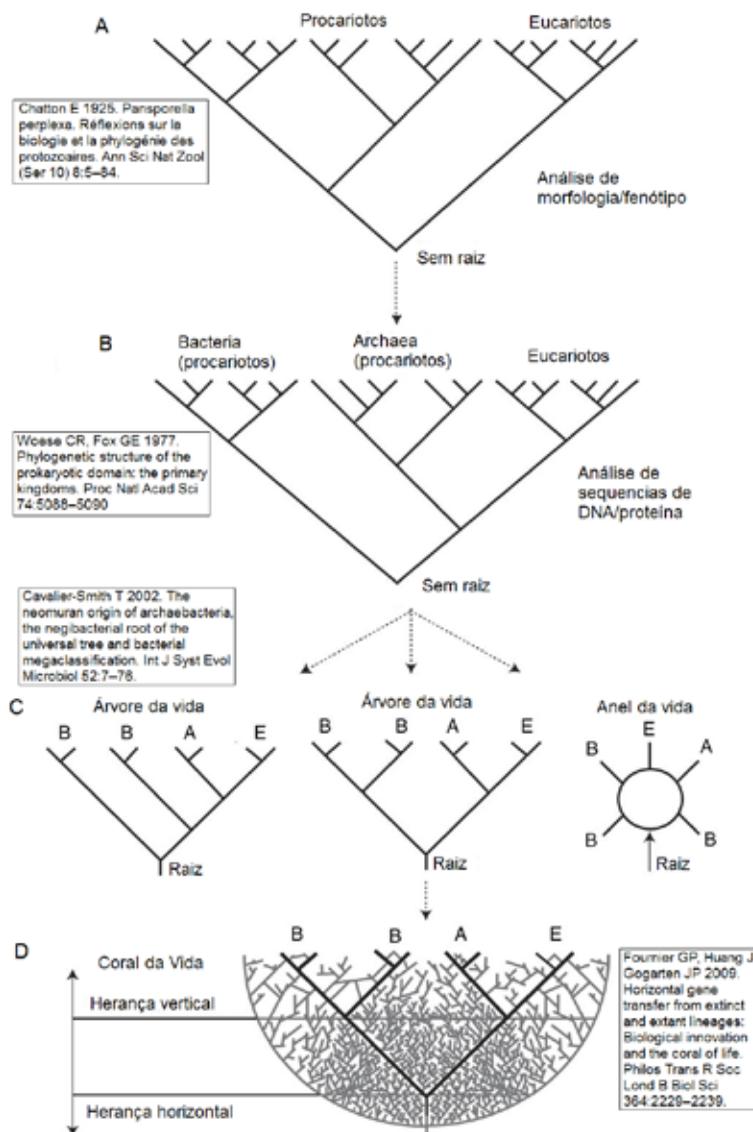


Figura 15 – A árvore da vida e sua evolução em 100 anos. A – 1925 - Taxonomia da vida baseada nas características morfológicas, B – 1977 - Árvore filogenética baseada nas seqüências de DNA. C – 2002 - Diferentes visões do enraizamento da árvore filogenética da vida. A, B e E significam Archaea, Bacteria e Eucariota, respectivamente. A árvore situada à esquerda baseia-se na arquitetura de membrana e eventos de inserção/deleção em genes, a árvore no centro é baseada em eventos de duplicação de genes, a árvore da direita é baseada em análise filogenética de centena de genes. D – 2009 - Visão mais recente da árvore da vida (em "coral") com transmissão de genes vertical e horizontal. As referências principais relativas à cada estudo estão citadas nas molduras.

Fonte: GAUCHER et al. (2010).

## Síntese do Capítulo



Verifica-se neste capítulo uma série de conceitos para uma compreensão geral de Biologia Evolutiva. Estes aspectos referem-se a algumas áreas da sistemática filogenética, do desenvolvimento de órgãos e do estudo genômico. Estes aspectos são extremamente interligados e dinâmicos, o que torna seu estudo fascinante e também mais complexo em determinados aspectos.

A sistemática filogenética é a base para o entendimento da classificação dos organismos e conseqüentemente, da evolução. Discute-se a questão da recapitulação e da utilização Evo-Devo. Tanto caracteres morfológicos quanto moleculares são utilizados na construção de filogenias. A classificação deve refletir a história evolutiva dos organismos.

Os pontos de interesse para os cladistas incluem a distinção de homologia e homoplasia e a identificação dos grupos monofiléticos. Um grande desafio é a produção da “árvore da vida”. A utilização de genes é muito promissora, porém deve ser criteriosa para o entendimento tanto da evolução quanto do desenvolvimento.

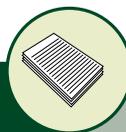
## Atividades de avaliação



1. Faça uma revisão sobre a anatomia do olho humano e de como funciona. Relacione com outros organismos, fazendo um mapa comparativo de diferentes organismos e formas de visão, à luz da evolução deste órgão.
2. Perda de genes: alguma perda de material genético ocorre com a divisão celular através do encurtamento dos telômeros. Recorde o que são telômeros, o porquê deles serem encurtados na divisão celular e como as células contornam este problema.
3. Discuta a questão da importância do registro fóssil na Biologia Evolutiva. Procure na Internet quais são os locais mais importantes de registro fóssil no Nordeste e no Brasil.
4. Veja as referências no final deste capítulo. Assista aos filmes “Contagio” e “A Era do Gelo 4”. Faça um fichamento e uma crítica, contextualizando a Biologia Evolutiva nestes filmes. Elabore atividades para grupos de trabalho destinado aos alunos do ensino fundamental e médio.
5. Veja as referências no final deste capítulo. Escolha três revistas científicas internacionais e avalie-as como um todo, com relação aos seguintes critérios:

acessibilidade aos artigos e possibilidade de uso para ensino. Escolha um artigo de cada para refinar e exemplificar sua avaliação. Use a ferramenta de tradução do site do Google como complemento e auxílio para o trabalho.

6. Proponha um plano de aula para o Nível Médio para este módulo.



## Texto complementar

### Genes envolvidos na evolução convergente da eusocialidade em abelhas

A evolução da eusociabilidade, fenômeno em que prole feminina renuncia à sua reprodução pessoal para cuidar de forma cooperativa dos seus irmãos, é uma das grandes transições da vida na Terra. Trata-se de uma transição evolutiva, mas que somente permaneceu em um pequeno número de táxons, principalmente em insetos. Apesar da forte pressão seletiva para o sucesso reprodutivo individual, persistiu um equilíbrio entre cooperação e conflito. Esta evolução há muito tem fascinado os biólogos. Apesar de uma rica história de trabalhos teóricos sobre a evolução da eusociabilidade, relativamente pouco se sabe sobre as alterações moleculares associados com este processo. Estas mudanças moleculares têm o potencial para nos informar sobre os processos evolutivos envolvidos na evolução da eusociabilidade, tais como tipos e níveis de seleção.

Algumas ideias já surgiram sobre quais os mecanismos moleculares subjacentes à eusocialidade, mas ainda falta um quadro comparativo para explorar os princípios comuns da base molecular. Uma grande questão ainda não resolvida é se ocorreram trajetórias evolutivas independentes, ou se ocorreram diferentes alterações genéticas. Este trabalho explora a base genética evolução eusocial em abelha, considerado um grupo ideal para os estudos comparativos da evolução social. Existe uma grande diversidade de estilos de vida sociais dentro deste grupo, das solitárias às intermediárias sociais, que permitiriam elaborar a eusocialidade. Além disso, diversos trabalhos mostram que a eusocialidade foi adquirida de forma independente em abelhas, mais do que qualquer outro grupo.

Estas características das abelhas as tornam candidatas para comparação das possíveis múltiplas origens independentes de estilos de vida social diferentes entre as espécies estreitamente relacionadas. Além disso, existe já um amplo conhecimento da história natural de abelhas, fornece um quadro valioso para o desenvolvimento de hipóteses sobre o significado adaptativo das alterações genéticas detectadas em linhagens de abelhas eusociais.

Para estudar os padrões de evolução molecular primeiramente foram gerados tabelas de ESTs (sequências de DNA expressas) de um conjunto de nove espécies de abelhas. Este conjunto de espécies refletiu a impressionante diversidade social em abelhas incluindo tanto espécies eusociais como não-eusociais. Três origens de eusocialidade e dois tipos diferentes de estilo de vida eusocial: “altamente eusocial” e “primitivamente eusocial”. Estas etiquetas de sequências de DNA expressas foram combinadas com o genoma de uma abelha altamente eusocial, a *Apis mellifera* e criados alinhamentos de sequência parcial dos genes estudados. O que se espera encontrar? Taxas aceleradas de evolução de proteínas podem refletir uma assinatura molecular de seleção natural positiva e o compartilhamento dessa aceleração entre as linhagens de abelhas sugerem uma associação entre as mudanças genéticas e o compartilhamento da evolução destas características. Os resultados parciais desse estudo mostram uma evolução bastante consistente entre os genes expressos e os níveis de eusocialidade, como pode ser visto na filogenia das abelhas (Figura 16).

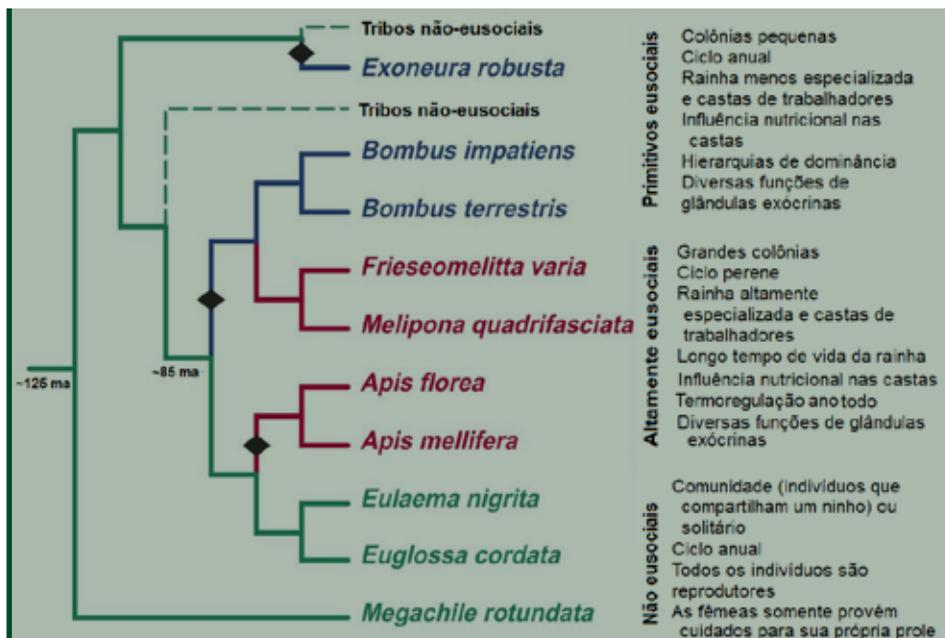


Figura 16 – Resultados obtidos com genes expressos (ESTs) em várias espécies de abelhas. Verifica-se uma evolução diferenciada e consistente entre os níveis de eusocialidade.

Fonte: Traduzido e adaptado de WOODARD et al. (2011).

## Leituras, filmes e sites



ALMEIDA, L. M.; COSTA, C. S. R.; MARINONI, L. **Manual de coleta, conservação, montagem e identificação de insetos**. 1 ed. São Paulo: Holos Editora. 1998. 78p.

LISCOMB, D. **Basics of cladistic analysis**. George Washington University, Wash 1998, 75p. Disponível em <http://www.gwu.edu/~clade/faculty/lipscomb/Cladistics.pdf>

OLIVEIRA, F. **Engenharia genética: o sétimo dia da criação**. 4 ed. São Paulo: Editora Moderna. 1995. 135 p.

PAPAVERO, N. (org.) **Fundamentos práticos de taxonomia zoológica**. 2.ed. São Paulo: Editora Unesp & Fapesp. 1994. 285p.

PUJOL-LUZ, J. R. e CONSTANTINO, R. **A Zoologia no Brasil 1978-2002**. Memórias da Sociedade Brasileira de Zoologia. Brasília: Editora da UnB. Soc. Bras. Zoologia. 2004. 111p.

## Filmes

“A Árvore da Vida” original americano: *The tree of life*, lançado em 2011. Direção: Terrence Malick, 139 minutos. (obs: drama moral, não se refere diretamente ao assunto do nosso texto).

“A Criança da Meia Noite” original francês: *La permission de minuit*, lançado em 2011. Direção: Delphine Gleize, 110 minutos.

“A Era do Gelo 4” original americano: *Ice Age: Continental Drift*, lançado em 2012. Direção Steve Martino, 94 minutos.

“Contágio” Original americano: *Contagion*. Lançado em 2011. Direção Steven Soderbergh. 106 minutos.

“Gravity” original americano: *Gravity*, lançado em 2012. Direção: Alfonso Cuarón.

## Sites

Revistas científicas internacionais específicas na área da Biologia Evolutiva

BMC Evolutionary Biology: <http://www.biomedcentral.com/bmcevolbiol/>

GSE Genetics Selection Evolution: <http://www.gsejournal.org/>

Genome Biology and Evolution: <http://gbe.oxfordjournals.org/>

International Journal of Evolutionary Biology: [www.hindawi.com/journals/ijeb/](http://www.hindawi.com/journals/ijeb/)

International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology: <http://ijs.sgmjournals.org/content/by/year>

Journal of Evolutionary Biology: [www.blackwellpublishing.com/jeb\\_enhanced/](http://www.blackwellpublishing.com/jeb_enhanced/)

Journal of Systematics and Evolution: [www.jse.ac.cn/](http://www.jse.ac.cn/)

Molecular Biology and Evolution: <http://mbe.oxfordjournals.org/content/by/year>

BSP: The Open Evolution Journal: [www.benthamscience.com/open/toevolj/](http://www.benthamscience.com/open/toevolj/)

## Referências



CARROLL, S. B. **Infinitas formas de grande beleza**: como a evolução forjou a grande quantidade de criaturas que habitam o nosso planeta. Tradução de Diego Alfaro. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2006.

GAUCHER, E. A.; KRATZER, J. T.; RANDALL, R. N. Deep Phylogeny - how a tree can help characterize early life on earth. **Cold Spring Harb Perspect Biol.**, v. 2, n. 1, a002238, jan. 2010.

GEHRING, W. J. Chance and necessity in eye evolution. **Genome Biology and Evolution**, v. 3, p. 1053-1066, 2011.

HOU X. G. et al. **The cambrian fossils of Chengjiang China, the flowering of early animal life**. Oxford: Blackwell, 2007.

LAND, M. F.; FERNALD, R. D. The evolution of Eyes. **Annual Review of Neuroscience**, v. 15, p. 1-29, 1992. Disponível em: <http://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.ne.15.030192.000245>. Acesso em janeiro/2012.

LENT, R. Evo-devo o que é? Ciência Hoje online, publicado em 29/01/2010. Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/bilhoes-de-neuronios/evo-devo-o-que-e>

LINDBLAD-TOH, K. et al. A high-resolution map of human evolutionary constraint using 29 mammals. **Nature**, v. 478, n. 7370, p. 476-82, 2011.

RIDLEY, M. **Evolução**. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 752 p. (Original inglês disponível para download na Internet).

SANTOS, C. M. D.; CALOR, A. R. Ensino de biologia evolutiva utilizando a estrutura conceitual da sistemática filogenética. **Ciência & Ensino**, v. 1, n. 2, 2007. Disponível em: <http://www.ige.unicamp.br/ojs/index.php/cienciaeensino/article/viewFile/99/130>. Acesso em janeiro/2012.

SAYÃO, J. M.; SARAIVA, A. A. F.; UEJIMA, A. M. K. New evidence of feathers in the Crato Formation supporting a reappraisal on the presence of aves. **Academia Brasileira de Ciências**, v. 83, n. 1, p. 197-210. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/aabc/v83n1/v83n1a10.pdf> Acesso em janeiro/2012.

WOODARD, S. H., FISCHMAN, B. J., VENKAT, A., HUDSON, M. E, VARALA, K., CAMERON, S. A., CLARK, A.; ROBINSON, G. E. Genes involved in convergent evolution of eusociality in bees. **PNAS Proc. Natl. Acad. Sci.**, USA, v. 108, n. 18, p. 7472–7477. 2011. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3088614/?tool=pmcentrez>

ZATZ, M. Clonagem e células-tronco. **Estudos avançados/USP**, v. 18, n. 51, 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ea/v18n51/a16v1851.pdf>. Acesso em Janeiro/2012.



**Capítulo**

**3**

**Origens das  
variações evolutivas**



## Objetivos

- Ter noções básicas sobre a variação e o processo evolutivo.
- Compreender a importância da seleção natural e analisar as variações da seleção natural dependendo do ambiente.
- Perceber que toda adaptação é fruto da seleção natural e verificar a importância da seleção sexual no processo evolutivo.
- Conhecer os principais conceitos de espécie e entender o processo de especiação.
- Compreender o processo de coevolução.
- Perceber a importância das irradiações e extinções para a biodiversidade do planeta.

### 1. Seleção natural, variação e adaptação

Variação é sinônimo de mudança, que por sua vez é o que acontece dentro do processo evolutivo, isto é, várias mudanças ao longo da história da vida. Como já foi dito, o processo evolutivo ocorre devido a mudanças aleatórias no material genético em determinado ambiente, estas mudanças ocorrem todos os dias e em todos os seres vivos. Características novas oriundas dessas mudanças em um ambiente estável e em seres que estão altamente adaptados tendem a não serem selecionadas, no entanto, se houver mudança ambiental, logo a probabilidade destas mudanças serem selecionadas aumenta bastante, e assim, podem surgir novas adaptações e conseqüentemente variações.

Percebe-se então que a origem das variações depende muito da variação genética, ambiental e da seleção natural. A biodiversidade que o planeta possui atualmente é fruto dessas variações, pois o mundo passou por diversas mudanças ambientais ao longo desses 4,5 bilhões de anos, e assim, as características adaptativas que surgem aleatoriamente foram selecionadas ao longo desse tempo, dando origem à fantástica e complexa variedade de seres vivos no planeta.

## 1.1. Aspectos gerais

A seleção natural necessita de condições para que ocorra, como foi dito anteriormente, portanto, esta força evolutiva é essencial para explicar as variações e as adaptações. Imagine um ambiente onde existem poucas mudanças ambientais ao longo da história da vida, imagine uma espécie que sobreviva nesse tipo de ambiente desde épocas remotas, imagine que ela atenda a todas as condições necessárias para que ocorra a seleção natural, então perceba que essa espécie que sobrevive em um ambiente constante, durante muito tempo, possui variações, porém, entendendo que esta espécie é altamente adaptada a este ambiente, a probabilidade de qualquer mudança surgir e ser selecionada, é bem pequena, então, a população deste ambiente tende a ser constante e diversidade limitada.

Agora, imagine um ambiente que sofreu muitas alterações ao longo da história, imagine que nesse ambiente existe inicialmente uma espécie adaptada, porém com as constantes mudanças ambientais, as características dessa espécie não atendem às novas condições, então, aleatoriamente pode surgir uma mudança que permita a sua sobrevivência e assim surge variação e novas adaptações.

Então a seleção natural pode explicar tanto a ausência, quanto a presença de mudanças evolutivas e isso é extremamente importante para o entendimento global da biologia, visto que em todas as áreas de estudo esse aspecto deve ser levado em conta, e cabe ao professor deixar isso bem claro, de forma enfática e muitas vezes repetitivamente.

Muitas vezes o argumento de que o processo evolutivo não existe e/ou não ocorre é o de que não é visto em pequena escala de tempo, mas isso não é verdade, basta você observar a evolução do vírus da imunodeficiência adquirida (HIV), que em questão de meses pode mudar de tal forma que um fármaco que hoje é potente no seu controle, não pode ser daqui alguns dias, isto é, nada mais, nada menos, do que evolução com todas as ferramentas e condições para ação da seleção natural. É claro que as maiores mudanças realmente ocorrem numa grande escala de tempo, mas usar a escala de tempo da vida humana como argumento para a não existência do processo evolutivo é falta de conhecimento biológica das ferramentas que movem tal processo.

## 1.2 Tipos de seleção natural

Dependendo do que está acontecendo no ambiente, a seleção natural pode atuar de várias maneiras, favorecendo uma ou duas características em detrimento de outra. Sendo assim, existem três tipos básicos de seleção natural: estabilizadora, direcional e disruptiva.

Sempre é bom lembrar que Darwin descobriu essa força evolutiva observando e analisando os seres vivos em suas pesquisas a bordo do Beagle,

nesse caso as variações dos bicos dos tentilhões foram úteis para o entendimento dos tipos de seleção natural. Para entender melhor do que estamos falando observe a Figura 17.

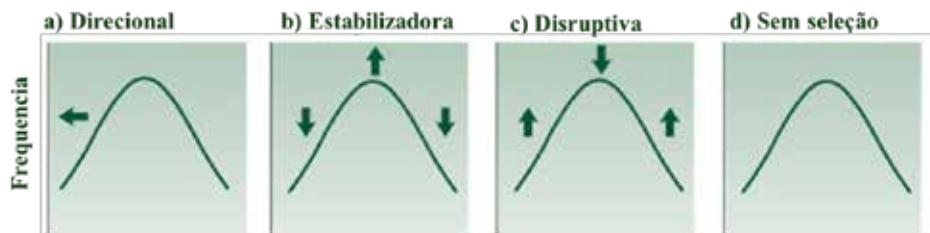


Figura 17 – Tipos de seleção natural

Fonte: Adaptado de RIDLEY (2006).

Na Figura 3.1 está demonstrada a relação entre a frequência da população e uma determinada característica com a ação de seleção natural em diferentes situações. Na primeira situação (Figura 17a) a seleção denominada direcional aumenta a frequência de determinada população para valores menores (direcional negativa), assim como também poderia direcionar para valores maiores (direcional positiva). Um exemplo que pode ser dado para este tipo de seleção é quando o ser humano começa a pescar o salmão de forma industrial utilizando redes que capturam somente os grandes peixes, restando na população apenas os pequenos. A resistência de insetos a inseticidas, a resistência de bactérias a antibióticos e o melanismo industrial, são exemplos de seleção direcional.

A Figura 17b está representando a seleção estabilizadora, onde uma característica intermediária é selecionada, pois certamente é a mais adaptativa para determinada situação ambiental. Por exemplo, temos o peso dos recém-nascidos nos anos 40, época em que não havia conhecimento e nem tecnologia suficiente para manter os pré-maturos e aqueles que cresciam muito dificultando o parto e até mesmo a vida da mãe, sendo assim a maioria das crianças que nasciam nessa época tinham uma média de peso estável, porém com o advento de novas tecnologias e cirurgias este tipo de seleção é alterado.

Outro exemplo é a frequência da população africana com gene para anemia falciforme, doença que altera a hemoglobina e deforma o eritrócito, deixando-o em forma de foice. Esta característica se dá pelo fato que na África há uma grande incidência de Malária, uma doença onde um protozoário (*Plasmodium falciparum*) entra no eritrócito e consome o oxigênio. Nessa doença os indivíduos com o eritrócito normal (sem anemia falciforme - genótipo SS) são muito afetados pela malária, as pessoas doentes (com eritrócitos totalmente deformados - genótipo ss) não chegam nem a idade reprodutiva, porém os indivíduos que possuem a anemia falciforme, mas em heterozigose (Ss) sobrevivem, pois produz parte dos eritrócitos normais e outra parte anor-

mal, sendo assim o *Plasmodium* consumirá menos oxigênio e afetará menos o indivíduo, dando a ele uma sobrevivência que permite chegar a idade reprodutiva e assim transmitir essa característica para a sua descendência aumentando a frequência dessa característica na população. Logo a característica intermediária será selecionada, exemplificando dessa forma a seleção estabilizadora.

A seleção disruptiva é aquela onde ocorre a seleção de características extremas, diferentemente da estabilizadora (Figura 17c). Um exemplo deste tipo de seleção é o caso de semente realizada por determinada espécie de besouro, que se alimenta somente de semente de tamanho intermediário, restando às sementes de tamanho grande e pequena, logo plantas diferentes germinarão, com características diferentes e provavelmente ao longo de várias gerações poderá dar origem a espécies diferentes.

Por fim, a Figura 17d indica uma situação onde a seleção natural não atua. Isto acontece quando ocorre intervenção humana nas características consideradas deletérias na natureza, por exemplo: um recém-nascido prematuro nos anos 40, tinha grandes chances de morrer logo que nascesse, porém atualmente um recém-nascido prematuro possui praticamente as mesmas chances de sobreviver de que uma criança nascida no tempo considerado normal, logo a seleção natural não atuará, é o homem interferindo no processo evolutivo.



## Saiba mais

### Anemia falciforme: uma doença geográfica

Colunista desconstrói a noção muito difundida e que essa seria uma "doença racial". Todos sabemos que doenças humanas não só têm importância médica, como também fortes simbolismos sociais e culturais. A maneira como as enfermidades são percebidas e descritas influencia o modo como elas são diagnosticadas e tratadas, assim como a estigmatização dos pacientes. Gosto muito de ilustrar isso com o exemplo do raquitismo, doença que nos Estados Unidos foi originalmente categorizada como um problema nutricional (por deficiência da ingestão de vitamina D) e, na Inglaterra, como enfermidade ambiental (por deficiência de luz solar para a síntese de vitamina D pela pele).

As hemácias em formato de foice ("falciformes") foram descritas pela primeira vez por Herrick, em 1910, em um paciente negro.

Na coluna de março apresentei dados históricos que demonstram o importante papel da anemia falciforme na gênese do conceito de "doença molecular" e na evolução da medicina genômica. Agora, quero questionar a conceituação da anemia falciforme como "doença racial" e apresentá-la como uma "doença geográfica", uma visão mais moderna e correta.

A percepção da anemia falciforme como uma doença de negros é antiga. A descrição dessa enfermidade data de 1910, quando o médico americano James B. Herrick (1861-1954) apresentou o estudo de um único paciente negro no qual identificou as células vermelhas do sangue com formato de foice.

Em 1923, o pediatra Virgil Preston Sydenstricker (1889-1964) publicou um artigo chamando atenção para o fato de a doença ser familiar, afetar igualmente os dois sexos e provavelmente acometer apenas pacientes negros. A partir de então, firmou-se no cânone médico a conexão entre anemia falciforme e “raça negra”.

A associação inicial da doença com uma “raça” teve conotações políticas e ocorreu como parte do fenômeno de “patologização” do negro americano, bem descrito por Melbourne Tapper em seu livro *In the blood: sickle cell anemia and the politics of race* (“No sangue: anemia falciforme e a política racial”). Posteriormente, na década de 1970, a conexão foi adotada paradigmaticamente pelo movimento negro americano, em especial pelo cardiologista Richard Williams no seu livro *Textbook of black-related diseases* (“Livro-texto de doenças do negro”).

É curioso que o coautor de Williams nesse tratado tenha sido nada mais, nada menos que o notável ativista Martin Luther King (1929-1968), Nobel da Paz em 1964, que não era médico. Sua participação nos remete à importância social e cultural das doenças e às consequências da forma como elas são percebidas e apresentadas.

Minha tese nesta coluna é que, como biologicamente não existem raças humanas (tema discutido aqui), é inaceitável o paradigma de “doenças raciais”, que reforça a visão errônea de que há diferenças biológicas entre pessoas negras e brancas. A distribuição populacional da anemia falciforme e especialmente a sua maior prevalência em indivíduos negros não tem nada a ver com raça, mas sim com geografia. Para melhor entender isso, vamos ter de fazer um *détour* genético.

**Fonte:** SERGIO DANILO PENA. Publicado em 11/04/2008. [Consult. 2011-09-11]. Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/derivacao-genetica/anemia-falciforme-uma-doenca-geografica>

### 1.3 Variação

Para a ocorrência da seleção natural é exigido que os seres vivos possuam a capacidade de deixar descendentes através da reprodução e que estes possuam variações e sejam capazes de deixar descendentes férteis. Como acontece a reprodução e os mecanismos da hereditariedade são assuntos que estão bem estabelecidos nesse curso, visto que estes conteúdos estão nas ementas das disciplinas de Genética e Biologia Celular, caso tenham alguma dúvida recorram ao material destas disciplinas. Porém, as variações e o fitness (aptidão em deixar descendentes) são aspectos que geralmente não são abordados com o enfoque evolucionista, sendo assim comentaremos sobre as variações em seus diversos níveis e demonstraremos que nos seres vivos existem variações em vários níveis de organização.

As variações podem ocorrer em nível de organismo, como por exemplo, a altura, peso, sexo e polimorfismos como encontrado na mariposa *Biston betularia*. Essas variações podem ser classificadas como contínua (tamanho, altura, peso) e descontínua (sexo). Percebem-se variações em nível de cromossomos, por exemplo, na síndrome de down onde ocorre trissomia do cromossomo 21 e outras variações nesse nível. Variações em enzimas, que possuem a mesma função com potenciais diferentes em um mesmo organismo. Essa variação proteica representa também uma va-

riação no DNA, que por fim representa variação nas sequências de bases nitrogenadas, que é o local onde ocorrem as mutações e que estas podem promover as variações em todos os outros níveis. Portanto, pode-se dizer que o gene é o alvo da seleção natural, pois ao selecionar a característica, seleciona indiretamente o gene.

Além da variação em vários níveis de organização, existe a variação de *fitness* entre espécies, isto é, dentro de um mesmo grupo pode haver indivíduos com maior aptidão para reprodução e este prevalecer em determinado ambiente. Logo fica fácil entender o porquê dessas condições para a ocorrência da seleção natural.

Desta forma entendemos que seleção natural está o tempo todo atuando em todas as populações. Sabendo de tudo isso, você poderia perguntar de onde se origina essas variações, e eu respondo que as mutações e as recombinações são os “combustíveis” do surgimento das variações, que em determinado ambiente podem ou não serem selecionadas, gerando ou não adaptação. Assim sendo, faz parte também do processo evolutivo as variações que não foram capazes de gerar adaptação, pois por muitas vezes na sociedade acadêmica é colocado que só pode ser considerado evolução as mudanças adaptativas, pois agora saibam que as mudanças não adaptativas também fazem parte da evolução. A única diferença é que naquele ambiente, naquele tempo, aquela característica não foi vantajosa e acabou por não ser selecionada.

É importante realçar que as variações geradas pelas mutações e recombinações são aleatórias em relação à direção da adaptação. Parece uma frase comum, porém ela é rica de sentido, pois há uma tendência em pensar que as mudanças geradas pela mutação e recombinação são direcionadas para adaptação naquele ambiente e não ocorrem assim, as mutações e recombinações são aleatórias e por acaso podem gerar uma característica que seja vantajosa em um ambiente e assim ser selecionada para tornar-se uma adaptação.

O esquema seguinte pode esclarecer o que vem sendo dito, persistentemente, nos últimos parágrafos (Figura 18).

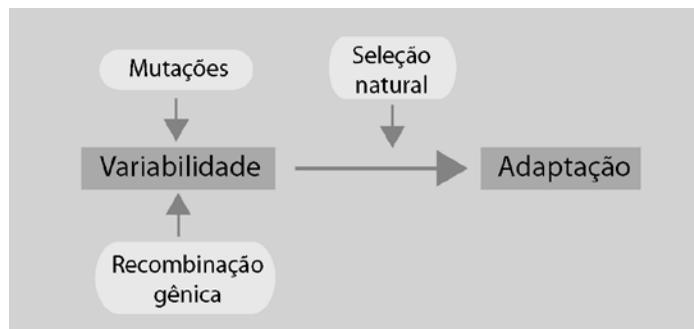


Figura 18 – Esquema didático explicativo sobre os fatores que podem levar ao surgimento de uma adaptação.

## 1.4 Adaptação

Quando se fala em adaptação em nosso meio social o que se pensa, primariamente, é que o indivíduo se acostumou com determinado meio, sendo esse mecanismo algo voluntário, isto é, depende da vontade, é intencional. Porém, a adaptação biológica é diferente, ela não é intencional, não é direcionada, pelo contrário ela é aleatória e depende muito de vários fatores do processo evolutivo como: recombinação genética, mutações, seleção natural e o tipo de ambiente.

Durante muitos anos a adaptação foi argumento para fortificar o criacionismo, numa área chamada de Teologia Natural, pois as adaptações encontradas na natureza não tinham outra explicação a não ser a vontade divina, em uma ação sobrenatural.

Com o surgimento da ideia da Evolução por Seleção Natural, proposta por Darwin, surgiu também uma explicação para as adaptações, onde as características adaptativas são selecionadas e transmitidas à prole, que terão vantagens naquele meio e assim poderão ter maior sucesso reprodutivo.

É importante que ao se verificar uma adaptação se realize um estudo profundo da finalidade real da característica, envolvendo todo o processo de metodologia científica, com elaboração de hipóteses testáveis, com grupos controles positivo e negativo e análise estatística dos resultados, confirmando ou não as hipóteses. Na Biologia Evolutiva, tudo isso é possível, portanto, trata-se de uma área da ciência que deve ser levada a sério.

### a) Seleção natural é a justificativa para a adaptação

Observando a análise da literatura verifica-se que a única explicação para a permanência de uma adaptação é a seleção natural. Toda característica de um indivíduo é adaptativa a um determinado meio, logo não existe a possibilidade de um ser vivo ser mais adaptado que outro, ou até mesmo dizer que existe um ser vivo mais evoluído que outro, visto que cada indivíduo possui um ambiente no qual as suas características são suficientes para mantê-lo vivo e reproduzindo. Então cada indivíduo é adaptado ao seu meio, e assim, não se devem fazer comparações do tipo mais ou menos adaptado/evoluído.

Lembra-se das arqueobactérias? Elas vivem em ambientes extremos com elevada temperatura, salinidade, acidez, entre outras, porém suas características permitem que ela sobreviva muito bem nesse tipo ambiental. Se colocarmos uma eubactéria no ambiente das arqueobactérias, certamente elas não sobreviveriam e se colocarmos as arqueobactérias no ambiente das eubactérias elas, também, não sobreviveriam, dessa forma o que podemos dizer é que cada ser vivo está adaptado ao seu ambiente.

No entanto, como explicar a evolução de estruturas complexas como o olho, visto que ele possui uma série de características adaptativas? Nessa questão temos que levar em conta um fator extremamente importante no processo evolutivo, que é o tempo. Ao longo da história da vida surgiram seres vivos que possuíam a capacidade de captar a energia luminosa, e desde então, mudanças ao longo dos últimos 500 mil anos fez com que o olho como conhecemos atualmente surgisse.

Nesse caminho é claro que você pode perguntar pelas características intermediárias e logo perceberá que o processo evolutivo é contínuo, pois a mudança ambiental é contínua, logo características que são adaptativas hoje, pode não ser daqui alguns anos e então favorecerá a seleção de outra característica mais vantajosa para este novo tipo ambiental, fazendo com que as características anteriores fiquem restritas ao ambiente onde são adaptativas, caso esses ambientes deixem de existir é provável que a característica suma também, então as características denominadas intermediárias podem ter deixado de existir ou algumas evidências delas podem ser encontradas em vários seres vivos que possuem capacidade de captar luz.

Como foi dito anteriormente, a seleção natural é a única explicação para adaptação, porém a seleção natural não explica a evolução como um todo, pois vários processos ocorrem para que o fenômeno evolutivo ocorra. Outra característica importante é que nem toda evolução precisa ser adaptativa, isto é, uma característica pode surgir e nem conferir vantagem e/ou desvantagem. Este tipo de característica é abordado quando se fala em Deriva Gênica. Portanto, ao se falar em adaptação, não se esqueça da seleção natural.

### **b) Coadaptações**

Adaptações mais complexas podem ser explicadas por coadaptações, onde características relacionadas em um ser vivo foram selecionadas simultaneamente. Como exemplo tem-se o pescoço da girafa que ao longo dos tempos, não foram somente o tamanho e quantidade de vértebras que aumentaram, certamente, músculos, vasos, cartilagens e outras estruturas também foram selecionadas, evoluindo em forma de coadaptações.

### **c) Adaptação x exaptação**

O efeito acumulativo de pequenas mudanças ao longo do tempo pode fazer com que surja algo novo. Essa característica pode ter uma função constante ao longo dos passos evolutivos, mas pode não ter. O olho é um exemplo de uma característica constante e a pena é um exemplo de uma característica que inicialmente foi selecionada por conta da vantagem no que diz respeito a termo regulação e exibição, mas depois ganhou outra

função com adaptação para o voo das aves. Quando isso ocorre denominasse exaptação, ou seja, uma adaptação em cima de outra adaptação com finalidade diferente.

Sendo assim, fica uma reflexão para que a cada dia a pesquisa metodológica se intensifique com finalidade de testar e comprovar cada adaptação, pois assim poderemos realmente saber se a característica analisada é uma adaptação ou exaptação.

#### **d) Macro ou micromutações?**

A adaptação pode surgir por macromutações e/ou micromutações. As macromutações são aquelas que podem levar a grandes modificações e são utilizadas como argumento de um ramo da biologia evolutiva, chamado Sal-tacionismo (Equilíbrio Pontuado), onde a evolução pode ocorrer em grandes passos causados pelo que se chama de macromutações. As micromutações seguem como argumentação de outra vertente, chamada de gradualismo, onde as características mais complexas surgiram pelo acúmulo de pequenas alterações ao longo do tempo, através de micromutações.

#### **e) Plasticidade fenotípica**

Algumas vezes adaptação pode ser confundida com a plasticidade fenotípica, isto é, quando o fenótipo pode ser influenciado pelo ambiente gerando a possibilidade de que dependendo do ambiente uma característica surja ou desapareça. Sabemos que o genótipo determina o fenótipo e que este pode sofrer influência ambiental, somente este fato do fenótipo poder variar dependendo do ambiente é uma adaptação, porém, a variação da característica é chamada de plasticidade fenotípica.

#### **f) Coustraints**

Uma característica pode ser interpretada como mal adaptativa, isto é, como não conferindo vantagem ao indivíduo, porém, com pesquisas mais aprofundadas se descobre a finalidade daquela característica. A cauda do pavão é uma mal-adaptação, visto que atrapalha sua locomoção e facilita a sua visualização pelos predadores, mas observou-se que esta característica é extremamente importante para a seleção sexual deste animal, onde a fêmea escolhe o pavão com a cauda maior e mais conservada, então esta cauda funciona com uma medida de vigor, resistência e virilidade, visto que se o pavão conseguiu atingir a idade adulta com essa cauda, ele deve ter escapado de várias situações onde a seleção natural faria com que esta característica fosse eliminada.

Esta mal-adaptação pode ser encontrada em alguns livros com a denominação de *constraints* (restrições em inglês).

### g) Trade-off

A adaptação não leva à perfeição, pois em determinado nível de organização ela pode ser vantajosa, mas em outro não. Isso leva a um *trade-off*, isto é, o organismo dependendo do ambiente será selecionado de acordo com a característica que seja indispensável para sua sobrevivência, mesmo que a presença desta característica seja maléfica em outros aspectos e níveis de organização.

A seleção natural pode atuar em vários níveis de organização, contudo, pode acontecer que a seleção de uma característica em um nível de organização prejudique outro nível. Porém, a seleção natural é mais eficiente no nível de gene.

É importante ressaltar que a adaptação está intrinsecamente relacionada ao sucesso reprodutivo (fitness), pois uma adaptação pode levar direta ou indiretamente ao aumento da prole.

## 1.5 Exemplificando o conceito: seleção natural

### Faça você mesmo

#### “Presas fáceis: analogia com processos de seleção natural”

Junia Freguglia e Marina Fonseca



Tampinhas de diferentes cores.

Fonte: [http://1.bp.blogspot.com/\\_XfxOBQQZoyQ/SWuHpbTO0o/AAAAAAAAAEY/XjpAgAsj9o/s320/baldoza.jpg%2016](http://1.bp.blogspot.com/_XfxOBQQZoyQ/SWuHpbTO0o/AAAAAAAAAEY/XjpAgAsj9o/s320/baldoza.jpg%2016).

Vamos fazer uma atividade para fazer uma analogia com o processo de seleção natural. Vamos utilizar alguns objetos para simular indivíduos diferentes de uma mesma espécie. Você pode utilizar os seguintes tipos de objetos (jogo de varetas; palitos pintados de diferentes cores; tampinhas de garrafa de refrigerante; feijões de diferentes tipos, pedaços de papel coloridos). Escolha apenas um desses tipos de objetos.

Se você escolheu tampinhas de garrafa, por exemplo, faça um conjunto com trinta tampinhas de garrafa, sendo dez de cada cor (verde, vermelha e amarela, por exemplo).

Estes objetos vão representar indivíduos de uma população da mesma espécie. O fato de haver cores diferentes entre os objetos indica que os indivíduos dessa população apresentam diferentes cores.

Escolha um ambiente em que serão deixados estes objetos (pode ser um ambiente natural como grama ou chão com areia).

Escolha uma pessoa do grupo para ser o predador. O predador vai catar os objetos que encontrar primeiro. Ao catar os objetos ele estará atuando como o predador que iria se alimentar daqueles indivíduos, representados pelos objetos.

Marque 20 segundos para que o predador apanhe os objetos (indivíduos) que ele conseguir enxergar (O predador não deverá ter visto antes, quando os objetos forem lançados na superfície. Apenas deve olhar quando os objetos já estiverem no ambiente).

Depois que o predador catar os objetos em 20 segundos, separe-os por cor e conte quantos de cada cor o predador conseguiu pegar.

Faça as contas para saber quantos sobraram no ambiente, ou seja, qual a população do ambiente após a ação do predador.

Considere que os indivíduos vão se reproduzir e que cada casal (conjunto de dois objetos) vai produzir dois filhotes (mais dois objetos que estariam no ambiente).

O Quadro abaixo é apenas um modelo para ajudar a organizar os registros. Os valores da primeira linha foram colocados como exemplo.

Responda:

	População Inicial	Indivíduos predados (os que predador conseguiu pegar)	População no após a ação do predador (quantos restaram no ambiente, os que o predador não pegou)	População final (estimativa após a reprodução; quantos passariam a ter no ambiente se os que restaram se reproduzissem)
Indivíduos Tampinhas Verdes	10	2	8	16
Indivíduos Tampinhas Vermelhas	10			
Indivíduos Tampinhas Amarelas	10			
Total de indivíduos	30			

- Qual seria a população após a ação do predador?
- Qual seria a população após a primeira reprodução com os indivíduos que sobraram no ambiente?
- Algum tipo de indivíduo (objeto de determinada cor) teve maior chance de sobrevivência a partir da ação do predador?
- Porque este tipo de indivíduo teve vantagem sobre os outros?
- Qual será a consequência para a população da ação do predador e das variações das características da população no decorrer do tempo?
- O que aconteceria se houvesse uma mudança drástica no ambiente, que passasse a favorecer outro tipo de indivíduo dentro da população?
- O que aconteceria se duas populações como a inicial (com dez indivíduos de cada cor) fossem colocadas em ambientes muito diferentes?
- O que ocorreria ao longo do tempo se duas dessas populações tivessem sido isoladas de modo que os indivíduos não tivessem nenhum contato?
- O que aconteceria se não houvesse a presença do predador?
- Lembre-se de catar os objetos quando terminar a atividade, para não deixar lixo no ambiente, certo?

## 2. Seleção sexual

Você já deve ter percebido que existem diferenças entre machos e fêmeas, dimorfismo sexual, que a seleção natural sozinha não explica. A cauda do pavão anteriormente citada, diferença de cores, comportamentos, tamanho, vocalizações e outras características que se fôssemos analisar pela perspectiva da seleção natural seriam desvantajosas e tenderiam a serem extintas. No entanto, essas características permanecem e são justificadas pela vantagem que conferem na Seleção Sexual.

Na reprodução sexuada pode ocorrer uma diferença no investimento parental, isto é, a energia dada na formação do gameta e no cuidado exercido por um dos progenitores ao descendente. Em aproximadamente 90% dos mamíferos esse cuidado é realizado pela mãe, favorecendo o sucesso reprodutivo da espécie.

Então, nesse caso o sucesso reprodutivo dos machos é limitado pelo número de fêmeas com as quais consegue copular, já o sucesso reprodutivo das fêmeas é limitado pela quantidade de óvulos produzidos. Logo a seleção sexual será mais evidente para os machos do que para as fêmeas.

Nessa condição exposta, percebe-se na natureza uma diferença comportamental entre machos e fêmeas, onde os machos terão que competir pelo acesso à fêmea e as fêmeas terão que ter certo grau de exigência na escolha do macho, isso pode favorecer o dimorfismo sexual. Uma condição oposta pode inverter os papéis do macho e da fêmea, logo as fêmeas terão que competir pelo macho e os machos serão exigentes na sua escolha.

A competição pode ocorrer através do combate direto, competição de espermatozoides (a fêmea cruzando com vários machos, o macho de espermatozoide mais eficiente fecunda primeiramente) e o infanticídio (macho mata os filhotes de outro progenitor para prevalecer os descendentes dele). Esse tipo de seleção sexual é chamado de seleção intrasexual, pois ocorre dentro do mesmo sexo. Porém, existe outro tipo de competição que ocorre através de elaboradas danças, vocalizações e cortejos cabendo à fêmea a escolha da melhor apresentação, nesse caso a seleção sexual é chamada de seleção intersexual, pois ocorre com envolvimento dos dois sexos.

A seleção sexual já tinha sido percebida pelo próprio Darwin, que abordou esse tema em um livro publicado em 1871, intitulado: *A descendência do homem e a seleção em relação ao sexo*. Em experimentos científicos observou-se que a fêmea pode escolher o macho pelas suas características físicas que refletem qualidade genética, pelo cuidado do macho dando alimento para fêmea como forma de corte, pelo comportamento do macho como presa e pela capacidade de potencializar a dispersão dos genes, gerando filhos que podem cruzar com a mãe (Hipótese do Filho Sensual).

Como dito anteriormente, as fêmeas podem cruzar com vários machos, fenômeno esse chamado de poliandria. Nesse caso, a fêmea tem maior probabilidade de gerar descendentes, com maior variabilidade genética e com maior número de filhotes. Com essa condição, os machos terão um maior investimento parental e geralmente gastarão tempo e energia no cuidado dos descendentes, isso ocorre nos humanos, em muitas espécies de peixes, em 5% das pererecas e 90% das aves. Sendo assim, as fêmeas irão competir pelos machos e os machos irão ter seu grau de exigência. Todas essas condições expostas antes poderão ser aplicadas às espécies vegetais.

## 2.1 Exemplificando o conceito: seleção sexual

### O consumo conspicuo – preferindo o caro ao invés do barato

*Felipe Novaes*



De acordo com o Global Luxury Retailing, os gastos mundiais com produtos de luxo chegarão a \$450 bilhões em 2012, e 41,9% dos gastos se referem somente ao gasto com roupas (citado em NELISSEN, 2011). Nelissen (2011) destaca o fato de que não é preciso ter uma renda muito alta para que a preferência pelo luxo se manifeste. De fato, até mesmo pessoas pobres em países em desenvolvimento se comportam dessa forma, por exemplo, preferindo roupas de marca do que sem marca ou de marcas menos luxuosas (mais baratas), o chamado consumo conspicuo. De fato, essa face do comportamento humano acaba com a visão de consumidor racional que alguns economistas alimentam. Mas a lógica da preferência pelo mais caro é regida pelo ganho de status social. Status pode ser definido como a posição mais alta ocupada em algum setor das relações humanas, seja no mundo acadêmico, nas empresas, na rua, em casa, numa tribo e etc. (HYMAN, 1942).

Estudos de psicologia e outros com viés comparativo sugerem que esse é um fenômeno que rege o comportamento humano (CUMMINS, 2005; MILLER, 2009; SAAD, 2007), assim como o de primatas não humanos (DE WAAL, 1982); isso sem falar no exemplo do pavão, que mostra que essa é uma tendência dos animais em geral. Dessa forma, é coerente refletir sobre o fato de que para que os humanos consigam ostentar algo com sucesso, é de suma importância que o observador consiga processar aquilo como um indício das qualidades do ostentador. E o motivo de a seleção natural ter selecionado uma mente com capacidade para processar esse tipo de relação, é que a ostentação, seja do que for que tenha valor em dado cenário e época, beneficia as relações sociais para o ostentador. Nelissen (2011) realizou experimentos que corroboram essa hipótese. Mas, antes, vamos definir os critérios para que um comportamento seja considerado um consumo conspicuo:

- 1) Deve ser algo facilmente observável (ex: o rabo do pavão; uma longa capa, co-

roa brilhante e outros adereços dos reis; ninhos exageradamente ornamentados do pássaro-caramancheiro; um logo de uma roupa de grife);

2) Deve ser um sinal difícil ou/e custoso de se falsificar;

3) O sinal deve estar relacionado a algo que não é observado diretamente, ainda que seja desejável e que denote as qualidades do ostentador, como saúde, proteção e bons genes para uma prole saudável;

4) O adereço, ou sinal, deve produzir um chamamento corporal.

Os exemplos do item 1 servem para todos os outros itens. Mas ao qual eu quero dar evidência é o último, as marcas de roupas.

### As marcas de roupas e a ostentação do consumo conspícuo

Como vimos, os animais tendem a evidenciar os seus atributos não visíveis diretamente através do gasto funcionalmente desnecessário com elementos dispendiosos e chamativos, como uma forma, também, de promover seu status. Os humanos fazem exatamente isso. Observe os trajés e adereços desses indivíduos nas fotos a seguir:



Essa relação entre o consumo conspícuo, ostentação como referência a qualidades invisíveis e status ficou bem evidente, por exemplo, nos 9 experimentos feitos por Nillesen (2011) e sua equipe. No primeiro, um pequeno bloco em que a capa tinha a foto de um rapaz de boa aparência e as outras folhas eram de um também pequeno questionário, foram distribuídos nas ruas. O objetivo do questionário era avaliar o homem nos quesitos status, condição financeira, atratividade, amizade e confiabilidade. O detalhe é que, para um grupo de pessoas foi distribuído um conjunto de testes em que a blusa de gola polo que o homem usava, possuía uma pequena logo de uma famosa marca. Outro grupo de fotos foi manipulado para ter a logo de uma marca menos valorizada. Os blocos que apresentavam a foto do homem com a logo mais famosa foram mais bem avaliados nos quesitos status e condição financeira.

Num segundo experimento, um homem saiu por um shopping pedindo doações para uma instituição de caridade. A tarefa foi dividida em duas etapas: primeiro usou uma blusa verde e lisa, e depois, a mesma blusa, porém, com um logo de uma marca bem conceituada. Os resultados mostraram que a coleta realizada com a blusa com a logo foi mais bem sucedida.

Outro estudo mostrou que candidatos a uma vaga de estágio em um laboratório tinham mais chances de serem selecionados quando estavam usando uma blusa de marca também (com o logo da marca visível).

### Conclusão dos experimentos

Mais outros experimentos foram feitos, mas os resultados sempre mostravam que as marcas mais bem conceituadas eram sempre mais bem avaliadas em relação à importância, status e condição financeira, também eram mais aceitas socialmente e conseguiam despertar com mais sucesso a atenção do público e convencê-los de algo, tanto das qualidades necessárias para uma vaga de estágio quanto para convencer alguém a fazer uma doação.

### As preferências femininas e o consumo conspícuo masculino

Outro interessante dado é a maior atenção dada pelas mulheres ao consumo conspícuo durante o período de ovulação (LENS, 2011). Isso é compatível com o modelo da psicologia evolucionista, que considera que a mente humana possui uma cognição moldada no ambiente de adaptação evolutiva (AAE), no Pleistoceno. Isso significa que, caso essa predileção feminina esteja relacionada diretamente a uma tendência evolutiva, relacionada à seleção sexual, o grau dessa característica seria variável ao longo do ciclo menstrual, com uma maior tendência a prestar atenção aos indícios de status social durante a fase da ovulação (período fértil) (ANDERSON et al., 2010).

De fato, já foi verificado que nessa fase, as mulheres apresentam alterações nas preferências de características masculinas, apresentando maior atração por homens altos, com rosto mais másculo do que infantilizado, e com papel social dominante (GANGESTAD & THORNHILL & GARVER-APGAR, 2005; LUKASZEWSKI & RONEY, 2009). Assim, seria natural pensar também numa consequência para a percepção dos indícios de status masculino, assim como uma eliminação desses efeitos nas mulheres que fazem uso de pílulas anticoncepcionais. O resultado da pesquisa corroborou essas hipóteses, mostrando que produtos relacionados a luxo e que não são destacados por sua funcionalidade, despertavam significativamente mais a atenção das que estavam em período fértil.

### Conclusão

Todas essas evidências mostram uma estrutura cognitiva comum aos seres humanos e aos animais não humanos. Primeiramente, podemos dizer que uma evidência é o fato de que para a lógica do status funcionar, precisamos ter uma mente que saiba evidenciá-lo e, por outro lado, uma que saiba percebê-lo como tal. Esse mecanismo é evidente na seleção sexual, como no exemplo do pássaro caramancheiro, que gasta energia, recursos, tempo, e corre o risco de ficar mais visível aos predadores, ao enfeitar seu ninho da melhor maneira possível a fim de “seduzir” as fêmeas.

O consumo conspícuo é como se fosse uma regra que permanece constante, mas que assume diversas faces no caso dos humanos. Hoje podemos dizer que essa estratégia é uma característica que foi mais útil na seleção sexual no nosso AAE até pouco tempo atrás, quando era bem mais complicado de ostentar luxo sem que isso correspondesse diretamente a uma ampla gama de recursos, saúde e outras características buscadas pelas fêmeas. No caso dos humanos modernos, a possibilidade de comprar usando cartão de crédito, por exemplo, fez com que pessoas com baixa renda pudessem comprar coisas incompatíveis com suas possibilidades financeiras, considerando a compra à vista. Nossos ancestrais caçadores – coletores, usavam adereços que mostravam claramente sua posição dentro do grupo. Indivíduos das altas hierarquias sempre eram os de indumentária mais barroca, o que persistiu até não muito tempo atrás, basta olhar as fotos de Reis e Imperadores e suas roupas e adereços barrocos. Porém, mesmo essas táticas não sendo tão eficazes hoje, essas pesquisas mostram que ainda continuamos com um cérebro ancestral.

Isso levanta uma hipótese interessante sobre a origem das roupas. Talvez as primeiras roupas servissem ao propósito de separar os indivíduos de acordo com sua posição social dentro das coalizões dos primeiros *Homo sapiens sapiens* e não para proteger do frio ou do calor, ou de parasitas. Ou, até, as primeiras roupas tenham servido a todos esses propósitos, matando vários coelhos com uma cajadada só.



## Saiba mais

### Número de espécies no planeta

#### Animais

7.770.000 espécies de animais, das quais 953.434 já foram descritas e catalogadas;

#### Plantas

298.000 espécies de plantas, das quais 215.644 já foram descritas e catalogadas;

#### Fungos

611.000 espécies de fungos (bolores, cogumelos) das quais 43.271 já foram descritas e catalogadas;

#### Protozoários

36.400 espécies de protozoários, das quais 8.118 já foram descritas e catalogadas;  
27.500 espécies de chromistas (incluindo algas marrons, diatomáceas etc.), das quais 13.033 já foram descritas e catalogadas.

**Total: 8,74 milhões de espécies eucariota na Terra.**

## 3. Especiação

Após ter entendido como se dá o processo evolutivo e as forças que o rege é importante entender também, como as espécies se diversificaram para termos a biodiversidade atual. Falando nisso, você tem noção de quantas espécies existem no planeta? Um estudo recente mostra que se incluirmos todos os eucariontes dos cinco reinos conhecidos, a previsão do número de seres vivos na Terra seria aproximadamente 8,7 milhões, sendo que apenas 1,5 milhões são hoje catalogadas.

Como todas elas se formaram ao longo do tempo? Essa pergunta é bem complicada, pois cada espécie tem sua história evolutiva, mas as forças da evolução que auxiliaram na formação da biodiversidade atual foram principalmente: as alterações ambientais, mutação, seleção natural, migração e deriva gênica.

### 3.1 O que é espécie?

Não sei se você já se fez essa pergunta alguma vez na vida ou se já te deram esse conceito formulado e tomou como verdade, o fato é que definir espécie é algo difícil, pois para cada definição sempre existe uma limitação conceitual, onde o conceito vale para algumas espécies e para outras não vale, entre outras limitações. Neste capítulo vamos apresentar alguns conceitos e discutir como se dá o processo de especiação.

Na prática as espécies são reconhecidas e classificadas pela morfologia, forma ou fenótipo. Não seria surpresa que uma das formas definir espécie fosse utilizando esse critério. No entanto, existem variações dentro da mesma

espécie e é aí que mora o perigo, pois dessa forma acabaríamos classificando em espécies diferentes indivíduos que pertencem à mesma espécie. Além disso, algumas espécies são muito diferentes durante as várias fases da vida e isso também complica a classificação.

Então para definir espécie existem duas formas de conceituar: o conceito horizontal que leva em conta as espécies em um dado momento e o conceito vertical, que leva em conta as espécies ao longo de um ciclo de vida. Como podem perceber o conceito vertical seria o mais adequado para definir.

### 3.2 Os conceitos de espécie

#### a) Conceito fenético (fenotípico; morfoespécie)

Conceito com muitos adeptos principalmente nos anos 60 e início dos anos 70. Possui uma desvantagem por incluir muitos critérios subjetivos, porém é considerado um conceito prático. Além disso, este conceito não funciona quando existem espécies simpátricas, críplicas, com dimorfismo sexual e polimorfismos. Portanto, este conceito é baseado nas características morfológicas e muito útil para classificar indivíduos de reprodução sexuada, assexuada e fósseis. Não possui qualquer ligação direta com genética.

#### b) Conceito biológico de espécies (CBE)

Conceito no qual as espécies são definidas de acordo principalmente com seu isolamento reprodutivo. Segundo Mayr (1982), espécies são grupos de populações atualmente ou potencialmente intercruzantes, que são reprodutivamente isoladas e que ocupam um nicho específico na natureza. O termo potencialidade na definição é importante, pois além do isolamento reprodutivo podem existir outros fatores que facilitem a formação de híbridos viáveis. Devem estar isolados geograficamente de outras espécies correlatas, para evitar possíveis cruzamentos.

Segunda a descrição da bióloga e pesquisadora Solange Peixinho em seu artigo sobre conceitos de espécies, ela informa que o conceito biológico de espécies também possui suas limitações:

Quais as limitações de aplicação do CBE? Dificuldade em determinar o isolamento para populações geograficamente separadas, não é aplicável a todas as espécies, isto é, espécies assexuadas, espécies com introgressão e hibridização, espécies fósseis, não é útil aos taxinomicos clássicos e não têm dimensão evolutiva. Deste modo, só podemos aplica-lo às populações mendelianas.

Como as plantas possuem um alto grau de hibridização, este conceito não foi muito bem aceito pelos botânicos.

Este tipo de conceito tem suas vantagens, pois é bem aceito dentro da genética de populações, amplamente aceito pelos zoólogos e constitui a definição usada pela *Endangered Species Act* (Lei das Espécies Ameaçadas), que serve como legislação nos Estados Unidos.

#### **c) Conceito de reconhecimento de espécie**

Proposta por Peterson em 1985 e diz que espécie como um conjunto de indivíduos que compartilham um sistema específico de reconhecimento para acasalamento (SMRS - specific mate recognition system).

#### **d) Conceito ecológico de espécie**

Implica em definir espécie num conjunto de indivíduos que exploram o mesmo nicho ecológico durante as diferentes fases da vida. A relação desse conceito com a genética é fraca, logo o aspecto evolutivo é deixado de lado.

#### **e) Conceito filogenético de espécie**

Também pode ser conhecido como conceito genealógico de espécie, onde utiliza como critério de classificação a monofilia, isto é, linhagem de indivíduos que possuem um ancestral comum. Pelo conceito filogenético, as espécies são identificadas estimando-se a filogenia de populações estreitamente relacionadas e encontrando os menores grupos filogenéticos.

Talvez o melhor conceito de espécie estivesse na união de todos esses conceitos abordados até agora, dessa forma acredito que a maioria das exceções seria incluída e uma definição evolutiva mais consistente fosse formada.

### **3.3 Barreiras de isolamento e a variação intraespecífica**

A variação intraespecífica ocorre geralmente pela presença de barreiras de isolamento, que não são necessariamente barreiras geográficas, são fatores que impedem o intercruzamento, como formas diferentes de corte, formação de um novo curso de rio e até mesmo formação de uma ilha.

Existem vários tipos de barreiras de isolamento, que são classificadas em pré-zigóticas e pós-zigóticas, como o próprio nome já diz a primeira impede a formação do zigoto e a segunda impede o desenvolvimento dele. A seguir observe o Quadro 1 que contém os principais tipos de barreiras de isolamento pré-zigóticas.

Quadro 1

PRINCIPAIS TIPOS DE BARREIRAS DE ISOLAMENTO PRÉ-ZIGÓTICOS	
CLASSIFICAÇÃO DAS BARREIRAS DE ISOLAMENTO REPRODUTIVO DE DOBZHANSKY (1970)	
TIPO DE ISOLAMENTO	EXPLICAÇÃO
ISOLAMENTO ECOLÓGICO OU DE HABITAT	As populações envolvidas ocorrem em habitat diferentes, na mesma região geral.
ISOLAMENTO SAZONAL OU TEMPORAL	As épocas de acasalamento ou de florescimento ocorrem em estações diferentes.
ISOLAMENTO SEXUAL OU ETOLÓGICO	A atração sexual mútua entre espécies diferentes é fraca ou ausente.
ISOLAMENTO MECÂNICO	A falta de correspondência física entre genitálias ou entre partes das flores impede a cópula ou a transferência do pólen.
ISOLAMENTO POR POLINIZADORES DIFERENTES	Em plantas floríferas, espécies relacionadas podem ser especializadas em atrair diferentes insetos como polinizadores.
ISOLAMENTO GAMÉTICO	Em organismos com fertilização externa os gametas masculinos e femininos podem não se atrair. Em organismos com fertilização interna, os gametas ou gametófitos de uma espécie podem ser inviáveis nos dutos sexuais ou estilos de outra espécie.

Fonte: Adaptado de Ridley (2006).

Agora observe o Quadro 2 que mostra os mecanismos de isolamento pós-zigóticos, que reduzem a viabilidade ou a fertilidade dos zigotos híbridos.

Quadro 2

TIPOS DE BARREIRAS DE ISOLAMENTO PÓS-ZIGÓTICOS	
Classificação das barreiras de isolamento reprodutivo de dobzhansky (1970)	
TIPO DE ISOLAMENTO	EXPLICAÇÃO
INVIABILIDADE DO HÍBRIDO	Os zigotos híbridos têm viabilidade reduzida ou são inviáveis.
ESTERILIDADE DO HÍBRIDO	A F1 híbrido não consegue produzir gametas funcionais de um ou de ambos os sexos.
DESMORONAMENTO DO HÍBRIDO	A F2 ou os híbridos retrocruzados têm viabilidade ou fertilidade reduzida.

Fonte: Adaptado de Ridley (2006).

Imagine uma população A em um determinado ambiente. Você sabe que ela está crescendo e ocupando novos ambientes. Nesses novos ambientes existem outras populações (B, C, D...), que potencialmente podem inter-cruzar com a população A. Nessa situação você pode imaginar cada uma das barreiras pré e pós-zigóticas atuando. Além disso, imagine que a população A em novos ambientes e diante de uma nova seleção natural, poderá sofrer alterações na frequência de genes, logo se perceberá uma variação intra-específica, cujo aprofundamento durante o tempo poderá ser capaz de dar origem a novas espécies.

Ao imaginar esses possíveis acontecimentos e entendendo-os, posso dizer que você já incorporou o espírito da biologia evolutiva, embora você tenha que saber que é só o começo, ainda há muita coisa para aprender sobre evolução.

### 3.4 O processo de especiação

Didaticamente o processo de especiação ocorre em três etapas:

- a) Isolamento geográfico
- b) Isolamento reprodutivo
- c) Isolamento genético – contato secundário

O isolamento geográfico parece ser preponderante para o processo de especiação, porém o mais importante é o isolamento reprodutivo, visto que este mostrará se a espécie é uma unidade evolutiva. Com o passar do tempo o isolamento geográfico e reprodutivo intensifica essa divisão, de tal forma que em um contato secundário (difícil de ocorrer) com a espécie ancestral não haverá fluxo gênico.

Existem três tipos de especiação relacionados com a condição geográfica das populações (Quadro 3):

Quadro 3

TIPOS DE ESPECIAÇÃO RELACIONADOS COM A CONDIÇÃO GEOGRÁFICA DAS POPULAÇÕES
<p>1 - ESPECIAÇÃO ALOPÁTRICA</p> <p>Ocorre quando uma nova espécie surge isolada geograficamente da ancestral.</p>
<p>2 - ESPECIAÇÃO PARAPÁTRICA</p> <p>Ocorre quando uma nova espécie surge em ambientes geográficos limítrofes de sua ancestral.</p>
<p>3 - ESPECIAÇÃO SIMPÁTRICA</p> <p>Ocorre quando uma nova espécie surge no mesmo ambiente geográfico de sua ancestral.</p>

Desses três tipos, o mais comum na natureza é a especiação alopátrica, no entanto, é importante ressaltar que a distância geográfica não é necessariamente uma barreira de isolamento, porém em ambientes diferentes, na especiação alopátrica, ocorre a seleção de características diferentes que pode gerar o isolamento genético e o impedimento do fluxo gênico. Esse tipo de especiação pode ocorrer por dispersão, onde uma espécie migra para outra região ou por vicariância, onde ocorre um movimento tectônico que separa as populações.

O isolamento geográfico pode favorecer a evolução do isolamento reprodutivo, como subprodutos da divergência em populações alopátricas. Isso é comprovado com evidências laboratoriais e em observações biogeográficas. A deriva genética, o surgimento de adaptações e consequentemente a fixação de algum gene que favoreça o isolamento reprodutivo e gênico são ferramentas para a ocorrência da especiação alopátrica.

A especiação simpátrica e a parapátrica são teoricamente possíveis, porém atualmente não existem estudos consistentes sobre esses tipos de especiação. Pesquisas profundas poderão dar maiores informações sobre esses eventos, além disso, pesquisas para verificar a participação da seleção sexual no processo de especiação e a descoberta de genes específicos que promovam a formação de novas espécies são necessárias para entendermos cada vez mais a origem da biodiversidade do nosso planeta.

### 3.5 Exemplificando o conceito: a especiação

Um exemplo de isolamento reprodutivo pré-zigótico é o que a pesquisadora Diane Dodd pesquisou em 1989. Ela coletou 8 populações de moscas da espécie *Drosophila pseudoobscura* e dividiu em dois grupos com 4 populações. Um grupo recebeu uma dieta rica em amido e o outro rico em maltose, depois de várias gerações observou diferenças em enzimas digestivas dos dois grupos, certamente uma adaptação ao padrão de recursos disponibilizados (Figura 9).

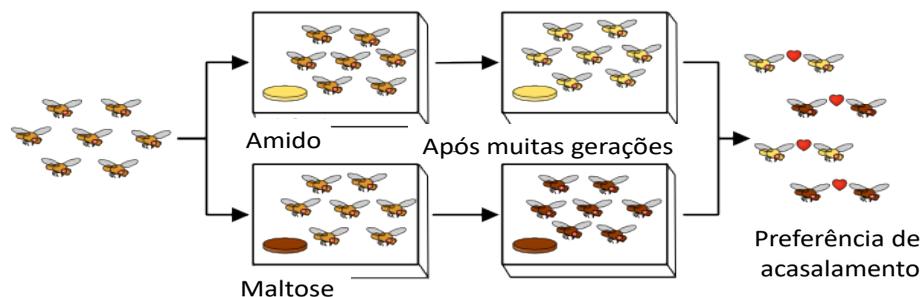


Figura 19 – Experimento com *Drosophila pseudoobscura* sugere que as populações de isolamento em diferentes ambientes (por exemplo, com diferentes fontes de alimento) pode levar ao início do isolamento reprodutivo. These results are consistent with the idea that geographic isolation is an important step of some speciation events. Estes resultados são consistentes com a ideia de que o isolamento geográfico é um passo importante de alguns eventos de especiação.

Fonte: Adaptado de: [http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/article/0\\_0\\_0/evo\\_45](http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/article/0_0_0/evo_45)

A pesquisadora colocou moscas do grupo amido em contato com as moscas do outro maltose, isto é, ela misturou machos e fêmeas dos dois grupos em um único grupo para verificar se houve isolamento reprodutivo como subproduto da divergência alopátrica, logo percebeu-se que as moscas fêmeas do grupo amido possuem preferência por machos do mesmo grupo, o mesmo acontece com o grupo maltose. Conclui-se então que isolamento alopátrico pode gerar isolamento reprodutivo, gerando por sua vez especiação. As forças evolutivas que podem atuar nesse processo é a seleção natural além da deriva genética, que age em populações pequenas, efeito denominado de Gargalo de Garrafa.

## 4. Coevolução

A coevolução ocorre quando se tem duas ou mais espécies influenciando a história evolutiva uma das outras, podendo gerar coadaptações, porém nem todas as coadaptações podem ser originadas de coevolução, pois há possibilidade de duas espécies evoluírem independentemente e ao acaso se encontrarem e entrarem em mutualismo, de tal forma que estariam adaptadas uma a outra.

Para mostrar se a coadaptação é fruto de coevolução é importante demonstrar, se existe uma história evolutiva entre os ancestrais das espécies estudadas, exercendo força evolutiva um sobre o outro. Em muitos casos estudados a análise filogenética das espécies coadaptadas forma imagens especulares (cofilogenias), levando a entender que nesse caso houve coevolução, mas nem todas coevoluções produzem cofilogenias.

A coevolução pode explicar o grande padrão de diversificação de angiospermas e insetos, visto que ambos coevoluem, logo alterações em um dos dois favorece a seleção de outra característica no outro e assim ocorrendo durante milhões de anos pode ser uma explicação para diversidade atual de plantas florífera e insetos polinizadores.

Uma teoria evolutiva é proposta por Leigh Van Valen em 1973 para explicar situações na natureza onde duas espécies em competição evoluem de maneira que a competição se mantém estável (Rainha Vermelha). O nome da teoria vem da frase do livro *Alice através do espelho* de Lewis Carrol: “aqui neste país Alice, você precisa correr o máximo que puder para permanecer no lugar...” (tradução livre). Essa é uma das possíveis explicações para a reprodução sexuada como forma de aumentar a diversidade genética e dificultar a ação de parasitas, e das diferenças entre os sexos masculino e feminino, devido à competição pelas proporções sexuais na geração seguinte.

### 4.1 Exemplificando o conceito: coevolução

Os cientistas Pierce e Mead (1981) pesquisaram a relação existente entre dois insetos, uma formiga (*Formica Fusca*) e uma larva de borboleta (*Glaucoopsyche lygdamus*). A Figura 20 mostra a formiga se alimentando da larva sem matar, nesse caso parece que apenas a formiga está se beneficiando do processo, mas ela também cumpre o interessante papel de proteger a larva de parasitas como vespas e moscas.



Figura 20 – Formiga Fusca se alimentando da larva de borboleta (*Glaucopsyche lygdamus*).

Fonte: <http://www.pbase.com/fwg/image/104572825>

Os pesquisadores isolaram as larvas das formigas para verificar essa hipótese, logo perceberam que a taxa de parasitismo da larva aumentou. Conclui-se então que existe uma espécie de coadaptação interespecífica (mutualismo).

A pergunta agora é: Como foi que essa coadaptação evoluiu entre essas duas espécies? Pode-se pensar que em algum momento da história da vida, essa formiga atacou a larva, impedindo a ação dos parasitas nesta última e sendo útil na alimentação da formiga. A mudança em uma das espécies poderia influenciar nessa relação, isto é, surgindo uma larva com o líquido mais adocicado, atrairia mais formigas e assim estaria mais protegida, logo a influência de um ser afeta o outro. Nesse caso ocorreu benefício mútuo, porém em outros casos o processo é antagônico, isto é, o melhoramento de uma espécie (melhora da defesa) promove a redução da outra (os parasitas), que ao longo da história evolutiva, pode gerar uma cofilogenia.

## Saiba mais



### Evolução e doenças infecciosas

O grande cientista inglês J. B. S. Haldane (1892-1964), um polímata. Haldane começou sua carreira científica como professor de fisiologia na Universidade de Oxford, onde fez pesquisas importantes sobre fisiologia humana subaquática. Transferiu-se, depois, para a Universidade de Cambridge como professor de bioquímica, tendo gerado contribuições fundamentais sobre cinética enzimática. Posteriormente, foi como

professor de genética para o University College em Londres, onde ajudou a criar a genética de populações moderna. Haldane foi um comunista ativo e escreveu uma coluna de ciência no jornal Daily Worker. Na foto ele está participando de um comício em Trafalgar Square, Londres, em 1937. Na década de 50, desencantado com o imperialismo militar britânico, mudou-se para a Índia e aderiu ao budismo jainista.

O grande geneticista-bioquímico-fisiologista-ativista político inglês J. B. S. Haldane (1892-1964) é um dos meus ídolos. Já mencionei seu nome em uma coluna anterior, como um dos pais da nova síntese evolucionária, ou seja, da compatibilização entre Darwin e Mendel que ocorreu na primeira metade do século 20.

Durante décadas, Haldane escreveu semanalmente sobre ciência no jornal Daily Worker, publicação oficial do Partido Comunista inglês. De acordo com John Maynard-Smith (1920-2004), outro importante geneticista inglês, Haldane era “superlativo” como popularizador da ciência, porque captava conexões que ninguém havia percebido antes.

Em 1949, Haldane proferiu uma conferência na Itália e realçou, aparentemente pela primeira vez, o fato de que as doenças infecciosas têm um papel evolucionário importantíssimo como agentes seletivos. Por anos eu tentei em vão conseguir o artigo com o texto dessa famosa conferência, publicado no inacessível periódico italiano La Ricerca Scientifica.

Só muito recentemente tive sucesso, graças a uma reedição do texto na revista indiana Current Science. O artigo é genial – Haldane em sua melhor forma! Vejam um pequeno trecho, de simplicidade cristalina (minha tradução):

“Provavelmente uma alteração bioquímica muito pequena pode conferir a uma espécie hospedeira um grau substancial de resistência a um parasito bem adaptado. Isto tem um importante efeito evolucionário. Significa que é vantajoso para o indivíduo possuir um fenótipo bioquímico raro [...] E significa, também, que é uma vantagem para a espécie ser bioquimicamente diversa e mesmo mutável em referência a genes envolvidos na resistência às doenças.”

Haldane propôs, adicionalmente, que a seleção de fenótipos bioquímicos raros não era apenas de importância na manutenção da variabilidade dentro das espécies, mas devia ser também um mecanismo de especiação.

## A hipótese da malária

Um ano antes dessa conferência de Haldane, James Neel (apresentado na coluna de março) havia feito uma proposta, trabalhando dentro do paradigma de “doença racial” da anemia falciforme. Neel postulou que a alta frequência dessa doença em negros americanos e africanos e também da talassemia em populações mediterrâneas (ver também coluna de março) refletia uma alta taxa de mutação do gene da hemoglobina nesses grupos étnicos distintos.

Haldane discordou. Como relatado por Giuseppe Montalenti em um adendo ao artigo de 1949, ele, informado da alta frequência de heterozigotos da talassemia em regiões endêmicas de malária no sul da Itália, propôs que, como as hemácias dos heterozigotos para a talassemia eram menores, esse fato os tornaria mais resistentes à parasitose. Nascia assim a “hipótese da malária”, cuja primeira confirmação foi feita não em estudos de talassemia, mas da própria anemia falciforme.

Em 1954, o médico inglês Anthony C. Allison publicou resultados de sua pesquisa sobre malária e anemia falciforme em Uganda. Ele observou que, em crianças pequenas com malária, as densidades do parasita *Plasmodium falciparum* no sangue eram quatro vezes menores em heterozigotos AS do que em homozigotos normais AA. Ele calculou que as crianças AS tenham uma chance 76% maior de sobreviver ao primeiro ataque de malária do que crianças AA.

Mais tarde a hipótese da malária foi sacramentada pela óbvia correspondência geográfica entre a prevalência da malária causada pelo *Plasmodium falciparum* e a frequência do gene falciforme na África. Observe-se que o gene da anemia falciforme (alelo beta S) não é visto nas populações de regiões geográficas da África nas quais a malária não é endêmica.

Por exemplo, ele está ausente nas populações das regiões altas da Etiópia (Tigre, Falasha, Amhara e Galla), nos Masai, Kamba e Chaga do Quênia e da Tanzânia, nos bosquímanos e hotentotes da parte sul da África e nos Shona, uma população de língua banto do Zimbábue. Em outras palavras: a presença do gene não tem nada a ver com cor ou "raça", mas com geografia.

### Doenças genéticas e geografia

Por outro lado, além da África subsaariana, o alelo beta S e a anemia falciforme podem ser vistos na África do Norte, Grécia, Itália, Oriente Médio, Península Arábica, Índia e até na China. A razão dessa ampla distribuição ficou mais clara com os avanços em genética molecular humana.

Estudos de marcadores genéticos que flanqueiam o gene da beta-globina mostraram que, na verdade, aconteceram várias mutações beta S independentes que se estabeleceram em populações expostas à malária falciparum. Quatro das mutações ocorreram na África e receberam os nomes das respectivas regiões geográficas em que se fixaram: tipo Senegal, tipo Camarões, tipo Benin e tipo República Centro-africana (também chamada tipo Banto). A quinta mutação beta S, denominada tipo Árabe-Indiano, não ocorre na África e sim, como o nome indica, na Ásia Menor e Índia.

Deve ficar bem claro, então, que a anemia falciforme não é uma «doença de negros» nem uma "doença africana", mas sim uma doença eminentemente geográfica, produto de uma estratégia evolucionária humana para lidar com a malária causada pelo *Plasmodium falciparum*.

A talassemia é uma doença também geográfica, que afeta populações da África, do Mediterrâneo e da Ásia e representa uma estratégia evolucionária alternativa para resistência à malária.

Analogamente, a fibrose cística (mucoviscidose) é outra doença geográfica, desta vez europeia, que emergiu como uma provável estratégia evolucionária de resistência à febre tifoide. Já a doença de Tay-Sachs, especialmente vista em judeus asquenazitas, parece estar ligada à resistência à tuberculose.

Mas, deve ficar claro e evidente que a fibrose cística não é uma "doença europeia", nem a doença de Tay-Sachs é uma "doença judaica". Altas frequências da fibrose cística, por exemplo, já foram observadas em algumas populações do Oriente Médio e da África e a doença de Tay-Sachs é vista em elevada frequência em canadenses franceses da província de Quebec.

Podemos, com esses exemplos, perceber o papel fundamental das doenças infecciosas na evolução do genoma humano e a notável importância do território endêmico dessas enfermidades na seleção de certos genes em determinadas populações humanas. É totalmente desnecessário invocar conceitos arcaicos como "raça" e "doenças raciais" para explicar a variação de prevalência de doenças genéticas em diferentes grupos continentais. A geografia explica tudo.

**Fonte:** SERGIO DANILO PENA. Publicado em 11/04/2008. [Consult. 2011-09-11]. Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/deriva-genetica/anemia-falciforme-uma-doenca-geografica>

## 5. Irradiação e extinção

### 5.1 Irradiação adaptativa

<sup>43</sup>Na escala de tempo geológico, o Cambriano ou Câmbrico é o período da era Paleozóica do éon Fanerozóico que está compreendido entre 542 milhões e 488 milhões de anos atrás, aproximadamente. O período Cambriano sucede o período Ediacarano da era Neoproterozóica do éon Proterozóico e precede o período Ordoviciano de sua era. Divide-se nas épocas Cambriana Inferior, Cambriana Média e Cambriana Superior, da mais antiga para a mais recente. O nome Cambriano vem de Cambria, que é a latinização de Cymru, o nome pelo qual os povos antigos que habitavam o País de Gales chamavam suas terras, onde foram encontrados os primeiros estratos rochosos deste período. Os locais onde se encontram rochas e fósseis deste período são relativamente raros, sendo os principais o Folhelho Burgess, no Canadá, o Folhelho de Maotianshan (ou biota de Chengjiang), na China e os argilitos de Emu Bay, na Austrália.

Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Cambriano>.

Durante a fase de irradiação adaptativa ocorre aumento do número de espécies ou melhor, dependendo do momento da história da vida ocorre o predomínio da irradiação em relação à extinção, logo haverá o aumento de táxons.

Segundo Mark Ridley, no livro *Evolução em 2007: Irradiação adaptativa* (frequentemente chamada apenas de “irradiação”) significa que um pequeno número de espécies ancestrais de um táxon se diversifica em um número maior de espécies descendentes, ocupando uma variedade mais ampla de nichos ecológicos”.

Esse processo pode ocorrer em todos os níveis de organização da vida e em todos os ambientes, esse processo se torna mais evidente quando se tem uma baixa quantidade de espécies sofrendo irradiação em uma grande área geográfica.

Algumas circunstâncias favorecem a irradiação:

- A colonização de uma área sem competidores;
- Extinção dos competidores;
- Substituição dos competidores;
- Barreiras adaptativas.

A irradiação adaptativa mais importante conhecida atualmente foi a que ocorreu no período cambriano<sup>43</sup>, conhecida como explosão do cambriano. Uma hipótese para explicar essa irradiação tão intensa foi surgimento de esqueletos rígidos, em detrimento dos animais de corpo mole (Figura 21).

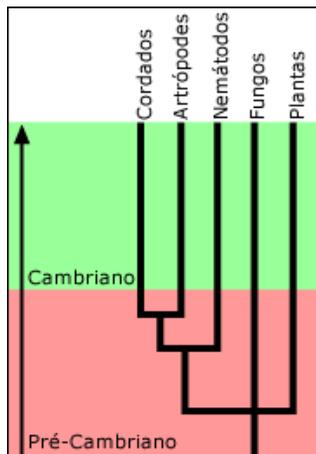


Figura 21 – Divergência importante ocorreu no Período Pré-Cambriano.

Fonte: <http://www.ib.usp.br/evosite/evo101/VIIB1cCambrian.shtml>

## 5.2 Exemplificando o conceito: Irradiação adaptativa

Devido ao isolamento das ilhas, e dependendo do vento e elevação, há quatro principais ecossistemas encontrados no arquipélago:

- Planícies áridas e florestas de cactos;
- Florestas;
- Florestas densas e de altas altitudes;
- Áreas com poucas árvores e muita grama.

Lavas solidificadas formam precipícios e encostas.

Existem mais de 500 espécies de plantas encontradas em Galápagos, e cerca de um terço delas são consideradas endêmicas, isto é, são plantas nativas das ilhas e que não são encontradas em nenhum outro lugar do mundo. Espécies únicas de algodão, maracujá, pimentão, pimenta e tomate crescem lá.

Embora exploradores e marinheiros tenham deixado para trás alguns animais, como cabras e porcos, a grande maioria dos animais que habitam as ilhas são espécies endêmicas, alguns até mesmo exclusivos de determinadas ilhas do arquipélago. Muitos não têm medo de viver, pois não têm predadores. O atobá de pés azuis é um exemplo: esses pássaros deixaram de colocar ovos em locais isolados e hoje põem ovos diretamente sobre o solo (Figura 22).



Figura 22 – Atobás de pés azuis.

Fonte: ©iStockphoto.com/BKK2008.

As Ilhas Galápagos são importantes por causa dessas espécies endêmicas – há cerca de 9 mil espécies vivendo nas ilhas e nas águas que as rodeiam. Catorze distintas subespécies de tartarugas gigantes vivem nas ilhas, por exemplo, assim como os únicos pinguins que vivem em regiões tropicais. Há inúmeras espécies de répteis incluindo iguanas terrestres e ma-

rinhas (iguanas marinhas são os únicos lagartos conhecidos que conseguem nadar no oceano) – Figura 23, lagartos, lagartixas, cobras, 1.600 espécies de insetos e 400 espécies de peixes.



Figura 23 – Iguanas

Fonte: @iStockphoto.com/Ooyoo.

Competindo com as tartarugas gigantes pela posição de espécies mais famosas das ilhas estão 13 espécies de tentilhões, conhecidos como tentilhões de Darwin porque serviram como prova para a sua teoria da evolução e seleção natural. Esses tentilhões são um exemplo do que é chamado de radiação adaptativa, processo pelo qual surgem várias espécies a partir de uma mesma espécie ancestral. Os tentilhões de Darwin eram, na verdade, uma única espécie de tentilhão quando Darwin chegou à ilha, mas através da mutação e seleção natural, eles evoluíram para diferentes espécies com diferentes formas de bicos – dando a cada um uma vantagem em seu habitat específico.

### 5.3 Extinção

Na história da humanidade a noção de extinção é relativamente recente, data do final do século XVIII e início do século XIX. A existência de fósseis já era conhecida nessa época, porém pensava-se que estes animais poderiam estar presentes em alguma parte inexplorada do planeta. Com o avanço da ciência percebeu-se que realmente os fósseis se tratavam de espécies que não existem mais.

Devido a dificuldade na reconstituição fóssil, principalmente de esqueletos de mamíferos, o estudo de extinção fica prejudicado sendo necessário muito tempo de investigação para concretizar a extinção de determinado animal. Georges Curvier (1769 - 1832) foi um anatomista francês que iniciou os estudos de Anatomia Comparada com intenção de comprovar a extinção dos animais representados pelos fósseis encontrados, diferenciando mastodontes e mamutes de elefantes asiáticos, por exemplo.

Sabendo da existência e ocorrência da extinção, para a biologia evolutiva ficou uma pergunta intrigante: Como essas espécies foram extintas? A resposta dessa pergunta pode se dar de duas maneiras, a primeira é de fácil observação, visto que a atividade humana no planeta devasta vários ambientes promovendo a extinção de muitas espécies, que muitas vezes nem catalogadas foram. A outra maneira de responder é baseada na investigação das alterações ambientais naturais como as glaciações e aquecimentos terrestres. Nesses eventos naturais ocorrem extinções em massa e isso é altamente documentado nos registros fósseis. A Figura 24 demonstra que parece ter havido 5 grandes extinções em massa, das quais apenas duas a do fim do Permianos, a maior da história (80 a 96% das espécies extintas) e a do fim do Cretáceo (60 a 75% das espécies extintas) estão bem evidenciadas.

O impacto de asteroides parece ser a melhor explicação para a extinção do fim do Cretáceo, porém outras explicações pode haver para justificar as extinções em massa como: mudanças no nível do mar, mudanças climáticas, erupções vulcânicas e movimentos tectônicos. Nada impede de pensar que todas essas alterações sejam promovidas pelo impacto do asteroide, porém há evidências de impacto de asteroides sem causar todas as outras alterações, então, percebe-se a necessidade de uma melhor investigação sobre as causas das extinções em massa<sup>44</sup>.

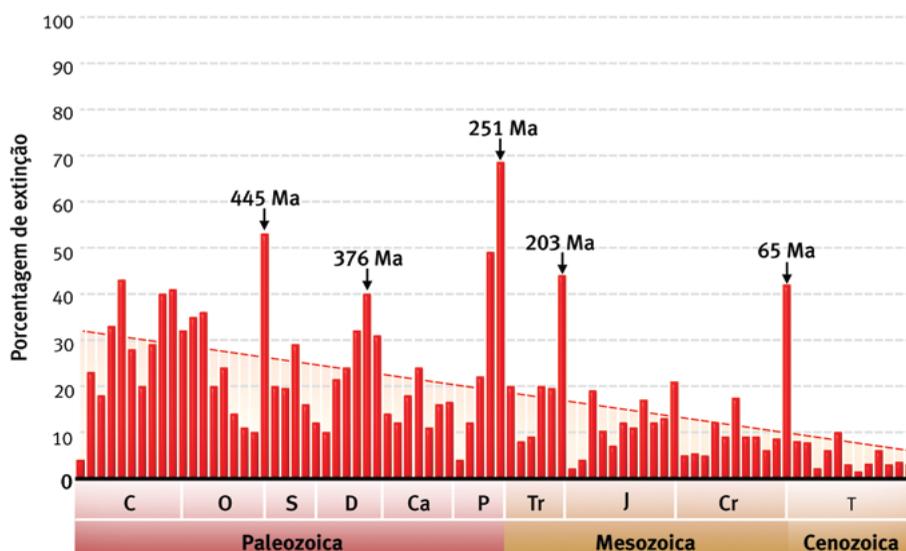


Figura 24 – Evolução das extinções de espécies ao longo da história da Terra – as cinco grandes extinções estão assinaladas com setas. A sigla Ma significa ‘milhões de anos’ e as letras abaixo das colunas indicam os períodos Cambriano (C), Ordoviciano (O), Siluriano (S), Devoniano (D), Carbonífero (Ca), Permiano (P), Triássico (Tr), Jurássico (J), Cretáceo (Cr) e Terciário (T).

Fonte: [cienciahoje.uol.com.br/banco-de-imagens/lg/protected/ch/.../file](http://cienciahoje.uol.com.br/banco-de-imagens/lg/protected/ch/.../file)

<sup>44</sup>Pseudoextinção  
Significa que um táxon parece extinto, mas só por causa de um erro ou artefato na evidência e não porque a linhagem subjacente realmente deixou de existir, ou seja, os descendentes de uma população original se modificam ao ponto de serem considerados como uma nova espécie e a espécie original como extinta.



## Saiba mais

### Sexta extinção em massa

Estima-se que cerca de 4 bilhões de espécies tenham vivido na Terra. Desse total que evoluiu no planeta nos últimos 3,5 bilhões de anos, nada menos do que 99% deixaram de existir.

O número pode impressionar, mas não envolve nada anormal e demonstra como a extinção de espécies é algo comum e equilibrado pela própria especiação, o processo evolutivo pelo qual as espécies se formam. Eventualmente, esse balanço deixa de existir quando as taxas de extinção se elevam. Em alguns momentos, cinco para ser exato, as taxas são tão altas que o episódio se caracteriza como uma extinção em massa.

Após as extinções em massa nos períodos Ordoviciano, Devoniano, Permiano, Triássico e Cretáceo – quando os dinossauros, entre outros, foram extintos –, cientistas apontam que a Terra pode estar se aproximando de um novo episódio do tipo.

Em artigo publicado na edição desta quinta-feira (3/3) da revista Nature, um grupo de cientistas de instituições dos Estados Unidos levanta a questão de uma eventual sexta extinção em massa. O artigo tem entre seus autores o brasileiro Tiago Quental, que durante a produção do estudo estava no Museu de Paleontologia da Universidade da Califórnia e desde fevereiro é professor doutor do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo.

“Paleontólogos caracterizam como extinções em massa os episódios em que a Terra perde mais de três quartos de suas espécies em um intervalo geológico curto, como ocorreu apenas cinco vezes nos últimos 540 milhões de anos. Biólogos agora sugerem que uma sexta extinção em massa possa estar ocorrendo, por conta das perdas de espécies conhecidas nos últimos séculos e milênios”, disseram os autores.

O estudo analisou como as diferenças entre dados modernos e obtidos a partir de fósseis e a influência de novas informações paleontológicas influenciam o conhecimento a respeito da crise de extinção atual.

“Os resultados confirmam que as taxas de extinção atuais são mais elevadas do que se esperaria a partir [da análise] dos registros fósseis, destacando a importância de medidas efetivas de conservação”, afirmaram. Como exemplo, citam que, nos últimos 500 anos, das 5,5 mil espécies de mamíferos conhecidas pelo menos 80 deixaram de existir.

“Se olharmos para os animais em perigo crítico de extinção – aqueles em que o risco de extinção é de pelo menos 50% em três gerações ou menos – e assumirmos que seu tempo acabará e que eles sumirão em mil anos, por exemplo, isso nos coloca claramente fora do que poderíamos considerar como normal e nos alerta que estamos nos movendo para o domínio da extinção em massa”, disse Anthony Barnosky, curador do Museu de Paleontologia e professor da Universidade da Califórnia em Berkeley, principal autor do estudo.

“Se as espécies atualmente ameaçadas – aquelas classificadas oficialmente como em risco crítico, em risco ou vulneráveis – realmente se extinguirem, e se essa taxa de extinção continuar, a sexta extinção em massa poderá chegar tão cedo quanto de três a 22 séculos”, disse.

Entretanto, segundo os autores do estudo, não é tarde demais para salvar muitas das espécies em risco de modo a que o mundo não ultrapasse o ponto em retorno rumo à nova extinção em massa.

“Ainda temos muita biota da Terra para salvar. É muito importante que direcionemos recursos e legislação para a conservação de espécies se não quisermos nos tornar a espécie cuja atividade causou uma extinção em massa”, afirmou.

O artigo *Has the Earth's sixth mass extinction already arrived?* (doi:10.1038/nature09678), de Anthony Barnosky e outros, pode ser lido por assinantes da Nature em [www.nature.com](http://www.nature.com)

**Fonte:** Agência FAPESP. Publicado em 03/03/2011. Disponível em: <http://agencia.fapesp.br/13539>. Acesso 10 fev 2012.

## Síntese do Capítulo



A variação das características de um ser vivo é importante para que a seleção natural possa agir e assim as adaptações surgirem. Essas variações surgem por mutações ou variabilidade genética, sendo ou não selecionada, para gerar ou não adaptações.

Existem três tipos de seleção natural: a direcional, onde a seleção natural leva a população a favor de uma característica extrema adaptativa ao ambiente, a estabilizadora, onde a seleção natural conduz a população para uma característica intermediária adaptativa ao ambiente e a disruptiva, onde a seleção natural permite que as características extremas e simétricas se desenvolvam, podendo levar a uma variação intraespecífica, que a longo prazo pode gerar novas espécies.

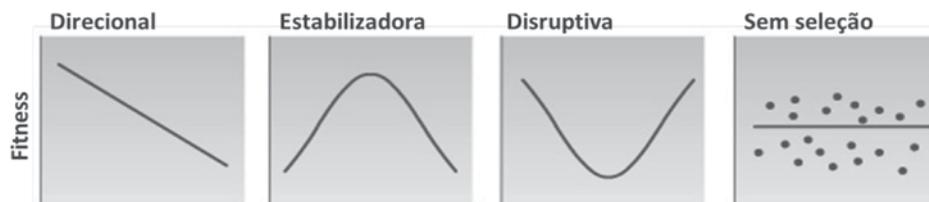
A única forma de explicar uma adaptação é através da seleção natural, a mesma que pode levar a um processo de especiação dependendo dos eventos ambientais. Para entender melhor a especiação é imprescindível conhecer os conceitos de espécie: fenética, biológica, ecológica, por reconhecimento e filogenética. O capítulo ainda aborda como se dá o processo de especiação e mostra que a alopatria é a principal explicação para a ocorrência da biodiversidade atual.

Por fim a coevolução, a irradiação adaptativa e extinção também são fenômenos que justificam a biodiversidade e precisam ser melhores estudadas para saber como esses processos alteram e/ou alteraram a quantidade de espécies do nosso planeta.

## Atividades de avaliação



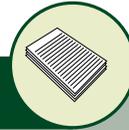
1. Pesquise e explique exemplos de seleção natural direcional, disruptiva e estabilizadora.
2. Observe a Figura abaixo:



Descreva os quatro gráficos relacionando com cada tipo de seleção.

3. Como abordar a questão da variação e adaptação em sala de aula de forma didática e interativa? Elabore um plano de aula que demonstre sua linha de pensamento sobre essa questão.
4. Crie um esquema didático para explicar a seleção sexual.
5. Monte uma apresentação com cinco slides que explique o conteúdo de especiação abordado nesse capítulo.
6. Pesquise se no seu bioma existe algum caso de coevolução e/ou coadaptação, com base científica e apresente este estudo para a sala de aula.
7. Procure na internet a lista de animais em processo de extinção. Verifique se existe algum em sua região e elabore um material didático que promova conscientização para a preservação.

## Texto complementar



### Jogo galápagos: a extinção e a irradiação de espécies na construção da diversidade biológica

Marcus Vinícius de Melo Oliveira, Walter Santos de Araújo,  
Ana Claudia de Oliveira, Thannya Nascimento Soares.

Departamento de Biologia Geral, Instituto de Ciências Biológicas Universidade Federal de Goiás, Campus Samambaia.

O ensino de genética e evolução no ensino médio tem apresentado resultados preocupantes em algumas pesquisas, sobretudo no que diz respeito à aprendizagem dos alunos. Segundo Scheid & Ferrari (2006) nem mesmo os conceitos básicos dessas disciplinas são compreendidos pelos estudantes ao final do ensino médio.

Os principais agravantes dessa realidade se refletem na dificuldade de transposição e na falta de domínio dos conteúdos (Mello, 2007; Tidon & Lewontin, 2004), e na carência de metodologias alternativas para fixação desses conceitos (Goedert, 2004). Os dois primeiros agravantes são devidos à má formação curricular dos profissionais docentes, ao passo que o último está associado ao descomprometimento com a contextualização dos conteúdos (Mello, 2007).

Os conceitos de extinção e irradiação e suas interações são muito importantes para compreensão do processo evolutivo (Ridley, 2006). Nesse contexto, para se trabalhar conteúdos de caráter exclusivamente teóricos, como os processos de extinção e irradiação de espécies, faz-se necessário o uso de metodologias alternativas para melhor compreensão e fixação por parte dos alunos (Goedert, 2004).

Os tentilhões de Darwin são os exemplos mais clássicos de como a seleção natural atua na irradiação de espécies (Mori et al., 2006). No Arquipélago de Galápagos, ao longo do tempo, uma única espécie de tentilhão deu origem às 13 conhecidas atualmente (Ridley, 2006). Inicialmente, isso se deu principalmente devido a pequenas modificações morfológicas no formato do bico dos indivíduos da espécie, formando assim várias sub-populações, cada uma pré-adaptada a explorar um determinado tipo de recurso (Mori et

al., 2006). Com o passar do tempo, surgiu o isolamento reprodutivo entre elas, culminando na irradiação da grande variedade de tentilhões que hoje ocupam Galápagos.

O caso dos tentilhões é o resultado de uma série de interações entre extinção e irradiação, que diminuem e aumentam, respectivamente, a diversidade da vida. A biodiversidade conhecida atualmente é, nesse contexto, o resultado de longos processos sucessivos de irradiação e extinção de espécies (Ridley, 2006). Desse modo, a compreensão de como esses dois processos estão caminhando paralelamente ao longo do tempo é fundamental para que os alunos entendam evolução (Ridley, 2006).

### Objetivo da atividade

Neste trabalho é utilizado um jogo de dados que tem por objetivo auxiliar no processo de ensino-aprendizagem dos conteúdos de extinção e irradiação de espécies na manutenção da diversidade biológica. A atividade é voltada para estudantes de ensino médio, mas também pode ser aplicado à graduação, uma vez que o aprofundamento teórico do assunto fica a critério do professor. O jogo tem como objetivo simular o que ocorre na natureza quando as condições ambientais e ecológicas forçam as espécies a se dispersarem na tentativa de colonizar novos habitats e nichos.

### Preparando a Atividade

A duração da atividade deve ser em torno de 30 minutos, sendo os 15 minutos iniciais para a aplicação do jogo propriamente dito, e os 15 minutos finais, para a discussão. Para jogar os alunos deverão formar grupos pequenos, de quatro a seis integrantes.

O professor deverá preparar os materiais abaixo:

- Dois dados de cores diferentes (sugerimos amarelo e vermelho);
- Duas massinhas de modelar para moldar os vulcões;
  - Imprimir todo o material, incluindo tabelas e cartas, no final da atividade em papel A4; recortar os botões numerados, cartas e tabelas e colar em papelão.
- Também é possível montar o jogo utilizando:
  - Duas cartolinas brancas de 29 cm x 38 cm;
- Sete (7) cores de canetinhas ou lápis de cor para desenhar e pintar as ilhas em cada cartolina (modelo final da atividade) sendo que a ilha grande tem 15 cm x 9 cm e as ilhas satélites, têm 5 cm x 5 cm;
- Seis (6) diferentes cores de botões, sendo quatro (4) botões numerados, de cada cor (ao final serão 24 botões para cada tabuleiro). Ex: botões azuis nº 1.

### Jogo Galápagos: Extinção e Irradiação

#### Prólogo

O jogo se dá no Arquipélago de Galápagos constituído por suas várias ilhas (Figura 1). A maior delas, a Grande Ilha, apresenta uma grande população de uma espécie de Tentilhão, enquanto as demais estão desabitadas. Essa população é constituída por indivíduos que diferem entre si quanto à morfologia do bico, podendo ser classificados em subpopulações de Tentilhões (Tentilhão 1, Tentilhão 2..., Tentilhão 6), como mostra a Figura 2. Cada forma de bico está associada a um tipo preferencial de semente das quais os Tentilhões se alimentam.

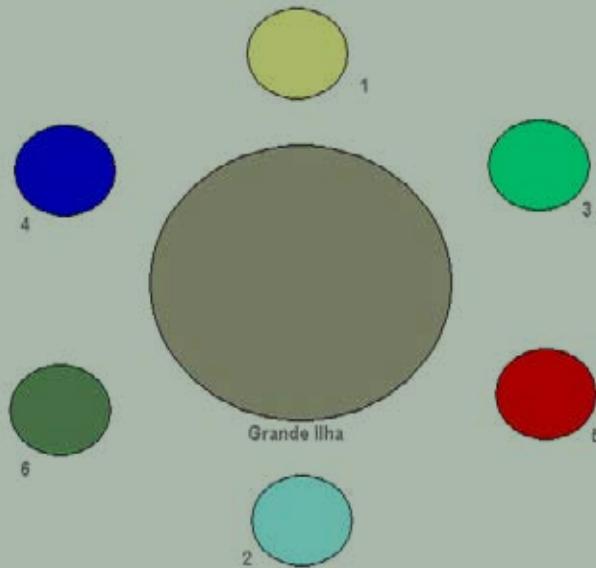


Figura 1 – Esquema geral do jogo simbolizando o Arquipélago de Galápagos.

Inicialmente os recursos alimentares disponíveis na ilha são suficientes para manter a população. Em função disto a população está aumentando e com o passar do tempo, há escassez de recursos na Grande Ilha, forçando os indivíduos a dispersarem para as outras ilhas. Cada uma das ilhas oferece um tipo de recurso diferente, de modo que cada uma das subpopulações de Tentilhões só conseguirá sobreviver na ilha que ofereça recursos que possa explorar (pré-adaptação). Por exemplo, para que o Tentilhão 1 sobreviva, ele deve dispersar para a ilha 1, uma vez que só nessa ilha ele encontrará recursos que possa explorar por possuir pré-adaptação para este local para ter sucesso e conseguir se manter.

As subpopulações em seus novos ambientes, ao longo do tempo evolutivo, formarão novas espécies (especiação alopátrica) a partir da mesma espécie de Tentilhão (ancestral comum), simulando assim o processo de irradiação adaptativa. É importante ressaltar que na Grande Ilha há um vulcão o “Gran Thannya”, que entrará em erupção em trinta rodadas, extinguindo toda a vida no local (Figura 2).



Figura 2 – Subpopulações de tentilhões representadas pelos círculos coloridos numerados.

## Objetivo do jogador

O objetivo do grupo é fazer com que as subpopulações de Tentilhões consigam colonizar, sobreviver e explorar novos recursos no máximo de ilhas possíveis, antes que o “Gran Thannya” venha a explodir.

## As peças do jogo

O jogo contém dois tabuleiros, sendo um para cada grupo. Cada tabuleiro é constituído por uma ilha principal e seis ilhas satélites (I). As populações de Tentilhões serão simbolizadas por discos coloridos numerados. No jogo haverá o dado da subpopulação (amarelo) e o dado da especiação/extinção (vermelho).

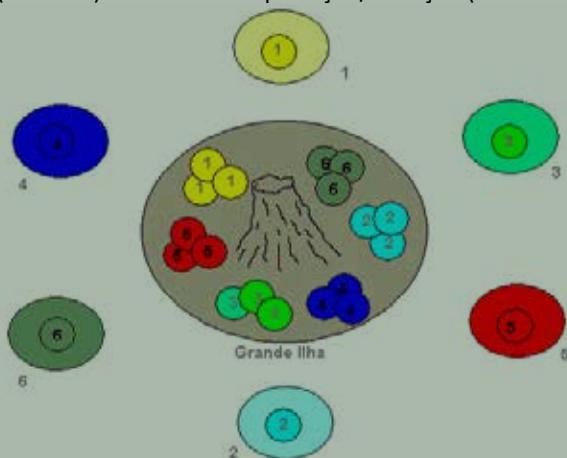


Figura 3 – Esquema mostrando a Grande Ilha com o número máximo de subpopulações que pode suportar e as demais ilhas colonizadas.

## Regras do jogo

Cada participante jogará o dado amarelo uma vez por rodada, sendo que, quando ele alcançar três vezes o número/cor de uma subpopulação, ele conseguirá o direito de jogar o dado da especiação/extinção (vermelho). Ao lançar o dado vermelho se ele conseguir número referente a sua respectiva ilha, ocorre a colonização e a consequente especiação da subpopulação na ilha (Figura 4A). Caso isso não ocorra, aquela subpopulação será levada à extinção (Figura 4B).

Os resultados de cada rodada, aumento das subpopulações, extinção e especiação, serão marcados em fichas, como ilustrado na Figura 5 (A, B e C, respectivamente). O jogo terminará ao final de trinta rodadas, quando o “Gran Thannya” explodirá, causando uma extinção em massa na Grande Ilha. Dessa forma, o vencedor do jogo será aquele que tiver formado o maior número de espécies de Tentilhão.

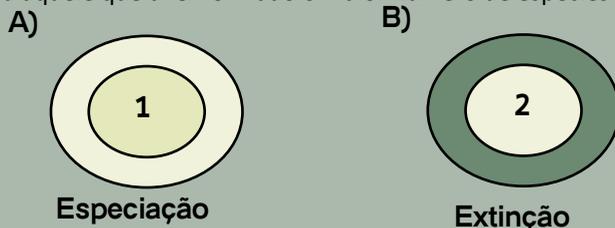


Figura 4 – O que pode ocorrer no jogo: A) subpopulação coloniza ilha à qual está pré-adaptada (mesma cor), nesse caso ocorre especiação ou B) subpopulação coloniza ilha para a qual não está pré-adaptada (cor diferente) e logo é levada à extinção.

	JOGADOR		
	TENTILHÃO 1	TENTILHÃO 2	TENTILHÃO 3
POPULAÇÃO	→ X X X	X □ □	X X X
EXTINÇÃO	XX □ □ □	□ □ □ □ □	X ← □ □ □ □ □
ESPECIAÇÃO	□	□	□
	TENTILHÃO 4	TENTILHÃO 5	TENTILHÃO 6
POPULAÇÃO	X □ □	□ □ □	X X X
EXTINÇÃO	□ □ □ □ □	□ □ □ □ □	□ □ □ □ □
ESPECIAÇÃO	□	□	X ← □

Figura 5 – Forma de preenchimento da ficha de cada jogador quando houver: A) aumento da população, B) extinção e C) especiação.

### Entendendo a Atividade

Qual o motivo que levou os tentilhões a migrarem para outras ilhas?

O que aconteceu com os tentilhões que migraram para a ilha que não continha o recurso apropriado à sua sobrevivência?

O que houve com os que migraram para a ilha certa?

Os resultados das duas cartelas são iguais? Por quê?

A partir do jogo é possível concluir quais as relações entre os processos de extinção e irradiação na manutenção da diversidade biológica?

### Respostas às questões entendendo a atividade

O aumento no tamanho das subpopulações fez com que os recursos necessários para cada uma delas se tornassem cada vez mais escassos, por consequência a competição entre os indivíduos aumentou, dificultando a sobrevivência no mesmo local. Essas “pressões” levaram os tentilhões à necessidade de buscarem novos habitats.

Cada subpopulação de tentilhão estava pré-adaptada a um determinado tipo de recurso (mesma cor). Desse modo, as subpopulações de tentilhões que migravam para ilhas que apresentavam recursos diferentes, os quais não estavam adaptados, não conseguiam se manter e eram levadas à extinção.

Os tentilhões que migraram para as ilhas certas (de mesma cor) encontraram recursos que conseguiam explorar. Tais tentilhões colonizaram essas novas ilhas e, com o passar do tempo, devido ao isolamento geográfico e reprodutivo, deram origem a uma nova espécie de tentilhão (incapaz de se reproduzir com a espécie que lhe deu origem).

Provavelmente os resultados das duas cartelas não são iguais. Como os processos de irradiação e extinção no jogo se devem ao acaso (lançamento dos dados), cada tabuleiro irá apresentar uma constituição de espécies diferentes.

Sim, a partir do jogo são possíveis algumas discussões e conclusões. Na natureza a interação entre os processos de extinção e irradiação de espécies é fundamental para a manutenção da diversidade biológica. A todo o momento, as espécies estão sofrendo pressões que forçam tentativas de mudanças (sejam elas estruturais ou comportamentais) ou selecionam variações pré-existentes. Entretanto, muitas dessas

tentativas não são bem sucedidas, levando populações daquela espécie à extinção. O jogo mostra um número de extinções maior que o de especiações (isso é devido à maior probabilidade, 5 para 1, respectivamente). Esse fato também ocorre na natureza, pois, em que durante o processo de irradiação, acaba-se perdendo um grande número de indivíduos, subpopulações ou populações inteiras. Desse modo, a biodiversidade conhecida atualmente é, nesse contexto, o resultado de longos processos sucessivos de irradiação e extinção de espécies.

### Considerações Finais

Durante as etapas de teste, o jogo se mostrou uma boa ferramenta para o ensino de irradiação e extinção. De forma lúdica e envolvente notou-se, em todas as fases do jogo, que os participantes demonstraram grande interesse e, ao final, conseguiram compreender a importância desses processos na manutenção da diversidade biológica. Desse modo, a aplicação dessa metodologia no ensino médio pode ser um bom instrumento para o ensino de evolução.

**Fonte:** OLIVEIRA, M. V. M. ; ARAUJO, W. S. ; OLIVEIRA, A. C. ; SOARES, T. N. Jogo Galápagos: a extinção e a irradiação de espécies na construção da diversidade biológica. *Genética na Escola*, v. 1, p. 49/10-57, 2008.

## Leituras, filmes e sites



### Sites

Seleção Natural: <http://djalmasantos.wordpress.com/2011/10/14/selecao-natural-sobrevivencia-dos-mais-aptos/>

Laboratório de Genética de Populações e Evolução – Universidade de São Carlos: <http://www.ufscar.br/~evolucão/>

Discussão Macro e Micromutação: <http://netnature.wordpress.com/2011/06/06/filosofia-da-cienciauma-abordagem-da-concepcao-de-micro-e-macromutacao-e-o-conceito-de-especie/>

Biologia Evolutiva – Geral: <http://biologiaevolutiva.wordpress.com/>

Conceitos de Espécie: <http://www.zoo1.ufba.br/especie.htm>

Especiação: <http://www.ib.usp.br/evolucao/inic/mapa.htm>

Jogo sobre seleção natural – on line: <http://rived.mec.gov.br/atividades/biologia/moscas/189.swf>

Hipótese da rainha vermelha: <http://www.cesumar.br/dcl/cienciasbiologicas3/arquivos/RAINHA%20VERMELHA.pdf>

### Documentários

Documentários sobre o Processo Evolutivo

<http://www.youtube.com/playlist?list=PL378ECA518870E4AB>

## Referências



- ANDERSON, U. S., Perea, E. F., Becker, D. V., Ackerman, J. M., Shapiro, J. R., Neuberg, S. L. et al., I only have eyes for you: Ovulation redirects attention (but not memory) to attractive men. **Journal of Experimental Social Psychology**, 46(5), 804–808, 2010.
- BLIEGE, B., R., & Smith, E. A.; Signaling theory, strategic interaction, and symbolic capital. **Current Anthropology**, 46, 221–248, 2005.
- CRONK, L.; The application of animal signaling theory to human phenomena: Some thoughts and clarifications. **Social Science Information**, 44, 603–620, 2005.
- CUMMINS, D. D., Dominance, status, and social hierarchies. In D. Buss (Ed.), **The evolutionary psychology handbook** (pp. 676–697). New York: Wiley, 2005.
- DE WAAL, F., **Chimpanzee Politics: Power and Sex Among Apes**. London: Jonathan Cape, 1982.
- FREEMAN, S. F.; HERRON, G. **Evolutionary analysis**. 3 ed. Upper Saddle River: Pearson Educational Inc., 2004.
- FUTUYMA, D. J. **Biologia evolutiva**. 2 ed. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética. 1992.
- \_\_\_\_\_. **Evolution**. Sunderland: Sinauer Associates Inc., 2005.
- GANGESTAD, S. W., Thornhill, R., & Garver-Apgar, C. E., Adaptations to ovulation. In D. M. Buss (Ed.), **Handbook of evolutionary psychology** (pp. 344–371). New York: Wiley, 2005.
- HYMAN, H. H., **The Psychology of Status**. New York: Columbia University, 1942.
- LENS, Inge, Karolien Driesmans, Mario Pandelaere, Kim Janssens, Would male conspicuous consumption capture the female eye? Menstrual cycle effects on women's attention to status products. **Journal of Experimental Social Psychology**, 2011.
- MILLER, G.; Spent. **Sex, Evolution, and Consumer Behavior**. New York: Viking Penguin; 2009.
- NELISSEN, Rob M.A., Marijn H.C. Meijers, **Social benefits of luxury brands as costly signals of wealth and status**, *Evolution and Human Behavior*, 32, 343–355, 2011.
- PENA, S. D. **Anemia falciforme: uma doença geográfica**. 2008. [Consult. 2011-09-11]. Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/derivagenetica/anemia-falciforme-uma-doenca-geografica>
- RIDLEY, M. **Evolução**. 3 ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2006.
- SAAD, G.; **The Evolutionary Bases of Consumption**. Mahwah, NJ: Erlbaum; 2007.

**Capítulo**

**4**

**Ensino de Evolução**



## Objetivos

- Mostrar as dificuldades e facilidades para ensinar evolução.
- Expor como a biologia evolutiva é tratada nos livros didáticos.
- Sugerir maneiras de se abordar a biologia evolutiva em sala de aula.
- Indicar leituras e pesquisas sobre ensino de biologia evolutiva.

## 1. Aspectos gerais

Na sala de aula o professor de biologia terá que possuir conhecimentos sobre o processo evolutivo, mas a exposição e explicação deste conteúdo para alunos de ensino médio devem ser tratados com muito cuidado, pois nesta área do conhecimento são abordados assuntos relativos à origem da vida e sua diversificação.

A sociedade atual é composta por muitas pessoas que possuem a ideia de que os seres vivos foram criados e permanecem da mesma forma durante toda a sua existência, além disso, as ideias que corroboram com isso são baseadas em fundamentos que não são científicos e, portanto, estão em outro campo de discussão, pois o evolucionismo e criacionismo possuem bases argumentativas opostas, logo a discussão é inócua.

O que os biólogos precisam ter em mente é que o processo evolutivo é fato, que existe uma série de dados científicos que demonstram e comprovam essa teoria e que ao ensinar esse conteúdo o professor deixe claro que ele está expondo o que se sabe sobre o processo evolutivo.

A escolha no que acreditar não pode ser uma imposição do professor, cabe a ele dar as ferramentas para que o aluno possa escolher em que acreditar. É função do professor de biologia mostrar a importância do processo evolutivo para um melhor entendimento da biologia como um todo, caso contrário o aluno só enxergará um conjunto de retalhos de conhecimento sem nada conferir uma lógica explicativa, logo a biologia será uma matéria onde o aluno apenas memorizará, reforçando positivamente a ideia de matéria decorativa.

Além disso, dentro dos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio existe um tema estruturador chamado origem da vida e evolução e no mesmo documento é comentado alguns temas considerados relevantes para o ensino dentro desse assunto. Nas orientações curriculares nacionais para ciências da natureza, matemática e suas tecnologias, a biologia evolutiva é tratada com bastante distinção:

Um tema de importância central no ensino de Biologia é a origem e evolução da vida. Conceitos relativos a esse assunto são tão importantes que devem compor não apenas um bloco de conteúdos tratados em algumas aulas, mas constituir uma linha orientadora das discussões de todos os outros temas. O tema 6 dos PCN+ – origem e evolução da vida – contempla especificamente esse assunto, mas é importante assinalar que esse tema deve ser focado dentro de outros conteúdos, como a diversidade biológica ou o estudo sobre a identidade e a classificação dos seres vivos, por exemplo. A presença do tema origem e evolução da vida ao longo de diferentes conteúdos não representa a diluição do tema evolução, mas sim a sua articulação com outros assuntos, como elemento central e unificador no estudo da Biologia (BRASIL, 2002).

Percebe-se então, que os documentos oficiais da união para a educação, demonstram a importância da teoria da evolução como um fundamento essencial para o entendimento da biologia como um todo. Você como professor pode utilizar dos diversos recursos didáticos disponíveis em sua escola e na sua região para ensinar a biologia evolutiva de modo a fazer o aluno perceber que na biologia tudo deve ser visto com a perspectiva da evolução.

## 2. O ensino de evolução

A biologia evolutiva deve ser transmitida ao longo do ensino básico, fazendo com este conhecimento possa servir de reflexão e até mesmo para formação do cidadão mais consciente e ativo na sociedade. Existe um documento chamado Evolução, Ciência e Sociedade (Douglas Futuyma) que aborda a capacidade do conhecimento evolutivo poder melhorar a sociedade atual.

No Brasil ensino de evolução é considerado precário, principalmente no ensino médio. A má formação dos professores nesse assunto, bem como a distribuição deste conteúdo no final do segundo semestre do ano letivo nas escolas, fazem com que os assuntos sejam abordados de forma rápida e muitas vezes nem abordados são, logo o aluno sai prejudicado.

Nos Estados Unidos ocorre uma situação onde o criacionismo é ensinado em algumas instituições, contrapondo a ideia de mudança dos seres vivos ao longo do tempo proposta pela biologia evolutiva. No Brasil o Ministério da Educação (MEC) já se posicionou sobre essa questão dizendo que não é permitido ensino do criacionismo nas escolas.

Segundo pesquisas realizadas por professores brasileiros a dificuldade de ensino de evolução se deve à forma que esse assunto é tratado nos livros didáticos, que é um material muito utilizado como fonte de pesquisa pelos alunos, pois a evolução não é tratada como tema unificador da biologia, isto é, os livros tratam de evolução somente em capítulos específicos.

Uma pesquisa feita pelos professores Rosana Tidon e Richard C. Lewontin publicada em um artigo, chamado Ensinando biologia evolutiva, mostrou que

existem muitos professores com noções erradas do conceito evolutivo, entendendo que a evolução é direcional, algo parecido com Lamarckismo, além disso, esses professores entendem que esse processo ocorre em nível de indivíduo e não de população. Esses resultados são preocupantes, visto que este conhecimento errado está sendo transmitido para crianças e adolescentes do nosso país.

O pesquisador Lawrence Lerner fez uma coleta de dados em muitos estados americanos sobre o ensino de evolução. Ele percebeu que o ensino de noções de variação dos seres vivos, herança e idade do planeta para crianças tornavam-nas mais capazes de entender o processo evolutivo no ensino médio e superior. Observando essa pesquisa, seria interessante se fosse inserido esses conteúdos no ensino fundamental (1ª a 4ª série), melhorando o aprendizado deste conteúdo no restante do ensino fundamental e médio.

A falta de contextualização e capacitação do professor tem sido um dos principais problemas no ensino médio para o entendimento da teoria da evolução. Apesar dos PCN+ e das orientações curriculares nacionais deixarem bem claro a importância do ensino de evolução, a prática não tem sido visualizada.

### 3. Os livros didáticos e os conteúdos de biologia evolutiva

O conteúdo sobre evolução começou a ser abordado em livros didáticos nos anos 30 do século passado, geralmente no capítulo destinado a paleontologia e com ausência da dicotomia entre as ideias de Lamarck e Darwin.

Nos anos 60 com o surgimento do livro do sistema BSCS – versão azul (*Biological Sciences Curriculum Study*) a evolução começou a ser melhor abordada e pela primeira vez surgiu a dicotomia entre Lamarck e Darwin, baseado no exemplo do pescoço da girafa. Esse sistema de ensino considerava que o aprendizado se dava melhor com aulas práticas e experimentais.

Ao longo do tempo os livros foram incorporando algumas informações do avanço da ciência, porém o que se observa hoje é que falta uma contextualização histórica do surgimento das ideias evolucionistas, o conteúdo fica muito restrito a oposição de ideias entre Lamarck e Darwin, a viagem no *Beagle* e a demora da publicação do livro “A origem das espécies”.

Pesquisas apontam que devido a essas características dos livros didáticos o pensamento dos alunos sobre a evolução é Lamarckista, porém, talvez isso não seja a única explicação. Os alunos aceitam bem a evolução, contudo não sabem como se dá o processo e quando se pede para explicar citam exemplos que incluem o uso e desuso, herança dos caracteres adquiridos e intencionalidade das adaptações.

Nesse momento é que deve entrar o professor para tentar realizar a transposição didática, que também é problemática, pois esse assunto sofre obstáculos epistemológicos de cunho ideológico, filosófico e teológico e isso torna a abordagem do conteúdo difícil tanto para o aluno quanto para o professor.

O governo brasileiro possui um programa nacional do livro didático (PNLD e PNLEM) que constantemente avalia os livros de ciências e biologia, isso tem tornado os livros nacionais cada vez melhores na abordagem da biologia evolutiva, embora, ocorram falhas como as citadas anteriormente, como a falta de uma boa contextualização histórica, falta de uma discussão epistemológica adequada para a construção do conhecimento, falha na abordagem e explicação sobre o neodarwinismo e os conflitos conceituais nessa área.



### Saiba mais

Epistemologia ou teoria do conhecimento é a crítica, estudo ou tratado do conhecimento da ciência, ou ainda, o estudo filosófico da origem, natureza e limites do conhecimento. Pode-se remeter a origem da “epistemologia” a Platão ao tratar o conhecimento como “crença verdadeira e justificada”. O desafio da “epistemologia” é responder “o que é” e “como” alcançamos o conhecimento? Diante dessas questões da epistemologia surgem duas posições: empirista: que diz que o conhecimento deve ser baseado na experiência, ou seja, no que for apreendido pelos sentidos. Como defensores desta posição, temos: Locke, Berkeley e Hume; e racionalista: que prega que as fontes do conhecimento se encontram na razão, e não na experiência. Como defensores desta posição, temos: Leibniz e Descartes.

A expressão “epistemologia” deriva das palavras gregas “episteme”, que significa “ciência”, e “Logia” que significa “estudo”, podendo ser definida em sua etimologia como “o estudo da ciência”.



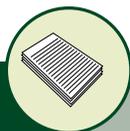
### Síntese do Capítulo

Este capítulo iniciou abordando os aspectos gerais sobre o ensino de evolução, mostrando as dificuldades e sugerindo maneiras de se abordar tal assunto. O professor deve abordar o conteúdo sem preconceito e com a determinação e convicção de que se trata de um assunto científico e comprovado.

Pesquisas no Brasil e nos Estados Unidos mostram o comportamento dos alunos em relação a teoria da evolução, há uma tendência para o Lamarckismo, em parte por conta do estilo de abordagem dos livros e dos professores.

Alguns autores consideram importante a abordagem desse conteúdo já nas primeiras séries do ensino fundamental. Por fim, os livros didáticos que abordam esse assunto estão a cada ano melhorando, porém ainda precisam aperfeiçoar a contextualização histórica, explicando melhor as ideias de Darwin e Lamarck e mostrando o surgimento do neodarwinismo.

## Texto complementar



### Desafios do ensino de biologia evolutiva no Brasil

Rubens Pazza e Karine Frehner Kavalco

#### Resumo

Embora Darwin seja sempre lembrado como o pai da teoria evolutiva, a compreensão da evolução biológica como origem e manutenção da biodiversidade no planeta nem sempre é verificada na população em geral. Vários são os fatores que podem estar relacionados com a incompreensão da teoria evolutiva, dentre eles destaca-se a questão religiosa. Embora também frequentes, mas nem sempre dissociados deste fator principal, pode-se também destacar o despreparo dos professores de ensino médio, a escassez de material didático-pedagógico e a propagação de conceitos errôneos sobre evolução. Neste artigo, buscamos abordar estes temas levantando sugestões de como minimizar os problemas da aceitação do público e também na reparação de conceitos errôneos frequentemente difundidos.

#### Introdução

A Evolução Biológica (ou a herança com modificações) (Darwin, 1859) é uma ideia bastante popular e intuitiva, e embora seja corroborada enfaticamente a cada nova publicação científica, entre o público geral é ainda pouco aceita como Lei Natural. É perfeitamente possível que todas as pessoas com o mínimo grau de instrução já tenham ouvido falar em Darwin, o “pai” da Teoria da Evolução. No entanto, a Teoria Evolutiva é possivelmente uma das leis naturais mais mal conhecidas pelo grande público, o que a torna peculiarmente fadada a incompreensões, desentendimentos e à disseminação de conceitos errôneos.

Não há nenhuma teoria científica, na concepção de ciência moderna, que seja concorrente da evolução biológica para a explicação do surgimento, manutenção e mudança da biodiversidade. É fato que os mecanismos e processos pelos quais os organismos vivos evoluem são objetos de muitos debates, conforme o avanço do conhecimento científico e tecnológico das diversas áreas biológicas permite estudos mais aprofundados. Aliás, esta é uma característica intrínseca do método científico. O acúmulo de quase 150 anos de estudos pós-Darwin apenas adiciona ao esqueleto original da teoria os exemplos e mecanismos da evolução das espécies, reforçando a famosa frase de Theodosius Dobzhansky (1973): “nada em biologia faz sentido exceto à luz da evolução”.

Como, então, uma Teoria ou Lei Científica tão unificadora e comprovadamente eficaz como a Evolutiva pôde enfrentar os problemas de aceitação amplamente divulgados pela mídia norte-americana ou ter sido considerada equivalente a mitos religiosos ou filosofias, as quais não passaram pelo crivo científico que certificou as ideias de Darwin e seus seguidores como Ciência?

Dois razões fundamentais podem ser levantadas para responder a esta indagação. A primeira tem um cunho pessoal, no sentido em que a reflexão sobre os pontos apresentados na Teoria da Evolução remete às questões mais íntimas do ser humano, sua fé e crenças, pois levanta explicações alternativas naturais para muitas perguntas fundamentais. Em muitos casos, tais questões de foro íntimo impedem a compreensão e aceitação dos princípios da biologia evolutiva, contribuindo de forma direta ou indireta para a manutenção e dispersão de conceitos errôneos sobre a evolução, a ponto de ser possível a identificação de críticas baseadas unicamente em espantalhos do que se acredita que seja evolução.

A segunda hipótese que pode ser levantada para explicar a resistência das ideias evolutivas como Lei Científica para público geral e que talvez seja indiretamente influenciada pela primeira (uma vez que a força da palavra de autoridades religiosas torna complicada a tarefa de professores e cientistas de ensinar e divulgar a evolução biológica), é a de que os conceitos evolutivos não seriam corretamente absorvidos pelos alunos, uma vez que estes carregam uma bagagem variada de erros conceituais dos mais diversos tipos, tornando um desafio para os educadores e divulgadores científicos brasileiros o ensino desta ciência.

Neste artigo, são levantados alguns pontos básicos acerca da problemática na aceitação e compreensão da teoria evolutiva pela população em geral, bem como os desafios dos educadores e divulgadores científicos brasileiros nesta questão.

### Evolução x religião

Desde os tempos de Darwin até hoje, as maiores críticas à evolução estão associadas a grupos religiosos. Dentre estes, no ocidente destacam-se os grupos de origem abraâmica. O desentendimento acontece uma vez que, segundo os escritos sagrados dos cristãos, Deus teria criado todas as espécies exatamente como são hoje. A crença na intervenção de uma entidade superior na criação de tudo é chamada de criacionismo. No entanto, distintos grupos cristãos diferem em relação ao grau de aceitação da teoria evolutiva, que vai desde os literalistas bíblicos da Terra Jovem (que não aceitam as datações geológicas da idade da Terra, uma vez que a soma das idades dos patriarcas bíblicos fornece uma origem para o homem e para o universo criado por Deus há pouco mais de 6 mil anos), da Terra Antiga (que aceitam as idades da Terra e do Universo determinadas pela ciência) e outros tipos de criacionismos assumidamente cristãos, até o movimento neocriacionista do Desenho Inteligente (DI) (Scott, 1997).

Diferentemente de outras partes do mundo, especialmente os Estados Unidos da América, no Brasil nenhum destes movimentos é consideravelmente expressivo. Não há pressões para o ensino de criacionismo nas aulas de ciências como alternativa à evolução, exceto no Estado do Rio de Janeiro onde recentemente isto foi sugerido. Uma vez que o criacionismo não é ciência (nenhuma de suas vertentes), é evidente que não perder um tempo precioso de aulas de ciências com este assunto não é cabível. Tidon e Lewontin (2004) observaram que o tempo disponível para aulas de evolução no ensino médio é muito escasso, principalmente se considerarmos o papel importante da evolução conforme determinado, inclusive, pelo Ministério da Educação e Cultura (PCN Ensino Médio, 2002). O conhecimento científico cresce vertiginosamente, de modo a ser impossível acompanhar todas as mudanças nas salas de aula, ou teríamos que passar um tempo consideravelmente maior nos bancos da escola. Ou seja, não há motivo algum para perder tempo das aulas de ciências ensinando não-ciência ou pseudociência. Uma analogia interessante seria estudarmos os acontecimentos do livro “O Senhor dos Anéis”, da autoria de J. R. R. Tolkien, nas aulas de História. A diferença básica é que não há nenhum grupo organizado que acredite, e tente fazer acreditar, que os acontecimentos narrados por Tolkien são reais.

Um outro ponto a ser considerado é que criacionismo deveria ser ensinado? Inúmeros povos têm seus mitos de criação (Sproul, 1979; Leerning; Leerning, 1994; Bishop, 1998). O que tornaria um mais verídico que o outro, uma vez que adeptos de cada um destes mitos possuem provas de foro íntimo incontestáveis? Talvez o criacionismo que devesse ser ensinado é o mais amplamente difundido no Brasil, o criacionismo baseado na bíblia cristã. Entretanto, como vimos, não há consenso entre os criacionistas cristãos e, conseqüentemente, não é possível se determinar qual o criacionismo que se deve ser ensinado – Terra Jovem, Terra Antiga, Desenho Inteligente? Ainda, será que o espaço

das aulas de ciências é o ideal para este tipo de abordagem? Não seria mais interessante que houvesse disciplinas mais inclusivas e reflexíveis para tal fim? Ou ainda, a educação familiar e religiosa não é suficiente para a transmissão destas tradições?

Uma das principais dificuldades na compreensão e aceitação da evolução, sem dúvida alguma, está relacionada com as doutrinas religiosas. Podemos conjecturar que o homem pergunta sobre suas origens e busca explicações para os fenômenos naturais desde muito tempo. Tal aspecto é demonstrado através de inúmeros mitos de criação criados e disseminados por diferentes povos (Sproul, 1979; Leaning; Leaning, 1994; Bishop, 1998; entre outros). Os judeus também disseminavam seus mitos, deixando registrado em escritos que hoje compõem parte da Tora judaica e da Bíblia cristã, no livro do Gênesis. Estes escritos, no entanto, fornecem subsídios para diferentes interpretações por parte dos teólogos, o que permite a aceitação gradual da teoria evolutiva, de acordo com tais interpretações (para uma revisão, ver Scott, 1997).

Embora o número de católicos tenha caído bastante de acordo com o último censo nacional, o número destes no Brasil é bastante superior ao de seguidores de outras religiões (IBGE, 2000). Scott (1997) afirma que a visão do evolucionismo teísta (no qual a evolução acontece, mas tudo foi criado e direcionado com intervenção divina) é a posição oficial da Igreja Católica e também vem sendo ensinada em seminários protestantes. Esta posição foi reiterada pelo papa João Paulo II em 1996. No entanto, até que ponto Deus intervém nos processos evolutivos permanece um ponto polêmico, e muitas vezes limitante na compreensão da evolução. O posicionamento materialista dos processos evolutivos que muitos cientistas – como Richard Dawkins (1987) e William Provine (1988) – tomam, no entanto, reforça o coro dos literalistas de que alguém não pode ser cristão e evolucionista ao mesmo tempo.

Uma vez que o comprometimento maior dos educadores é com o público em geral, em especial com crianças e jovens, boa parte desta discussão se torna conversa de bastidores. Na prática, o educador irá se deparar com uma grande maioria que aceita o deus cristão como criador do mundo natural, embora nem todos admitam a história de Adão e Eva como verdade literal. Muitas destas crianças/adolescentes participam ou já participaram de escolas dominicais religiosas onde tais ensinamentos são reforçados. Ou seja, além do ensinamento tradicional, doméstico, passado pela família, também há a palavra da autoridade religiosa, muitas vezes considerada inequívoca por ser inspirada por Deus. Como agir nesta situação? Temos, então, o primeiro desafio encontrado no ensino de evolução: romper a barreira religiosa. Este é um dos desafios mais complicados, pois alguns outros citados posteriormente são decorrentes dele.

Nos Estados Unidos da América há uma luta histórica em tribunais no que se refere ao ensino de evolução. Em alguns Estados, onde há uma população considerável de evangélicos protestantes, os professores são proibidos de falar “evolução” e os livros-texto são obrigados a exibir uma advertência de que evolução é “apenas” uma teoria, tendo os professores que lecionar criacionismo como alternativa científica à evolução. Em outros, os tribunais não consideram criacionismo como ciência e assim, não é alternativa à evolução e não deve ser ensinado em aulas de ciências (Scott, 1997). Uma alternativa para os criacionistas é fazer tudo que for possível para tornar o criacionismo uma ciência, angariando contribuições de cientistas como argumentos de autoridade e criando o “criacionismo científico”, do qual ainda aguarda-se produção que utilize o método científico e o princípio científico da parcimônia. O método mais recente de travestir o criacionismo de ciência tem sido a releitura do argumento de William Paley (1803), de que Deus é provado pela sua obra, onde ele argumenta que se encontrássemos um relógio em um deserto teríamos a certeza de que aquele relógio só poderia ter sido construído pelas mãos de um relojoeiro. Este argumento teleológico, no entanto, já havia sido fortemente rebatido por Hume (1779). Nesta releitura, chamada de Desenho

Inteligente (DI), cientistas criacionistas dão peso à ideia de que a complexidade de vida encontrada na Terra pode apenas ser explicada pela intervenção de um projetista inteligente. A maioria dos adeptos do DI argumenta que este não é um movimento religioso, mas científico, que é suficiente para servir de alternativa à evolução, embora a ideia tenha sido bastante agradável aos olhos de religiosos (especialmente evangélicos protestantes) que viram no “arquiteto inteligente” a figura exata de seu deus, dando nova roupagem científica ao criacionismo. No entanto, tal movimento não é reconhecido como ciência, pelo meio acadêmico. Curiosamente também não é aceito como ciência pela Igreja Católica, que alega que ensinar o DI ao lado da teoria evolutiva apenas gera confusão (Winfield, 2005; CBS News, 2006). Por não ser reconhecida como ciência, os criacionistas encontraram uma brecha tentando ensinar este neocriacionismo em aulas de filosofia (Barbassa, 2006).

No Brasil os movimentos anti-evolucionistas ainda são fracos. Não temos impedimento legal de ensino religioso em escolas, embora a liberdade de expressão as torne facultativas. Constitucionalmente, o Estado brasileiro é laico. Todavia, no Estado do Rio de Janeiro recentemente foi cogitado o ensino do criacionismo bíblico em aulas de ciências, como alternativa à evolução, por parte de uma governadora assumidamente evangélica protestante. Esta vertente cristã tem aumentado o número de seguidores no Brasil nos últimos anos (IBGE, 2000). Neste conjunto de denominações religiosas encontramos os principais anti-evolucionistas brasileiros. Por sua vez, o movimento do DI no Brasil ainda é superficial, embora várias tentativas de impor tais ideias tenham sido efetuadas no Jornal da Ciência – E-mail, publicação da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência – SBPC.

Com o crescimento do número de evangélicos, especialmente os literalistas, o panorama de uma sala de aula torna-se bastante complicado. O professor deve estar preparado para não entrar em choque com os alunos, o que poderia fechá-los definitivamente para o ensino da teoria evolutiva. Também precisa estar muito preparado didaticamente, para conseguir explicar evolução de maneira clara, objetiva e de fácil entendimento.

### Desafio didático-pedagógico

Um professor bem preparado pode encontrar dificuldades ao lecionar evolução a uma turma eclética. Não chocar a evolução com a fé do aluno certamente é o caminho mais adequado. Embora não haja evidências que demonstrem intervenção sobrenatural nos processos evolutivos, tal visão dependerá da necessidade ou tradição cultural de cada aluno e embora o professor possa (e deva) fazê-los raciocinar sobre o assunto, a conclusão deve ser do próprio aluno. Ao professor bem preparado cabe explicar o assunto de modo concreto, claro e palpável, evitando o que é mais comum quando o assunto é evolução – os erros conceituais.

Tidon e Lewontin (2004) demonstram que é possível perceber que infelizmente um dos grandes problemas do ensino de Evolução está no preparo dos professores. Embora os professores afirmem que as teorias de Darwin e Lamarck de mudança nos organismos vivos seja um conteúdo fácil de lecionar, os mesmo professores responderam outras questões demonstrando claro pensamento Lamarckista (Tidon e Lewontin, 2004).

Um dos prováveis motivos pelo qual os próprios professores apresentam defasagem no conhecimento é, mais uma vez, a religião. Como qualquer outra pessoa, durante sua formação o professor possui sua própria crença, que pode interferir na sua compreensão dos processos evolutivos, mesmo em classes do ensino superior. Embora novamente haja uma distribuição gradual no nível de interferência da religião no aprendizado do professor e na sua aceitação dos processos evolutivos, crenças mais literalistas podem

interferir diretamente no aprendizado de tais processos, bem como na maneira pela qual o professor irá ensinar o pensamento evolutivo. Embora os professores de um modo geral possam ter acesso à bibliografia adequada em suas universidades, é possível encontrar artigos em sítios criacionistas onde não apenas as ideias evolutivas, mas também diversos outros conceitos amplamente evidenciados são distorcidos e oferecidos aos leitores como fatos científicos (de Paula, 1999). De acordo com Rutledge e Mitchell (2002), a aceitação ou rejeição da teoria evolutiva como explicação científica válida pode influenciar na compreensão dos estudantes acerca desta poderosa ideia.

Além da questão religiosa, o desafio na formação de bons professores está no material didático de nível superior. Poucas são as opções em língua portuguesa. Até pouco tempo o livro mais recente era a tradução da segunda edição de “Evolutionary Biology” (Futuyma, 1986), de 1997, quando a versão original já estava próxima do lançamento da terceira edição. Mais recentemente, a tradução da primeira edição do livro “Evolution” de Stearns e Hoekstra (2000) e “Evolution” de Ridley (2004) foram publicadas. Infelizmente o tempo necessário até que tais livros cheguem às bibliotecas de universidades pode ainda comprometer os estudos. A literatura internacional é rica em livros de divulgação científica, onde bons exemplos de argumentação e estudos de caso são apresentados, alguns deles com versões em português (Dawkins, 1998, 2001a e b; Gould, 1999; Zimmer, 1999; entre outros). Embora a disponibilidade de versões traduzidas para o português seja relativamente satisfatória, o preço dos livros tende a afastar os leitores, pois custam de 10 a 20% do salário mínimo vigente. No entanto, livros-texto per si não fabricam um bom professor de evolução.

Por sua vez, os livros didáticos de ensino médio disponíveis tiveram um aumento significativo na qualidade (Bizzo, 2000) e uma avaliação está sendo realizada pelo nosso grupo neste momento. Esta pesquisa certamente auxiliará na compreensão dos conceitos errôneos afirmados por alunos recém-ingressos no nível universitário, em relação a questões de biologia evolutiva (Pazza et al., 2010).

### Os meios de divulgação científica e o ensino de evolução

Além dos livros didáticos e de divulgação científica, é possível se obter informações sobre evolução através da mídia escrita (cadernos de ciência em jornais, revistas especializadas em divulgação científica) ou ainda através de sítios na world wide web. Em relação à mídia escrita, pode-se observar que os autores dos textos em revistas e jornais são na sua grande maioria jornalistas ou free-lancers e, em pequena extensão, por cientistas envolvidos diretamente nas pesquisas. Neste tipo de mídia podemos encontrar excelentes textos de divulgação científica em evolução (Villareal, 2005; Wong, 2005; entre outros), assim como imensos absurdos onde os equívocos e más interpretações transparecem (Pazza, 2005). Comentamos anteriormente que a formação de bons professores é crucial no ensino claro e adequado da evolução. Certamente podemos esperar que um biólogo seja formado com sólidas bases sobre o pensamento evolutivo, uma vez que cursou pelo menos uma disciplina sobre o assunto. Mas e o que dizer de jornalistas? Não se pode exigir infalibilidade, mas haverá meios de minimizar as falhas? Uma das alternativas seria oferecer cursos de ciências para os jornalistas. Outra seria que a comunidade científica estivesse mais engajada em divulgação científica de qualidade. Transpor a barreira entre o mundo acadêmico e o popular com certeza não é uma tarefa das mais simples, e não será bem desempenhada por todos os profissionais. No entanto, textos publicados, mesmo que por jornalistas, onde equívocos são enaltecidos, servem como matéria prima para que os manipuladores de opinião pública fixem suas ideias falaciosas (Pazza, 2005).

Ao contrário de empresas de informação, que seguem políticas editoriais mais ou

menos rigorosas, sítios independentes na internet aceitam qualquer texto, havendo menor (ou inexistente) crivo na análise. O mais agravante é o ritmo acelerado com o qual os estudantes estão trocando livros por sítios na internet, onde uma pesquisa pode ser elaborada na base de alguns cliques e o famoso “copy&paste” (copiar e colar). Além da contribuição para o conhecimento do aluno ser questionável nesta situação, não há meios de impedir que os grandes sistemas de busca utilizados, como o Google, retorne quantidade considerável de sítios com pouca ou nenhuma qualidade educacional na área. É muito fácil, por exemplo, encontrar sítios anti-evolucionistas com textos assinados por doutores formados por grandes universidades brasileiras, que embora criem espantalhos, são altamente atraentes para pessoas pouco informadas, disseminando, assim, conceitos errôneos e falaciosos (de Paula, 1999).

Há também, evidentemente, sítios que contém informações coerentes. De um aspecto prático, a Internet tem se mostrado uma ferramenta de fácil utilização e de grande acesso, e este motivo deveria incentivar os educadores e divulgadores de ciência a utilizá-la para a construção de bases de dados confiáveis para os professores e alunos. O empenho da comunidade acadêmica na tentativa de explicar e simplificar os dados científicos pode ser um fator decisivo no incremento da qualidade da informação fornecida pela rede.

Assim, o educador precisa estar muito atento para conseguir direcionar o aluno a bons materiais sobre o assunto, e deve estar bem preparado para reconhecer os deslizes e embustes amplamente difundidos.

### Conclusão

O ensino e aprendizagem de evolução biológica é uma preocupação crescente para a comunidade acadêmica mundial nas últimas décadas. Alters e Nelson (2002) citam alguns eventos representativos deste crescimento como a convocação da Conferência de Educação e Pesquisa em Evolução, o estabelecimento de um comitê educacional na Sociedade para o Estudo da Evolução, entre outros. No entanto, tais atos são exclusivos da academia científica norte-americana, talvez pela crescente problemática envolvendo o ensino de evolução naquele país. O Brasil ainda não possui uma sociedade científica de estudos evolutivos, tampouco um comitê dentro de outra sociedade científica qualquer que esteja engajado no estudo das questões relacionadas com o ensino de evolução. Por sua vez, os movimentos criacionistas, embora ainda inexpressivos, estão cada vez mais presentes nas universidades brasileiras, e tendem a uma organização, por espelharem-se no modelo norte-americano.

Embora a biologia evolutiva seja um eixo norteador, juntamente com a ecologia, como sugerem os Parâmetros Nacionais do Ensino Médio, a dificuldade encontrada pelos professores no ensino desta ciência é maior do que o esperado. No entanto, os professores são determinadores da qualidade de uma disciplina, sendo necessário que professores de biologia tenham um conhecimento adequado da teoria evolutiva e seu papel fundamental na biologia. Este tipo de conhecimento nem sempre é obtido apenas em aulas de evolução no ensino superior. Textos de divulgação científica também fornecem um suporte importante para a formação do profissional em educação. Rutledge e Mitchell (2002) sugerem ainda que os professores precisam estar conscientes de como o conhecimento científico é produzido. Em seus estudos, estes autores observaram ainda, que o nível de conhecimento do professor acerca da biologia evolutiva, através de mapas de conceitos, estava intimamente relacionado com sua aceitação da teoria evolutiva. É possível que a dificuldade de aprendizagem dos alunos, portanto, não esteja somente no grau de dificuldade de compreensão dos processos evolutivos, mas na relutância em aceitar a teoria evolutiva como uma teoria científica válida para explicar os fenômenos naturais e nossa biodiversidade,

por exemplo. Em muitos casos, a palavra “teoria” é utilizada pelos anti-evolucionistas como uma forma de minimizar o efeito da compreensão da evolução biológica, atribuindo à palavra “teoria” um significado pejorativo e graus de hierarquia inexistentes na filosofia da ciência para o que é uma teoria ou um fato científico. Aos ouvidos leigos, a explicação soa razoável: “a evolução é só uma teoria”. Assim, não há motivos para dar mais crédito a ela. Por isso, se faz necessário que aulas de ciências no ensino médio, especialmente, sejam iniciadas com a explicação do método científico, formulação de hipóteses, testes de hipóteses e falseabilidade da teoria científica, além da equivalência de termos como teoria e lei. Talvez ainda fosse interessante se pensar em uma disciplina de Iniciação Científica, onde os alunos teriam um contato maior com a filosofia da ciência e como o conhecimento científico é produzido.

Um outro ponto importante para que o professor consiga ensinar evolução de maneira eficiente, é demonstrar para o aluno que a evolução é mais do que uma teoria que explica a biodiversidade e que seus efeitos são observados na agricultura, saúde e sociedade (Futuyma, 2002). A imensa preocupação atual de conservação da biodiversidade também tem como pano de fundo o estudo evolutivo. Avise (2003) espera que num futuro onde os humanos busquem o desenvolvimento sustentável, a biologia evolutiva, genética e ecologia possam apontar para uma nova ética ambiental.

Acima de tudo, observamos perplexos – e felizmente à distância – o que a intolerância religiosa é capaz de fazer. Tendo em vista nossa diversidade cultural, a intolerância religiosa deve ser fortemente combatida. Desta forma, os educadores em evolução não podem travar embates contra a opção religiosa de seus alunos, mas sim, buscar uma maior aceitação da teoria evolutiva como forma de explicar a história natural dos organismos vivos à luz do processo científico. Um dos maiores evolucionistas da história escreveu certa vez: “Eu sou criacionista e evolucionista. A evolução é o método no qual Deus, ou a natureza, cria” (Dobzhansky, 1973). Aceitar a teoria evolutiva é o primeiro passo para compreender seu papel na história natural dos organismos vivos.

FONTE: PAZZA, R.; KAVALCO, K. F. **Desafios do ensino de biologia evolutiva no Brasil**. Disponível em: <http://darwin.bio.br/dnacetico/?p=133>. Acesso em 03/05/2012

## Atividades de avaliação



1. Encontre no livro didático utilizado durante o estágio que realiza, 2 conceitos duvidosos e corrija-os.
2. Leia o artigo do Texto Complementar e aponte fatores que interferem no processo de ensino aprendizagem da biologia evolutiva.
3. Qual o seu posicionamento sobre o ensino de biologia evolutiva no início do ensino fundamental?
4. Veja a entrevista com a Profa. Rosana Tidon (indicada na seção Leituras, filmes e sites) e aponte 5 pontos importantes da entrevista.
5. Prepare uma apresentação de 15 minutos sobre a origem da vida e apresente para sua turma. Após a apresentação escreva suas principais dificuldades e exponha as possíveis soluções.

## Leituras, filmes e sites



### Livros

DAWKINS, R. **O gene egoísta**. 1 ed. São Paulo: Companhia das Letras. 2007.

SASSON A. **Cultura científica**: um direito de todos. Brasília: UNESCO, 2003. 172p. Disponível em: [http://www.livrosgratis.com.br/arquivos\\_livros/ue000053.pdf](http://www.livrosgratis.com.br/arquivos_livros/ue000053.pdf)

SOUSSAN G. Como ensinar as ciências experimentais? Didática e formação. Brasília: UNESCO, 2003, 154p. Disponível em: [http://www.livrosgratis.com.br/arquivos\\_livros/ue000052.pdf](http://www.livrosgratis.com.br/arquivos_livros/ue000052.pdf)

### Sites

Coleção de Documentários sobre Evolução - Inglês

<http://www.pbs.org/wgbh/evolution/>

Creation: <http://www.creationthemovie.com/>

Coleção Explorando O Ensino – Biologia

<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/EnsMed/expensbio.pdf>

Evolucionismo: <http://evolucionismo.org/>

Entrevista – Profa. Rosana Tidon

Parte 1 - <http://www.youtube.com/watch?v=tpZiwekF-8E>

Parte 2 - <http://www.youtube.com/watch?v=Egp6OMjGGL8&feature=related>

Parte 3 - <http://www.youtube.com/watch?v=MQrTZUJcRc&feature=related>

Parte 4 - <http://www.youtube.com/watch?v=pxiORFFgDMU&feature=related>

Modelo Didático para Ensino de Biologia Evolutiva

<http://www.cienciamao.usp.br/tudo/busca.php?key=ensino%20de%20biologia%20evolutiva%20utilizando%20a%20estrutura%20conceitual%20da%20sistematica%20filogenetica%20%96%20i>

## Referências



BRASIL. PCN Ensino Médio. **Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio** Parte III – ciências da natureza, matemática e suas tecnologias. Secretaria da Educação Média e Tecnológica, Ministério da Educação, Brasília, 144p, 2002.

PAZZA, R.; KAVALCO, K. F. Desafios do ensino de biologia evolutiva no Brasil. [Consult. 2011-20-12]. Disponível em: <http://darwin.bio.br/dnacetico/?p=133>; <http://networkedblogs.com/mHDY> .

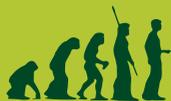
## Sobre os autores

**Vânia Marilande Ceccatto:** É bióloga, licenciada e bacharelada pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, a UNESP. Fez Mestrado em Ciências pela Universidade de São Paulo – USP e Doutorado em Bioquímica pela Universidade Federal do Ceará. É professora de biologia molecular desde 1998 na Universidade Estadual do Ceará. Está ligada ao Mestrado Acadêmico em Ciências Fisiológicas também da UECE.

**Edson Lopes da Ponte:** Doutorando em Fisiologia - 2012 pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ na área de produtos naturais no processo inflamatório. Mestre em Ciências Fisiológicas - 2009 Universidade Estadual do Ceará - UECE. Licenciado em Ciências Biológicas - 2004 pela Universidade Estadual do Ceará - UECE. Lecionando na Faculdade Christus - Curso de Medicina e ministrou disciplinas de Estágio Supervisionado no Ensino Médio-I, Biologia Evolutiva, Genética e Fisiologia Humana quando professor substituto na Universidade Estadual do Ceará - UECE, além disso possui experiência docente no ensino fundamental e médio onde ensinou Ciências e Biologia nos colégios Christus, Espaço Aberto e Ernesto Gurgel.



A não ser que indicado ao contrário a obra **Biologia Evolutiva**, disponível em: <http://educapes.capes.gov.br>, está licenciada com uma licença **Creative Commons Atribuição-Compartilha Igual 4.0 Internacional (CC BY-SA 4.0)**. Mais informações em: <[http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.pt\\_BR](http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.pt_BR)>. Qualquer parte ou a totalidade do conteúdo desta publicação pode ser reproduzida ou compartilhada. Obra sem fins lucrativos e com distribuição gratuita. O conteúdo do livro publicado é de inteira responsabilidade de seus autores, não representando a posição oficial da EdUECE.



Ciências Biológicas

Fiel a sua missão de interiorizar o ensino superior no estado Ceará, a UECE, como uma instituição que participa do Sistema Universidade Aberta do Brasil, vem ampliando a oferta de cursos de graduação e pós-graduação na modalidade de educação a distância, e gerando experiências e possibilidades inovadoras com uso das novas plataformas tecnológicas decorrentes da popularização da internet, funcionamento do cinturão digital e massificação dos computadores pessoais.

Comprometida com a formação de professores em todos os níveis e a qualificação dos servidores públicos para bem servir ao Estado, os cursos da UAB/UECE atendem aos padrões de qualidade estabelecidos pelos normativos legais do Governo Federal e se articulam com as demandas de desenvolvimento das regiões do Ceará.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ

