

O acaso na biologia evolutiva e as mutações dirigidas/adaptativas: aspectos históricos e epistemológicos

The chance in evolutive biology and the directed/adaptative mutations: historical and epistemological aspects

ROSSANO ANDRÉ DAL-FARRA

Universidade Luterana do Brasil/Canoas

RESUMO: A ocorrência de mutações no DNA representa um aspecto fundamental na biologia evolutiva, com implicações diretas sobre diversos temas como a biologia molecular. Dessa forma, torna-se relevante discutir os aspectos históricos e epistemológicos envolvidos na consolidação de pressupostos básicos subjacentes a esses temas. Neste texto, aborda-se a importância do acaso na evolução e a polêmica das mutações dirigidas.

Palavras-chave: biologia evolutiva; história da biologia; mutações dirigidas.

ABSTRACT: The occurrence of mutations in DNA is an important aspect in evolutive biology, with implications on many subjects including molecular biology. Thus, it's very important to examine the historical and epistemological aspects involved in these subjects. In this work it is approached the importance of the random in evolution and the controversy of the directed mutations.

Key words: evolutive biology; history of biology; directed mutations.

Introdução

A biologia molecular tem proporcionado muitos avanços na área da saúde e na agropecuária, gerando um aprimoramento notável no diagnóstico e profilaxia de doenças, e na produção de alimentos de origem vegetal e animal, resultados da intensa produção de conhecimento na área nos últimos anos. As aplicações desse conhecimento se estendem aos mais variados âmbitos da vida, trazendo inúmeros benefícios, alguns deles já observados e outros que podemos vislumbrar para o futuro.

Em virtude da avalanche de informações sobre o tema, presente nos periódicos mais conceituados do Brasil e no mundo, torna-se importante refletirmos a respeito da produção científica relativa ao DNA e, principalmente, em relação às interpretações dessas informações por parte dos pesquisadores da área.

Embora seja constatado o predomínio de métodos que privilegiam a produção e análise de dados empíricos nas ciências biológicas, a história da ciência tem demonstrado, em diversos ramos do conhecimento, que a construção do pensamento científico se insere em questões mais amplas que transcendem a simples obtenção de informações e a respectiva análise objetiva, visto que os argumentos

de autoridade e os paradigmas vigentes podem suplantar resultados empíricos que desafiem conceitos consolidados pelos especialistas de determinada área.

Um importante exemplo nesse âmbito se refere às mutações que ocorrem no material genético, um conceito central para a genética e para a biologia evolutiva. Grande parte do conhecimento produzido nessas áreas tem como pressuposto, entre outros aspectos, o fato de as mutações no DNA ocorrerem ao acaso. Por outro lado, a partir de estudos realizados com bactérias, o conceito de mutações dirigidas, considerando a existência de um processo no qual as células realizam mutações em decorrência das alterações no meio em que estão, ou seja, admitindo a possibilidade de elas “conhecerem” as mutações que as tornariam mais adaptadas ao ambiente em que estão.

Esse tema polêmico foi amplamente discutido a partir dos anos de 1980, pelo fato de que a sua aceitação atingiria pressupostos centrais da biologia evolutiva consolidados na primeira metade do século XX.

A comunidade científica desconsidera a possibilidade de que as mutações ocorram com o objetivo de responder às alterações no ambiente, ou seja, o conceito de finalidade nas alterações do DNA não se ajusta aos pressupostos vigentes na biologia atual.

Diante desses aspectos e considerando a importância da genética no mundo contemporâneo, tem-se como objetivo neste artigo a discussão a respeito do acaso na evolução, principalmente em relação ao impacto que esse conceito apresenta para a construção do pensamento evolutivo. Para tal finalidade, serão utilizadas como foco de estudo as mutações dirigidas, posteriormente denominadas mutações adaptativas.

Considerações sobre a Regularidade dos Fenômenos

Para René Descartes, o denominado ‘princípio clássico da correspondência’ poderia garantir a ocorrência da associação entre a idéia na mente e o objeto estudado. Essa questão, que também foi objeto de reflexão para Aristóteles e Platão, embora com perspectivas diferentes das adotadas pelo filósofo francês, pode ser enfocada da seguinte forma: se encontramos correspondências entre o nosso raciocínio e o nosso objeto de estudo, podemos inferir que há princípios subjacentes aos fenômenos naturais, ou seja, que existam leis fundamentais regendo a ocorrência de regularidades nos objetos de estudo sobre os quais nos debruçamos, pois, caso contrário, os conceitos que elaboramos não se encaixariam em sistemas lógicos.

Nos últimos séculos, os procedimentos da metodologia científica e da ciência experimental, apoiados pela adoção das análises estatísticas como comprobatórias dos fenômenos estudados, têm balizado e orientado as decisões a respeito da análise de dados empíricos.

No mundo da estatística, a ordem e os princípios gerais subjacentes existem, junto, é claro, de um elemento chamado ‘acaso’, que, ocultamente, parece nos espreitar para mostrar a sua força e nossa subserviência a ele.

Provavelmente, no momento em que associamos a estatística às comprovações do método científico, tentando destituir a ciência de uma ordem ‘mágica’ e irreal que seria um resquício do pensamento científico da Idade Média, criamos uma nova forma de interpretar as informações conforme pressupostos teóricos que previamente orientam nossas conclusões a respeito dos fenômenos estudados.

A utilização irrefletida da estatística apenas torna nossas metodologias mais sofisticadas,

requintadas por expressões tais como as diferenças estatisticamente significativas, os parâmetros não-viesados, desde que, obviamente, as pressuposições criadas para subverter os fenômenos sejam respeitadas, ou seja, a não-existência de heterogeneidades de variâncias, as amostragens aleatórias e outros aspectos.

É notório que a estatística possibilitou avanços extraordinários no saber científico e na vida das pessoas, permitindo um consolidado crescimento nas ciências biomédicas, agrárias, na economia e nos mais variados ramos do conhecimento, por proporcionar a construção de instrumentos de validação mais precisos, por identificar indicadores adequados e por fornecer parâmetros mais objetivos de avaliação de dados. Podemos, inclusive, afirmar que sem ela estaríamos em um evidente atraso no desenvolvimento científico e vivendo em um mundo em piores condições.

No entanto, as 'ordens' que colocamos sobre determinados campos do conhecimento, assim como as implicações desse procedimento sobre o desenvolvimento da ciência, dificultam o trabalho dos pesquisadores que procuram explicar os fenômenos por meio de regularidades oriundas de relações de causa e efeito não-usuais, pelo fato de elas serem duramente rechaçadas por uma grande parcela da comunidade científica. A discussão de temas fundamentais a respeito da construção do pensamento científico é altamente relevante para a problematização dessa avalanche de informações produzidas nas últimas décadas no âmbito da genética, bem como as repercussões desta sobre a vida no planeta.

Propositividade e Evolução

Um dos temas mais debatidos até hoje na ciência foi a teoria da evolução de Charles Darwin. Desde a publicação de *Origem das espécies*, em 1859, muitas obras já foram escritas sobre o assunto, englobando os reflexos do tema nos aspectos biológicos, psicológicos e sociais.

Em relação aos aspectos centrais do pensamento evolutivo, freqüentemente se atribui apenas ao francês Jean-Baptiste Lamarck a utilização dos princípios de 'uso e desuso' e da 'herança dos caracteres adquiridos', embora tais aspectos também tenham sido considerados, com características distintas, por Charles Darwin em vários pontos de seus trabalhos¹.

A propósito, a biologia evolutiva se constitui em grande exemplo de como o caráter histórico ajuda a entender importantes revoluções científicas, mormente quando essas realizações têm impacto sobre a sociedade e sobre o olhar do ser humano sobre ele mesmo.

Theodosius Dobzhansky, autor de *Genética e a origem das espécies*, contribuiu muito para esse ramo do conhecimento, apoiado pelos achados do paleontólogo Simon, cujos dados eram compatíveis com a evolução por meio de pequenas mutações acumuladas com o passar do tempo para gerar novas espécies. Também decisivos para esse processo foram a genética de Mendel, a sistemática, a genética de populações e a teoria da herança cromossômica de Morgan².

Destaca-se ainda Julian Huxley, que publicou na década de 1940 uma síntese moderna da evolução. Huxley defendia ser a evolução resultante de mutações genéticas aleatórias nos indivíduos dentro das populações, nas quais os mais adaptados pela seleção natural deixavam mais descendentes, portanto, as variações que eles portavam prevaleciam na população. Dessa forma, estava consolidada a adequação entre os princípios de Darwin relativos à variação e à seleção natural e as contribuições da genética do século XX.

Em janeiro de 1947, a conferência em Princeton, reunindo geneticistas, naturalistas e paleontólogos,

oficializou o que chamamos de teoria sintética da evolução. A partir desse evento, muitas publicações versando sobre a biologia evolutiva surgiram em diferentes domínios do conhecimento³.

Os princípios gerais da síntese evolutiva postulam que as variações genéticas nas populações surgem por mutações ao acaso (não adaptativamente dirigidas) e também por recombinações genéticas. Além disso, as populações evoluem por mudanças nas frequências gênicas trazidas pela deriva genética aleatória, pelo fluxo gênico e principalmente pela seleção natural. A maior parte das variantes genéticas adaptativas apresenta pequenos efeitos fenotípicos individuais, de tal modo que as mudanças fenotípicas são graduais e a diversificação ocorre por meio da especiação, proporcionando a evolução gradual do isolamento reprodutivo entre as populações. Esses processos, ao serem continuados por tempo suficientemente longo, dão origem a mudanças de elevada magnitude, formando níveis taxonômicos superiores como gênero, família e outros⁴.

A unificação proporcionada pela teoria sintética da evolução não foi, desde esse período até os nossos dias, cercada apenas por pontos pacíficos. Existem divergências pontuais a respeito da importância da seleção natural, do gradualismo e de outros aspectos relativos à biologia evolutiva.

Motoo Kimura, por meio da teoria neutralista, afirmava que muitas mutações não resultam em efeito adaptativo/vantajoso. A teoria do equilíbrio pontuado de Gould⁵ e Eldredge, contrariando o gradualismo, apontava para os saltos evolutivos armazenados nos registros fósseis, por meio da demonstração de que os organismos passam por longos períodos sem alterações importantes e por períodos nos quais as modificações e, portanto, a 'criatividade' evolutiva, é intensa, como na explosão do cambriano ocorrida há mais de 500 milhões de anos.

Vozes ainda mais dissidentes, como de Eva Jablonka e Marion Lamb⁶ entre outras, procuram associar conceitos de herança epigenética aos conceitos da teoria sintética da evolução para explicar os mecanismos evolutivos.

Lewin⁷ define como epigenéticas as alterações que influenciam o fenótipo sem alterar o genótipo, ou seja, refere-se às mudanças nas propriedades de uma célula que são herdadas, mas que não representam alterações no material genético. Jablonka e Marion⁸ pretendem um alcance mais amplo que este, atribuindo maior importância à influência do ambiente sobre as alterações genéticas. Utilizando diferentes abordagens, essas pesquisadoras mostram a possibilidade de participação de mecanismos epigenéticos na evolução de muitas espécies, caracterizando as influências do ambiente como decisivas sobre as transformações ocorridas em diferentes seres por meio de demonstrações empíricas plausíveis. Entretanto, a unificação de princípios evolutivos por meio da teoria sintética obliterou a inclusão de aspectos relevantes que poderiam contribuir para o entendimento de fenômenos tão complexos como o da evolução das espécies.

A síntese evolutiva foi muito influente na ciência, principalmente nos Estados Unidos, associada à tentativa positivista de unificação do conhecimento nas ciências biológicas. Nesse processo, houve a necessidade de se livrar de aspectos metafísicos, tornando a biologia evolutiva um ramo do conhecimento possível de ser experimentado e observado e, portanto, afinado com os princípios do Círculo de Viena⁹.

Ernst Mayr¹⁰ afirmou que a grande vantagem do princípio da seleção natural no pensamento evolutivo consiste em tornar desnecessária a invocação de causas finais, ou seja, de princípios teleológicos que induzam a pensar em uma evolução levando os indivíduos a um determinado fim. Para ele, nada é predeterminado, mesmo porque o objetivo de seleção pode ser alterado de uma geração para outra se o ambiente se modificar.

Em 1883, August Weismann propôs que o plasma germinativo, sendo completamente separado e imune às influências do soma (o restante do organismo), não poderia sofrer influência do ambiente e,

portanto, as modificações ambientais não alterariam diretamente a hereditariedade. O reconhecimento do trabalho de Mendel no início do século XX auxiliou o processo de tornar o acaso um agente da evolução biológica. As mutações, portanto, ocorreriam ao acaso, o que não quer dizer que todos os locos gênicos sofrem à mesma taxa¹¹ nem que todas as mutações imagináveis sejam igualmente prováveis. As mutações não são independentes dos efeitos do ambiente, porque os agentes mutagênicos, como as radiações, por exemplo, aumentam as taxas dessas alterações nas populações. O acaso evocado aqui é no sentido de que a probabilidade de ocorrência de uma mutação não é afetada pela utilidade que ela possa vir a ter para o ser que a apresenta¹².

O autor¹³ cita, ainda, experimentos cujos resultados demonstram que a ocorrência de resistência de drosófilas ao DDT ocorreu graças a mutações já presentes na população, ou seja, antes da exposição a esse agente tóxico. Em pesquisa realizada por outros autores, foi verificada, ainda, a ocorrência de bactérias resistentes à penicilina em meios de cultura com e sem esse antibiótico, demonstrando, segundo os autores, que ela não estava induzindo a presença de mutações nas bactérias, no sentido de estas ficarem resistentes.

Mesmo que o conjunto de evidências seja limitado para concluir que os processos de mutação gênica sempre ocorram ao acaso, tais experimentos foram importantes na demonstração da contingência evolutiva em detrimento de uma propositividade evolutiva. No entanto, como todos aqueles que lidam com o conhecimento, não podemos nos contentar com o estabelecido, nem que seja apenas para confirmá-lo ou para que haja condições de legitimar o conhecimento científico, como proposto pelo refutacionismo de Karl Popper.

Polêmica das Mutações Dirigidas

A incorporação do acaso na evolução decorre de um conjunto de resultados empíricos que se ajustam ao espírito do tempo – final do século XIX e início do século XX –, embora esse pressuposto teórico deva ser investigado na busca por possíveis anomalias, como qualquer princípio científico fundamental.

Em 1988, John Cairns e sua equipe da Escola de Saúde Pública de Harvard publicaram, no periódico *Nature*, um trabalho em que atribuíam a bactérias um certo mecanismo desconhecido de ‘escolher’ quais mutações iriam ocorrer no seu material genético, de acordo com as situações que o ambiente apresentasse. Tal fenômeno foi denominado mutação dirigida¹⁴.

Esse conceito referia-se à capacidade de a bactéria ‘observar’, no meio de cultura em que ela estava, a presença da lactose como fonte de energia e carbono, sacarídeo para o qual ela não era geneticamente dotada de condições metabólicas para a utilização. Eis que então essa bactéria poderia ter escolhido uma mutação nos seus genes para se tornar apta a utilizar a lactose.

O artigo “The origin of mutants” de Cairns e seus colegas gerou uma grande polêmica na comunidade científica. Embora os autores tivessem feito apenas uma menção hipotética a respeito dessa possibilidade, muitos os acusaram de desencrustar Jean-Baptiste Lamarck, tão criticado em nossos livros didáticos e em publicações paradidáticas. O fato desencadeou uma avalanche de cartas para a revista, seguida de outros experimentos realizados para provar ou descartar tal hipótese por meio de delineamentos experimentais cuidadosamente construídos.

Barry Hall¹⁵, da Universidade de Rochester, em 1990 procurou explicar os resultados de Cairns

por meio do que foi chamado de hipermutação. Segundo Hall, na escassez de fontes de alimento, uma bactéria pode entrar em um estado de 'crise', em que aumentam as taxas de mutações (ao acaso), que podem, em algumas bactérias, ser vantajosas, como no caso daquela apta a degradar lactose.

Seguiram-se outros resultados tentando explorar a hipermutação, inclusive na equipe de Cairns, mas parecia haver consenso de que a evolução apresenta aspectos mais complexos do que se imaginava.

Tim Beardsley¹⁶ escreveu para a *Scientific American* em 1997 comentando questões relacionadas às mutações dirigidas, associando o fenômeno a evidências obtidas em outras pesquisas da existência de genes chamados mutacionais (do inglês *mutators*). Os genes mutacionais são comuns em células tumorais e em agentes patogênicos, proporcionando uma evolução mais rápida por meio do acréscimo nas taxas de mutações. Esses genes poderiam auxiliar as células tumorais e os agentes patogênicos na luta contra o sistema imune dos hospedeiros. Para o autor, parecia haver muitas dificuldades em provar a ocorrência da mutação dirigida, mas, segundo ele, algumas evidências apontam para a existência de fenômenos complexos no desenvolvimento evolutivo.

Após muitas pesquisas e divulgações, os resultados não foram suficientes para descartar as possibilidades do fenômeno, embora também não tenham sido convincentes para a comunidade científica em geral aprovar a mutação dirigida.

Interessante observar que Patricia Foster e John Cairns¹⁷, em artigo de 1992, concluíram que o processo mutacional em questão não era dirigido a um objetivo específico. Inclusive, em outro artigo de autoria de Patricia Foster publicado no *Annual Review of Microbiology* em 1993¹⁸, o nome foi alterado para 'mutação adaptativa', com ressalvas da autora afirmando que o referido fenômeno ocorreria da seguinte forma: uma população de células aumentaria sua variabilidade genética quando submetida a condições de estresse, mantendo os seus genes mais ou menos intactos. Esse fenômeno das mutações pode ocorrer, conforme estudos relatados pela autora, devido a falhas nos mecanismos de reparo das mutações que ocorrem no estresse.

Segundo Radovan Borojevic¹⁹, sob condições especiais, as bactérias retardam as divisões celulares e aumentam as mutações e recombinações genéticas, diminuindo os mecanismos de reparo de DNA, e facilitando o surgimento de indivíduos portadores de mutações capazes de torná-los aptos à sobrevivência, sendo esse efeito denominado SOS. Borojevic aponta como semelhantes a esse efeito as recombinações genéticas ocorridas no sistema imunológico, que aumentam a possibilidade de produzir anticorpos com alta variabilidade por meio de mutações aleatórias, proporcionando uma melhor defesa imunológica aos indivíduos.

John Holland²⁰ afirma que essas características se assemelham aos sistemas complexos adaptativos pela capacidade de antecipação. Citando um fenômeno conhecido na microbiologia, Holland lembra que uma bactéria sempre 'nada' no sentido de um gradiente de concentração de açúcar: "Não quero dizer necessariamente que isto seja consciente, mas que o sistema segue regras que o levam a agir de uma determinada forma, porque o resultado futuro desta forma de agir lhe será benéfico".

Portanto, deve haver um mecanismo molecular que explique tanto o comportamento de 'nadar' em direção a um gradiente, quanto a presença de altas taxas de mutações em determinadas situações, assim como a relevância do estado de hipermutação como processo adaptativo. Mas por que descartar a tendência de uma propositividade na busca ordenada pela mutação antes de qualquer outra tentativa de explicar por mecanismos dirigidos?

Parece, inclusive, que há um alívio por parte dos pesquisadores em conseguir explicar esses resultados por meio de algum processo desprovido de propósito, algo que pode também ser demonstrado pela mudança do nome do fenômeno de mutação dirigida para mutação adaptativa, e

também pelo fato de Patrícia Foster afirmar que o primeiro nome teria sido proposto pelos editores da *Nature* e não por Cairns e seus colaboradores, procurando, quem sabe, eximir-se de ter atribuído um mecanismo teleológico a esse processo por parte das bactérias²¹.

Pettersson e colaboradores²² defendem, em um artigo, a ocorrência de um mecanismo distinto dos postulados por Cairns e Foster para explicar tais mutações, denominado duplicação adaptativa. Segundo os autores desse recente estudo, a duplicação, além de ser uma explicação quantitativamente plausível, demonstrada por meio de cuidadosas análises e simulações, prescinde da existência de um processo molecular novo e não provado para explicar o surgimento de bactérias mais adaptadas, com uma clara alusão às conclusões obtidas por pesquisadores como Cairns e Foster, por exemplo.

Dessa forma, se há problemas em provar a mutação dirigida ou adaptativa, parece-me não ser esse o centro da questão, e sim, a tentativa veemente de negar qualquer possibilidade de orientação evolutiva, embora os mesmos que neguem a presença de uma orientação, no sentido de haver um princípio gerador das mutações, acabam conduzindo a um outro princípio revestido de algum componente mecânico, e não dirigido. Se não é algo 'pensado' pela bactéria, a tendência é procurar então um mecanismo que explique isso. A menção a algum princípio orientador na evolução não se adapta ao *zeitgeist* da ciência tecnológica dos nossos dias. Então, vem a hipermutação, que atribuímos ao acaso, para que não sejamos antropomórficos ao atribuir aspectos 'conscientes e humanos' à *Escherichia coli*. No entanto, os pesquisadores contemporâneos, via de regra, constroem atribuições à matéria no sentido de ajustar os fenômenos ao olhar científico da época, cujas causas devem ser destituídas de propósitos, embora essa 'fuga' termine por atribuir uma certa ordenação dos fatores causais.

Em vários ramos do conhecimento, tem sido utilizado o conceito de sistemas caóticos para explicar fenômenos complexos. Esses sistemas não são caracterizados pela inexistência de possibilidade de definições precisas a respeito do comportamento das variáveis envolvidas, e sim que esses sistemas apresentam, entre outros aspectos, sensibilidades às condições iniciais, podendo apresentar conseqüências drasticamente diversas conforme a ocorrência dessas condições preliminares.

Se anteriormente tínhamos o determinismo estrito de Laplace, agora fizemos alusões ao caos para dar conta da complexidade. Enfim, buscamos uma ordem, pois quando investigamos as causas de algum fenômeno, pressupomos a existência dela para justificar a correspondência entre nossas construções mentais e o objeto de estudo, caso contrário, não haveria justificativa para termos explicações plausíveis na relação entre essas causas e os seus efeitos.

A existência de uma ordem, no sentido de que as regularidades dos fenômenos apresentem elementos comuns, está ligada firmemente à idéia de propósito, de direção, de encaminhamento para as questões que desafiam o nosso entendimento.

Já que procuramos ordem, por que não encarar a propositividade nas mutações genéticas como uma hipótese? Será que já possuímos a capacidade de controlar todos os fenômenos envolvidos no metabolismo bacteriano? Talvez, mas também há outros fenômenos biológicos que demonstram a ocorrência de mais anomalias.

Roberto Lent²³ procura explicar como deve ter ocorrido a 'fabricação do cérebro', afirmando encontrar dificuldades na explicação dos seguintes eventos do desenvolvimento apenas pelas instruções genéticas:

- a) diferenciação celular nas células do sistema nervoso que se transformam em neurônios a partir de células indiferenciadas;
- b) migração das células e a formação das diferentes estruturas do sistema nervoso;
- c) formação de circuitos neurais estabelecendo as conexões das células neuronais;
- d) plasticidade cerebral, onde conexões nervosas pouco utilizadas ou sem uso, são eliminadas,

em detrimento daqueles caminhos neuronais mais utilizados.

Roberto Lent²⁴ procura avaliar, nesse artigo, as tentativas utilizadas até agora para explicar a formação do cérebro, especialmente pela capacidade de produzir uma imensa diversidade de indivíduos, e também pela capacidade de o cérebro se autofabricar. O autor é enfático em dizer que, embora muitos esforços tenham sido feitos, ainda hoje temos dificuldade em explicar todos esses mecanismos por meio de ações puramente comandadas pelo material genético, utilizando as propriedades atribuídas ao DNA.

Complexidade dos Fenômenos Biológicos

Lynn Margulis e Dorion Sagan²⁵ afirmam que, embora a maioria dos pesquisadores trabalhe com a hipótese de a vida evoluir por meio de mudanças genéticas aleatórias, e que as mutações ao acaso, cegas e sem direção, sejam enaltecidas como sendo a principal fonte de novidades evolutivas, um número cada vez maior de pesquisadores, incluindo eles mesmos, não compactuam com essa idéia.

Para esses autores, há muitas lacunas na evolução que podem ser explicadas pela incorporação simbiótica de componentes previamente aprimorados em linhagens separadas, ou seja, módulos preexistentes (exemplificados pelas bactérias, segundo os autores) gerados por mutações e conservados pela seleção natural se unem e interagem formando, inclusive, novos organismos.

A própria complexidade envolvida em processos fisiológicos bem conhecidos como a coagulação sanguínea, na qual atuam conjuntamente muitos componentes gerados pela atuação de diferentes genes, desafiam as explicações oriundas de mutações ao acaso ocorridas separadamente em cada um dos segmentos de DNA envolvidos na produção dessas importantes reações ocorridas nos organismos.

Ferreira²⁶ afirma que:

Se a natureza levasse um microssegundo para testar cada uma das seqüências de [aminoácidos] e então selecionar quais correspondem a proteínas funcionais, ainda assim o tempo gasto para testar todas as possibilidades seria de ordem de 10^{124} segundos, e a idade estimada da Terra é de 20 bilhões de anos, ou da ordem de 10^{17} segundos.

Ferreira²⁷ ainda comenta as tentativas de matematizar esse processo, levando à elaboração de sistemas dinâmicos para explicá-los. O autor acrescenta que as mutações genéticas que produzem seqüências de aminoácidos desvantajosas (por formarem proteínas que não funcionam biologicamente) podem ir sendo eliminadas progressivamente, reduzindo o número de seqüências de aminoácidos para 10^{16} .

A conclusão de Ferreira²⁸ é que apenas o acaso não pode operar para produzir o conjunto relativamente restrito das seqüências de aminoácidos que existem nos organismos de hoje. Provavelmente, as proteínas atualmente existentes resultaram de um processo evolutivo que envolveu mutações e colagens de pedaços de proteínas já existentes, originando novas proteínas melhor adaptadas às funções cada vez mais elaboradas requeridas pela célula.

Interpretações de autores como Stuart Kauffman²⁹ a respeito da organização de grupos de moléculas aludem aos denominados conjuntos autocatalíticos, nos quais o surgimento espontâneo de uma auto-organização em sistemas metabólicos que passam a interagir com outros nos permite observar que nesses processos há uma ordem que emerge de forma 'natural' dentro da complexidade inicial de moléculas presentes inicialmente.

Provavelmente, se atribuirmos a diversidade da vida apenas às mutações e às recombinações genéticas, talvez não fosse possível explicar o equilíbrio pontuado na paleontologia, na qual a observação dos registros fósseis demonstra a ocorrência de longos períodos em que a maioria das espécies passa por poucas mudanças, seguidos por períodos em que as alterações são rápidas e concentradas em populações pequenas e isoladas. Entretanto, devemos ressaltar que Gould, um dos propositores dessa teoria, atribuiu um papel fundamental ao acaso na evolução.

E se lembrarmos a hipermutação citada anteriormente, verificamos que há uma certa semelhança desta com o fenômeno do equilíbrio pontuado, no aspecto da 'criatividade' ocorrida na geração de variações após períodos de 'crise'.

Provavelmente existam ordens que buscamos, mas que pouco compreendemos, e, portanto, precisamos de um novo olhar sobre os processos que regem os fenômenos biológicos, cuja complexidade não pode prescindir de conceitos e modelos teóricos que sejam mais condizentes com as suas peculiaridades.

Oliveira³⁰, descrevendo os sistemas complexos, afirma serem eles formados por muitas unidades simples interligadas entre si, mas uma influencia a outra à medida que o sistema evolui dinamicamente, e cada unidade tenta adaptar seu estado de acordo com as solicitações que recebe das outras às quais está ligada, com o objetivo maior de otimizar algum parâmetro importante.

Nussenzweig³¹ aponta características dos sistemas complexos adaptativos, como:

a) frustração: identificada como a impossibilidade de o sistema atender a todos os prováveis caminhos ao mesmo tempo;

b) ordem emergente: relativa à capacidade de auto-organização espontânea, criando uma ordem a partir de um estado desordenado;

c) presença de atratores múltiplos: muitos estados possíveis iniciais tendem a desembocar em uma situação específica;

d) quebra de ergodicidade: o sistema pode ficar parado em alguns períodos por algum tempo, mas não deixa de ser dependente da história anterior;

e) aprendizado: o sistema é adaptativo e altera-se com os fatores oferecidos pelas situações que vai enfrentando e isso torna mais difícil o tratamento matemático, pois as alterações no comportamento do sistema são complicadores para o estabelecimento de definições matemáticas.

Os sistemas complexos adaptativos aprendem com a experiência, afirma John Holland³², indicando que a visão segmentada dos processos não dá conta do todo. A criatividade, seja nas bactérias, ou nos fósseis, permite-nos realizar ilações a respeito de ordem e de leis fundamentais ainda pouco investigadas e que ainda conheceremos com estudos mais profundos da natureza dos fenômenos biológicos.

Holland³³ cita também que a resolução de temas importantes na atualidade, como as minúcias do funcionamento do sistema imunológico e a ação em diferentes doenças, a sustentabilidade dos ecossistemas, a economia global, entre outros, poderiam ser enfrentados mais eficientemente se conhecêssemos melhor a dinâmica dos sistemas complexos.

Definitivamente, essas ilações não invalidam as conquistas da genética e de ramos correlatos do conhecimento a respeito da biologia evolutiva. Pelo contrário, as indagações apenas iluminam o debate necessário em todos os ramos do conhecimento. Penso ser esse tema mais abrangente do que isso. Considero, sim, a necessidade de incorporação de novas abordagens, sinérgicas aos grandes avanços da genética e da biologia molecular nos dias de hoje, e principalmente reforço a necessidade de que temos de continuamente repensarmos nossas convicções, por mais arraigadas que sejam, pois muitas vezes nessa solidez inflexível é que "mora o perigo".

NOTAS E REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Rossano André Dal-Farra é biólogo (Universidade Luterana do Brasil/Canoas), médico veterinário (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), mestre em Produção Animal – Melhoramento Genético Animal (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), doutor em Educação (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) e professor e pesquisador da Universidade Luterana do Brasil/Canoas. E-mail: rossanodf@uol.com.br.

- 1 DESMOND, Adrian e MOORE, James. *Darwin: a vida de um evolucionista atormentado*. São Paulo: Geração Editorial, 1995.
- 2 BLANC, Marcel. *Os herdeiros de Darwin*. São Paulo: Página Aberta, 1994.
- 3 DRESSINO, Vicente. La teoría evolutiva y los nuevos aportes del método experimental. *Episteme*, Porto Alegre, v. 3, n. 6, p. 311-320, 1998.
- 4 FUTUYMA, Douglas Joel. *Biologia evolutiva*. 2. ed. Ribeirão Preto: SBG/CNPq, 1992.
- 5 GOULD, Stephen Jay. *Wonderful life: the burgess shale and the nature of history*. London: Penguin Books, 1991.
- 6 JABLONKA, Eva e MARION, J. Lamb. *Epigenetic inheritance and evolution: the lamarckian dimension*. Oxford: Oxford University Press, 1995.
- 7 LEWIN, Benjamin. *Genes VII*. Oxford: Oxford University Press, 2000.
- 8 JABLONKA e MARION, op. cit.
- 9 OLIVEIRA, Dayse Lara de. Polêmicas recorrentes na síntese evolutiva. *Episteme*, Porto Alegre, v. 3, n. 6, p. 52-67, 1998.
- 10 MAYR, Ernst. Darwin's influence on modern thought. *Scientific American*, v. 283, n. 1, p. 66-71, July 2000.
- 11 Algumas regiões do DNA são denominadas 'sitios quentes' (*hot spots*) por apresentarem frequências anormalmente elevadas de recombinações e mutações. STRACHAN, Tom e READ, Andrew P. *Genética molecular humana*. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2002. 576p.
- 12 FUTUYMA, op. cit.
- 13 Ibid.
- 14 CAIRNS, J.; OVERBAUGH, J.; MILLER, S. The origin of mutants. *Nature*, v. 335, p. 142-145, 1988.
- 15 HALL, B.G. Spontaneous point mutations that occur more often when advantageous than when neutral. *Genetics*, v. 126, p. 5-16, 1990. Disponível em: <<http://www.genetics.org/cgi/content/abstract/126/1/5>>. Acesso em: 25 out. 2005.
- 16 BEARDSLEY, Tim. *Evolution evolving*. Disponível em: <<http://www.sciam.com/0997issue/0997infocus.html>>. Acesso em: out. 2000.
- 17 FOSTER, Patricia L. e CAIRNS, J. Mechanisms of directed mutation. *Genetics*, v. 131, n. 4, p. 783-789, 1992. Disponível em: <<http://www.genetics.org/cgi/content/abstract/131/4/783>>. Acesso em: 25 out. 2005.
- 18 FOSTER, Patricia L. Adaptive mutation: has the unicorn landed? *Genetics*, v. 148, p. 1453-1459, abril 1998. Disponível em: <<http://www.genetics.org/cgi/content/full/148/4/1453>>. Acesso em: 25 out. 2005.
- 19 BOROJEVIC, Radovan. Evolução de sistemas biológicos integrados: multicelularidade e diferenciação celular. In: NUSSENZVEIG, Herch Moisés (Org.). *Complexidade e caos*. Rio de Janeiro: UFRJ/COPEA, 1999. 280p.
- 20 HOLLAND, John. Sistemas complexos adaptativos e algoritmos genéticos. In: NUSSENZVEIG, Herch Moisés (Org.). *Complexidade e caos*. Rio de Janeiro: UFRJ/COPEA, 1999. 280p.
- 21 FOSTER, op. cit.
- 22 PETERSSON, M.E.; ANDERSSON, D.I.; ROTH, J.R.; BERG, O.G. The amplification model for adaptive mutation: simulations and analysis. *Genetics*, v. 169, p. 1105-1115, 2005. Disponível em: <<http://www.genetics.org/cgi/reprint/169/2/1105>>. Acesso em: 26 out. 2005.
- 23 LENT, Roberto. Fabricação do cérebro. In: NUSSENZVEIG, Herch Moisés (Org.). *Complexidade e caos*. Rio de Janeiro: UFRJ/COPEA, 1999. 280p.
- 24 Ibid.
- 25 Respectivamente esposa e filho de um dos maiores divulgadores da ciência – Carl Sagan –, sendo ela de reconhecida notoriedade em virtude de seus trabalhos sobre a origem das mitocôndrias das células. MARGULIS, Lynn e SAGAN, Dorion. *O que é vida*. Rio de Janeiro: Zahar, 2002.
- 26 FERREIRA, Sérgio T. Complexidade e proteínas: estrutura, enovelamento, dinâmica e associação de subunidades protéicas. In: NUSSENZVEIG, Herch Moisés (Org.). *Complexidade e caos*. Rio de Janeiro: UFRJ/COPEA, 1999. 280p.
- 27 Ibid.
- 28 Ibid.
- 29 KAUFFMAN, Stuart A. *The origins of order: self-organization and selection in evolution*. New York: Oxford University Press, 1993. 709p.
- 30 OLIVEIRA, P.M.C. Autômatos celulares. In: NUSSENZVEIG, Herch Moisés (Org.). *Complexidade e caos*. Rio de Janeiro: UFRJ/COPEA, 1999. 280p.
- 31 NUSSENZVEIG, Herch Moisés. Introdução à complexidade. In: _____ (Org.). *Complexidade e caos*. Rio de Janeiro: UFRJ/COPEA, 1999. 280p.
- 32 HOLLAND, 1999.
- 33 HOLLAND, J.H. *A ordem oculta: como a adaptação gera a complexidade*. Lisboa: Gradiva, 1997.

Artigo recebido para publicação em 11/2005.

Aprovado para publicação em 07/2006.