

— Origem e Função do Sexo

CITAÇÃO

Lima, N. R. W (2018)
Origem e Função do Sexo,
Rev. Ciência Elem., V6(02):051.
doi.org/10.24927/rce2018.051

EDITOR

José Ferreira Gomes,
Universidade do Porto

EDITOR CONVIDADO

José Francisco Rodrigues,
Universidade de Lisboa

RECEBIDO EM

10 de fevereiro de 2018

ACEITE EM

17 de abril de 2018

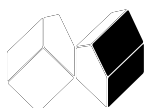
PUBLICADO EM

18 de junho de 2018

COPYRIGHT

© Casa das Ciências 2018.
Este artigo é de acesso livre,
distribuído sob licença Creative
Commons com a designação
[CC-BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/), que permite
a utilização e a partilha para fins
não comerciais, desde que citado
o autor e a fonte original do artigo.

rce.casadasciencias.org



Neuza Rejane Wille Lima

Instituto de Biologia, Universidade Federal Fluminense
rejane_lima@id.uff.br

Por que os organismos se reproduzem através do sexo tem sido o maior e mais polêmico tópico na Biologia Evolutiva. Até a década de 1950, o sexo era considerado somente como uma adaptação que conferia às espécies vantagens diante das inevitáveis alterações ambientais (naturais ou antropogênicas), além de possibilitar iludir os antagonistas biológicos como predadores, parasitos e microrganismos que causam doenças (Hipótese da Variabilidade). Entretanto, desde a explosão de pesquisas na área de Biologia Molecular, que se iniciaram a partir de 1980, essa questão definitivamente tomou outro rumo. Com base em conhecimentos biomoleculares foi proposta a hipótese de que o sexo é, primordialmente, uma adaptação que promove de modo exógeno correções às mutações deletérias que passaram pelo crivo dos processos bioquímicos que endogenamente agem na correção do DNA (Hipótese do Reparo). Em outras palavras: somente o “casamento” entre seres que trazem mutações danosas recessivas (que não foram bioquimicamente corrigidas) consegue, de modo benéfico, excluir da população os erros genéticos que causam doenças e síndromes genéticas. A variabilidade genética observada nos seres sexuados seria favorecida ou desfavorecida pela reprodução sexual? Outras hipóteses, que abordam a Origem do Sexo (Parasitismo versus Conjugação) e a Função Ecológica do Sexo (Banco de Emaranhado versus Rainha Vermelha) também são tratadas como explicações antagônicas para a importância da reprodução sexuada.

Por que o sexo?

Até onde se sabe somente a espécie humana e o bonobo, erroneamente chamado de chimpanzé pigmeu, praticam o sexo por prazer sem a vinculação com suprir as necessidades reprodutivas¹. Para todos os outros seres que se reproduzem por meio do sexo, este parece ser somente o modo de perpetuar seus genes.

Independentemente da questão envolvida, o sexo é preponderante na natureza, apesar de envolver mais custos e perigos que a reprodução assexuada, pois demanda energia para realizar a meiose e também envolve processos diretos e indiretos que promovem o encontro dos gametas feminino e masculino que muitas vezes facilitam o risco de predação e/ou de aquisição de doenças e de parasitos durante a corte, a cópula e quando há o cuidado biparental^{2,3}.

A despeito de todos esses custos, por qual razão a maioria das espécies se reproduz sexuadamente³ enquanto que alguns, tais como as bactérias, se reproduzem preferencialmente assexuadamente? Faço essa pergunta por que, comparativamente, o sexo^{1,2,4,5}:

- Confere uma taxa de crescimento populacional menor que a reprodução assexuada, pois esta resulta em 100% na taxa de crescimento populacional, enquanto a sexuada confere somente 50%, pois somente a metade (as fêmeas) produziram os seres para a próxima geração;
- Propicia a transmissão de doenças infecciosas (como HIV e HPV) e infestações por inúmeros parasitos (pulgas, carrapatos, piolhos, ácaros), quando há cópula e outros contatos físicos entre os seres vivos - inexistentes na reprodução assexuada;
- Favorece a expressão de genes recessivos deletérios que só são expressos a partir da união de dois seres. Em outras palavras: favorecendo que a prole expresse genes que conferem debilidades não observáveis nos genitores. Por exemplo, hemofilia A⁶ que se caracteriza pela desordem no mecanismo da coagulação do sangue causando o aparecimento de hematomas e sangramentos nas articulações e também intracranianos são assintomáticos nas mães e podem se manifestar em filhos do sexo masculino. Numa linhagem assexuada os genes podem ser mantidos em recessividade. Adicionalmente, se a mutação⁷ em genes dominantes surgir numa linhagem assexuada, somente esta poderá ser extinta da população, sem afetar a existência das demais.
- Trouxe consigo o fenômeno da morte para os seres, uma vez que os organismos que crescem vegetativamente (assexuadamente) expandem seus tecidos e criam novos galhos ou ramos (como as plantas e os corais) ou realizam a bipartição (como bactérias, amebas e planárias), nem sempre experimentam o falecimento.

O que é sexo?

A palavra sexo deriva do latim *secare* que significa "dividir ou separar alguma coisa que originalmente era inteira"⁸. Essa palavra pode remeter a diferentes conceitos^{3,4}:

1. condição de ser macho ou fêmea;
2. contato das cloacas ou genitálias de macho e fêmea;
3. conexão através de membranas dos organismos para produção de prole;
4. recombinação de genes de diferentes origens para gerar um novo ser.

A recombinação genética¹ é o conceito mais abrangente para a pergunta em questão, abordando uma das questões mais polêmicas na biologia. Essa recombinação pode ocorrer entre indivíduos da mesma espécie, de espécies aparentadas propiciando geração de híbridos férteis, ou ainda entre espécies completamente diferentes⁴.

Por exemplo, a recombinação entre os genes de vírus com genes bacterianos, envolvendo a geração de bactérias descendentes também poderia ser chamado de sexo? Seria

esse o sexo primordial?⁴

Em outras palavras, quando a bactéria consegue ludibriar a ação do vírus em infectá-la com seu RNA ou DNA para produzir novos vírus ela pode incorporar os genes deste, adquirindo assim uma maior variabilidade genética que pode contribuir no pool genético da população. A recombinação entre os genes virais e bacterianos podem produzir linhagens de bactéria mais resistentes a novas infecções⁴.

Além disso, as bactérias realizam a conjugação: quando ocorre a passagem de DNA na forma de plasmídeo¹⁰ de uma célula doadora para uma receptora. As bactérias doadoras de DNA são denominadas bactérias do tipo masculino e as receptoras são consideradas como bactérias do tipo feminino^{4,7}.

Porém, como não há aumento no número de células bacterianas, não se pode considerar esse fenômeno como uma forma de reprodução sexuada típica. Entretanto, esse processo gera variabilidade genética nas bactérias que pode ser passada para as próximas gerações e, por isso, tem sido considerado por muitos autores como o sexo mais rudimentar existente na natureza⁴.

Como surgiu o sexo?

Acredita-se de que o sexo surgiu devido à necessidade dos microrganismos - como bactérias - de reparar danos que naturalmente ocorrem no seu material genético, durante a replicação do DNA, ou para corrigir mutações no genoma acumuladas ao longo sua vida. Esses mecanismos, classificados como sexo sub-celular, englobam duas hipóteses (Quadro 1)^{3,4,7}.

Quadro 1 - Hipóteses sobre a origem do sexo.

Hipóteses	Definições
Parasitismo	- o sexo originou-se da relação parasito-hospedeiro entre vírus e bactérias, ou seja: a partir do fenômeno de mistura entre o genoma de uma bactéria (organismo hospedeiro) e o de um vírus (organismo que parasitaria o sistema de replicação das informações genéticas da bactéria – o retrovírus).
Conjugação	- o sexo foi uma evolução do processo de trocas de material genético entre as bactérias que realizam conjugação, com o objetivo de corrigir as mutações - perdas ou ganhos indesejáveis de informação genética.

Assim sendo, o aparecimento do sexo esteve primeiramente relacionado ao reparo do material genético por meio da incorporação de DNA existentes fora das células ou da transferência de material genético que ocorre entre microrganismos bactérias, por exemplo). Desse modo, o sexo "primitivo" teria uma função conservativa, responsável exclusivamente por corrigir erros existentes no material genético^{4,11}.

Consequentemente, a evolução do sistema de enzimas que reparam os ruídos que apare-

cem na transmissão da informação genética, também conhecido como Sistema SOS, seria um resultado do aparecimento de mecanismos que promovem a troca de material genético entre indivíduos^{4,9}.

Numa etapa posterior, do processo evolutivo, com aparecimento dos seres eucariotos¹² (com núcleo) e gonocoristos (com sexos separados – macho e fêmea), a reprodução sexuada envolve recombinação genética através da fusão dos gametas e do pareamento somente de cromossomos homólogos para certas espécies e também pela reunião de cromossomos sexuais (X e Y ou Z e W) para outras espécies¹³.

Qual é a função do sexo?

O sexo teria uma função conservativa entre os procariotos e uma função evolutiva entre os eucariotos?^{4,14,15}. Em outras palavras o sexo traria a redução na variabilidade genética em bactérias, porém a ampliação desta variabilidade em seres unicelulares e pluricelulares? Entretanto, essa ideia pluralista não foi bem aceita⁴ e, em consequência, várias hipóteses sobre a função do sexo tem sido relacionadas aos argumentos genéticos e ecológicos (Quadro 2)^{3,7,1,13,14}.

O envolvimento do sexo na replicação de informação genética levou à elaboração da Hipótese da Variabilidade, que é a mais aceita na literatura, principalmente entre os adeptos da teoria selecionista, que se baseia nas ideias de Darwin e na escola do neodarwinismo^{3,4,7,13,14}.

Quadro 2 - Hipóteses com argumentos genéticos sobre as vantagens do sexo.

Hipóteses	Definições
Variabilidade	- O sexo traria vantagens por acarretar variabilidade genética entre os seres, pois através da meiose há produção de uma gama de gametas diferentes entre si quanto ao DNA que podem gerar indivíduos geneticamente distintos.
Reparo	- O sexo tem como principal função promover, de modo "exógeno", correções aos erros (mutações) que foram incorporados no material genético durante a transmissão da informação (duplicação do DNA para produzir os gametas e crossing over que promove a recombinação dos cromossomas durante o pareamento destes - processos esses que ocorrem durante a meiose).

A Hipótese da Variabilidade e a Hipótese do Reparo já foram exaustivamente discutidas na literatura desde 1980 quando houve expansão dos conhecimentos em biologia molecular^{3,4,13,14,15}. Enquanto a primeira afirma que o sexo tem como função promover a variabilidade genética dos organismos, a segunda defende a ideia de o sexo promove a conservação do código genético^{12,13,16,17}.

De acordo com a segunda hipótese, os erros que não foram corrigidos pelos mecanismos

de reparos endógenos, como o Sistema SOS que envolve a ação da polimerase III para recompor trechos DNA que foram lesados ou pela ação das mutases que são polimerases presentes em células de eucariotos, só poderiam ser reparados (removidos da população) através da reprodução sexuada^{3,4,13,14,15}. Isto é, somente o encontro de gametas com mutações recessivas, através do “casamento” entre os seres, poderia remover essas mutações da população, tendo em vista que os descendentes seriam inviáveis (não sobreviveriam para se acasalar) ou seriam inférteis (não gerariam descendentes).

Adicionalmente, a Hipótese do Reparo considera que o crossing-over¹⁰ (sobrecruzamento das cromátides homólogas, quando os cromossomos estão pareados) também funcionaria como mecanismo de correção^{3,12,13,14}.

Desse modo, a reprodução sexuada seria uma promotora de remoção da variabilidade genética não adaptativa^{3,13,14,15}. Em outras palavras, os organismos com códigos genéticos não reconstituídos pelos mecanismos bioquímicos ou portadores de certos tipos de erros (mutações⁶) provavelmente terão seus genes finalmente eliminados da população através do sexo.

Como o DNA é corrigido?

As células têm uma variedade de estratégias para prevenir mutações: as mudanças permanentes na sequência de DNA. As estratégias envolvem mecanismos de verificação e reparo dessa molécula, promovendo a auto correção (Quadro 3)¹⁸.

Quadro 3 - Mecanismos que corrigem erros que ocorrem durante a replicação do DNA e para reparar os danos do DNA durante a vida da célula.

Mecanismos	Como ocorre?
Revisão	- Durante a síntese de DNA, a maioria das polimerases do DNA “checa seu trabalho”, consertando a maioria de bases não pareadas em um processo chamado revisão. Se a polimerase detecta que um nucleotídeo errado (incorretamente pareado) foi adicionado, ela irá removê-lo e o substituí-lo imediatamente, antes de continuar com a síntese de DNA.
Reparo do pareamento errado	- Imediatamente após a síntese de DNA, qualquer base mau pareada restante pode ser imediatamente detectada e substituída em um processo chamado reparo por mau pareamento. Isso acontece logo após o novo DNA ter sido feito, e sua função é remover e substituir as bases mal pareadas (aquelas que não foram corrigidas durante a revisão). O reparo do mau pareamento também pode detectar e corrigir pequenas inserções e deleções que ocorrem quando as polimerases “deslizam” perdendo seu local de inserção na fita.

Reparos adicionais	- Se o DNA fica danificado, pode ser reparado por vários mecanismos, incluindo química reversa (algumas reações químicas danosas ao DNA podem ser diretamente “desfeitas” por enzimas na célula); reparo de excisão de bases (dano a uma ou poucas bases do DNA é frequentemente corrigido por remoção e substituído da região danificada); reparo por excisão de nucleotídeos (como no reparo do mau pareamento que vimos acima, é removido um retalho de nucleotídeos); e reparo de quebras de fita dupla (duas vias principais, a de união das extremidades não homólogas e a recombinação homóloga são utilizadas na correção de quebras de dupla fita de DNA, isto é: quando um cromossomo inteiro se divide em duas partes).
---------------------------	--

As hipóteses que versam sobre as vantagens ecológicas do sexo entendem os processos que dariam vantagens à reprodução sexuada considerando: o eixo espaço físico (condições geográficas num determinado tempo – Banco de Emaranhado^{3,4}, tradução literal de Tangled Bank^{15,20}; ou o eixo tempo (condições ambientais ao longo do tempo num determinado local – Rainha Vermelha, tradução literal de Red Queen. Essas ideias também são consideradas contraditórias (Quadro 4)^{3,4,13,14,15}.

A escolha do termo Tangled Bank originou-se do livro de Charles Darwin^{3,14}, A origem das espécies²² que foi publicado em 1859 com o título “On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life” (Da Origem das Espécies por Meio da Seleção Natural ou a Preservação de Raças Favorecidas na Luta pela Vida).

O trecho que inspirou do nome da Hipótese Banco de Emaranhado foi:

“É interessante contemplar um riacho luxuriante, atapetado com numerosas plantas pertencentes a numerosas espécies, abrigando aves que cantam nos ramos, insetos variados que voitam aqui e ali, vermes que rastejam na terra úmida, se se pensar que estas formas tão admiravelmente construídas, tão diferentemente conformadas, e dependentes umas das outras de uma maneira tão complexa, têm sido todas produzidas por leis que atuam em volta de nós. Estas leis, tomadas no seu sentido mais lato, são: a lei do crescimento e reprodução; a lei da hereditariedade que implica quase a lei de reprodução; a lei de variabilidade, resultante da ação direta e indireta das condições de existência, do uso e não uso; a lei da multiplicação das espécies em razão bastante elevada para trazer a luta pela existência, que tem como consequência a seleção natural, que determina a divergência de caracteres, a extinção de formas menos aperfeiçoadas.” (Darwin, 1859, p. 554)²⁰.

A denominação Hipótese Red Queen (Rainha Vermelha)⁷ baseou-se na pitoresca história Alice no País das Maravilhas, de Lewis Carroll, publicada em 1871^{3,7,14,15,19,21}. No País das Maravilhas, a Rainha Vermelha ordenou que Alice “corresse o mais rápido possível para permanecer no mesmo lugar”. Em outras palavras, essa hipótese propôs que os organismos devem estar em constante mudança genética para garantir sua existência através do tempo.

Quadro 4 - Hipóteses com argumentos ecológicos sobre as vantagens do sexo.

Hipóteses	Definições
“Tangled Bank” (Banco de Emaranhado)	- O sexo tem como principal vantagem permitir que diferentes organismos se acomodem num mesmo ambiente, cujos recursos são escassos (ambiente saturado).
“Red Queen” (Rainha Vermelha)	- O sexo existiria para capacitar o organismo a modificar seu genoma a cada geração, a fim de vencer a corrida contra os antagonistas biológicos (parasitos).

Embora proponham diferentes formas de interação, representando duas opiniões sobre as vantagens adaptativas da variabilidade genética e por isso serem tratadas como hipóteses antagonistas¹⁸ para explicar a Função do Sexo, elas não são excludentes entre si⁴, isto é, uma não invalida a outra e podem ser complementares quando se estuda populações sexuadas e assexuadas em duas situações: num determinado local ao longo do tempo (situação 1) ou em vários local num único período (situação 2)³.

A primeira hipótese (Banco de Emaranhado) refere-se às vantagens adaptativas diante da heterogeneidade existente no ambiente num dado tempo, tratando especialmente da competição pelos recursos limitantes, tais como alimento; áreas iluminadas; substrato para fixação; locais para construção de ninhos, entre outros. Assim, as espécies que se reproduzem sexuadamente teriam mais vantagens que aquelas que se reproduzem assexuadamente. Isto é, aquelas que se reproduzem assexuadamente geram descendentes semelhantes que competem pelos mesmos recursos do ambiente. O mesmo ocorreria, porém de forma mais atenuada, para aquelas espécies que se reproduzem sexuadamente, pois seus descendentes são, em termos genéticos, menos semelhantes entre si e por isso não competem pelos mesmos recursos ambientais em 100% dos casos^{3,4,15,16}.

A segunda hipótese (Rainha Vermelha) refere-se às vantagens adaptativas diante da heterogeneidade existente ao longo do tempo num dado ambiente, tratando, especialmente, da ação seletiva de parasitos sobre seus hospedeiros e da capacidade destes em expressar contra-ataques (defesas físicas como a remoção mecânica do parasito, defesas fisiológicas como a imunidade²³ e estratégias de escape). Essa hipótese é a mais aceita entre os autores que estudam a evolução do sexo¹⁹, muito embora muitos ecólogos ainda tratem a hipótese Banco de Emaranhado com válida.

Em conclusão, embora a predominância da reprodução sexuada pareça ser paradoxal sob o ponto de vista energético, o sexo reina, principalmente entre os eucariotos¹¹ e, indubitavelmente, é impulsionadora no processo evolutivo das espécies, trazendo ou não a conservação do código genético, em diferentes ambientes e ao longo do tempo^{4,19}.

Finalizo com a passagem do livro “Evolution: the triumph of an Idea”, de Carl Zimmer²⁴, publicado em 2001:

“Sexo não é somente desnecessário, como também um caminho desastroso para a evolução. Além do mais, é uma ineficiente forma de se reproduzir. [...] Entre outras coisas, o sexo traz outros custos adicionais. [...] Certamente, qualquer animal que se reproduz sexualmente deve estar preparado para competir com aqueles que se reproduzem assexuadamente. E, mesmo assim, o sexo reina. Por que o sexo é um sucesso, apesar de todas as suas desvantagens?”

* A autora escreve na variante brasileira do português.

REFERÊNCIAS

- ¹ LOPES, A. J., [O primata perverso polimorfo](#). *Estud. Psicanal.* 40, 21, 2013. acesso em fevereiro 2018
- ² MOREIRA, C., [Reprodução sexuada](#), *Rev. Ciência Elem.*, 2, 201, 2014. acesso em fevereiro 2018.
- ³ MOREIRA, C., [Reprodução assexuada](#), *Rev. Ciência Elem.*, 2, 199, 2014. acesso em fevereiro 2018.
- ⁴ MICHOD, R. & LEVIN, B. R., *The evolution of sex*. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates Publishers, 1988.
- ⁵ LIMA, N. R. W., *Precisamos do sexo?* EDUFF, Niterói, RJ, Brasil, 2015.
- ⁶ MOREIRA, C., [Doenças genéticas](#), *Rev. Ciência Elem.*, 3, 027, 2015. acesso em fevereiro 2018.
- ⁷ MOREIRA, C., [Mutação](#), *Rev. Ciência Elem.*, 2, 101, 2014. acesso em fevereiro 2018.
- ⁸ GOULD, J. L. & GOULD, C. G., *Sexual selection*. New York: Scientific American Library, 1989.
- ⁹ MOREIRA, C., [Bacteriófago](#), *Rev. Ciência Elem.*, 3, 203, 2015. acesso em fevereiro 2018.
- ¹⁰ MOREIRA, C., [Plasmídeo](#), *Rev. Ciência Elem.*, 3, 114, 2014. acesso em fevereiro 2018.
- ¹¹ MOREIRA, C., [Crossing-over](#), *Rev. Ciência Elem.*, 2, 142, 2014. acesso em fevereiro 2018.
- ¹² MOREIRA, C., [Célula](#), *Rev. Ciência Elem.*, 2, 94, 2014. acesso em fevereiro 2018.
- ¹³ MOREIRA, C., [Determinação do Sexo](#), *Rev. Ciência Elem.*, 1, 73, 2013. acesso em fevereiro 2018.
- ¹⁴ BERNSTEIN, H. *et al.*, [DNA repair and complementation: The major factors in the origin and maintenance of sex](#). In: Halvorson, H. O.; Monroy, A., eds. *The origin and evolution of sex*. New York: Alan R. Liss, 1985. acesso em fevereiro 2018
- ¹⁵ BERNSTEIN, C. & JOHNS, V., [Sexual reproduction as a response to H₂O₂ damage in *Schizosaccharomyces pombe*](#). *J. Bacteriol.*, 171, 1893, 1989.
- ¹⁶ LIMA, N. R. W., História evolutiva do sexo. In: Passos, M. R., ed., *Deesetologia*, DST 5, Cultura Médica, Rio de Janeiro, RJ., 9, 2005.
- ¹⁷ OTTO, S., [Sexual reproduction and the evolution of sex](#). *Nat. Educ.*, 1, 182, 2014. acesso em fevereiro 2018.
- ¹⁸ [Verificação e reparo do DNA](#). acesso em fevereiro 2018.
- ¹⁹ MOREIRA, C., [Replicação](#), *Rev. Ciência Elem.*, 2, 96, 2014. acesso em fevereiro 2018.
- ²⁰ SONG, Y., *et al.*, [Tangled Bank dismissed too early](#). *Oikos*, 120, 2011. acesso em fevereiro 2018.
- ²¹ FONSECA, C. R. [Sexo, plumas e parasitas](#). *Ciência Hoje*, Número: 155, nov, 1999. acesso em fevereiro 2018.
- ²² DARWIN, C., [A origem das espécies](#). Lello & Irmão – Editores, 2003. acesso em fevereiro 2018.
- ²³ MOREIRA, C., [Imunidade](#), *Rev. Ciência Elem.*, 1, 006, 2013. acesso em fevereiro 2018.
- ²⁴ ZIMMER, C., *Evolution: The triumph of an idea*. [S. l.]: Harper Hardcover, 2001.