



A evolução do sexo nos eucariontes

Paulo G. Hofstatter¹, Daniel J. G. Lahr²

¹Bacharel e licenciado em Ciências Biológicas e pós-doutorando da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto/USP

²Professor Livre-Docente do IB/USP

Autor para correspondência - paulogh@usp.br

Palavras-chave: eucariontes, meiose, sexo, recombinação

O sexo é um atributo fundamental dos eucariontes. Os processos sexuais formam um ciclo que inclui o encontro e a fusão de células haploides com a formação de uma célula diploide e a divisão celular meiótica em um segundo momento deste ciclo, restaurando a condição haploide. Durante a meiose, os cromossomos homólogos são recombinados e grandes partes de seu material genético são trocadas aleatoriamente. Ao final do processo, novas combinações genéticas são formadas. Tal processo não é exclusivo de animais e plantas, mas é compartilhado por toda a diversidade de organismos eucariontes, o que indica que o processo já estava presente no ancestral de todos eles. Veremos também que sexo e reprodução são fenômenos distintos, os quais podem estar atrelados entre si ou não, dependendo do organismo.

Classificando a vida: ontem e hoje

Um rápido passeio ao ar livre permite ao observador avistar uma grande diversidade de organismos; uma diversidade ainda maior se esconde de nossos olhos por causa de sua natureza microscópica. Tamanha variedade de formas e hábitos de vida se constitui como um grande desafio para a compreensão humana, que necessita organizar os seres vivos em grupos para melhor compreendê-los.

Desde o século XVIII tenta-se classificar a diversidade dos seres vivos em um esquema organizado, como o proposto por Lineu. Apesar de antiga, a proposta lineana permanece até os dias de hoje, uma vez que o sistema binomial de nomenclatura mantém seu uso corrente e o senso comum ainda divide os organismos em animais e plantas. Além disso, Lineu propôs um sistema sexual de classificação das plantas. O que não se imaginava na época, porém, é que os processos sexuais são universais entre os seres vivos (Ver quadro: “O Sexo”).

O sexo

O entendimento do que é sexo tem mudado com o passar do tempo. No linguajar comum, sexo é visto como encontro ou ato sexual. Esta visão predomina na Zoologia como um todo. Um outro significado do termo “sexo” é a existência de características anatômicas, comportamentais e fisiológicas que diferenciam animais de uma mesma espécie entre machos e fêmeas, que são definidos como os indivíduos que produzem os gametas menores ou maiores, respectivamente.

No que diz respeito às plantas angiospermas, as flores são interpretadas como estruturas sexuais há muito tempo, mas ainda é estranho para muita gente pensar que plantas “fazem sexo” toda vez que polinizadores entram e saem das flores. Em Genética, o termo sexo tem sido usado para se referir a uma “troca” de material genético, fazendo referência à recombinação que ocorre no *crossing-over* da meiose, além da combinação aleatória de cromossomos que farão parte dos gametas a serem produzidos, após a segregação meiótica. Neste artigo, referimo-nos a sexo como um evento de recombinação de DNA genômico que ocorre por ocasião da meiose, um processo característico dos eucariontes. É importante também ressaltar que sexo e reprodução são processos distintos e não precisam estar atrelados, mas que coincidem em animais e plantas. Reprodução significa simplesmente o aumento do número de indivíduos, o que pode ser independente de sexo e recombinação de DNA.

No século XIX, com o estabelecimento das teorias evolutivas, especialmente da evolução darwiniana, ocorre uma mudança de paradigma com a transição de uma concepção

fixista (espécies fixas desde algum tipo de “criação”) da natureza para uma concepção transmutacionista (transformação das espécies ao longo do tempo). Consequentemente,

conclui-se que a classificação dos organismos deveria refletir de alguma forma os graus de parentesco entre os organismos, os quais derivam de ancestrais hipotéticos em comum. Por exemplo, a classificação de Haeckel não se resume a demonstrar relações putativas de parentesco entre os mais diversos seres vivos, mas propõe a criação do novo reino Protista, junto com os já consagrados Animalia e Plantae. Neste caso, o reino Protista contém todos os organismos que não se encaixam entre as plantas ou entre os animais.

No século XX, surge a proposta de classificação dos organismos em cinco reinos idealizada por Robert Whittaker em 1969, e que é a mais ensinada no ensino básico dentre os esquemas de classificação até hoje. Tal classificação contém os seguintes grupos: Monera (“bactérias”), Protista (protozoários e algas), Plantae, Fungi e Animalia (Figura 1a). Tal classificação foi baseada na presença de núcleo celular, ocorrência de multicelularidade e modos de nutrição de cada linhagem. A classificação de Whittaker foi profundamente alterada pelas descobertas de Woese e colaboradores ainda na década de 1970. A possibilidade do sequenciamento do DNA que codifica o RNA ribossômico, o qual está presente em todos os seres vivos, e a sua comparação com a finalidade de classificá-los abriu caminho para o estabelecimento dos assim-chamados três domínios: Archaea, Bacteria e Eukarya (Figura 1b). Eukarya foi, nessa época, entendido como um grupo resultante de um processo de **endossimbiose** entre uma linhagem de Archaea e uma Bactéria, as quais se associaram há mais de um bilhão de anos e estabeleceram uma linhagem **fagocítica** extremamente bem-sucedida e diversa, os **eucariontes**.

Endossimbiose - processo de aquisição de uma célula bacteriana por um eucarionte, o qual levou ao estabelecimento da mitocôndria, observada na imensa maioria das células eucarióticas. Os cloroplastos de plantas e algas diversas também foram adquiridos por processos semelhantes.

Eucariontes - linhagem de organismos compostos por células complexas, cujo material genético (DNA) se encontra individualizado em um núcleo revestido por uma membrana com poros; adicionalmente há organelas como a mitocôndria e os cloroplastos, entre outras.

S.A.R. - Abreviação de Stramenopila, Alveolata (Ciliophora, Dinoflagellata e Apicomplexa) e Rhizaria. Trata-se de um supergrupo com megadiversidade e aparentemente monofilético.

Fagocítica - característica dos tipos celulares que realizam fagocitose, ou seja, são capazes de englobar outras células ou material particulado.

Filogenômica - construção de árvores a partir de alinhamentos de dezenas ou centenas de sequências de nucleotídeos ou aminoácidos concatenadas numa única matriz de dados.

Excavata - agrupamento de organismos flagelados; provavelmente não-monofilético.

Classificando os eucariontes

No que diz respeito aos eucariontes e à classificação de sua imensa diversidade de formas e linhagens, esforços têm sido feitos no sentido de se organizar os diversos grupos conhecidos a partir de prováveis relações entre si. Um dos critérios mais importantes para a definição de grupos em um primeiro momento foi o padrão de ocorrência de eventos de endossimbioses primárias e secundárias ao longo da evolução dos eucariontes. Grandes rearranjos foram realizados e mesmo grupos aparentemente bem estabelecidos, como Fungi, passaram por modificações intensas quanto à sua classificação. Classificações mais modernas são baseadas em técnicas de **filogenômica**. Dessas análises resultaram os supergrupos: ‘**Excavata**’ (Heterolobosea, Metamonada e Euglenozoa), Amoebozoa, Opisthokonta (Fungi, Metazoa, Choanoflagellata), Archaeplastida (Viridiplantae, Rhodophyta, Glaucophyta), Cryptista, Haptista, Centrohelida e **S.A.R.** (Rhizaria, Stramenopila, Ciliophora, Apicomplexa, Dinoflagellata) (Figura 1c).

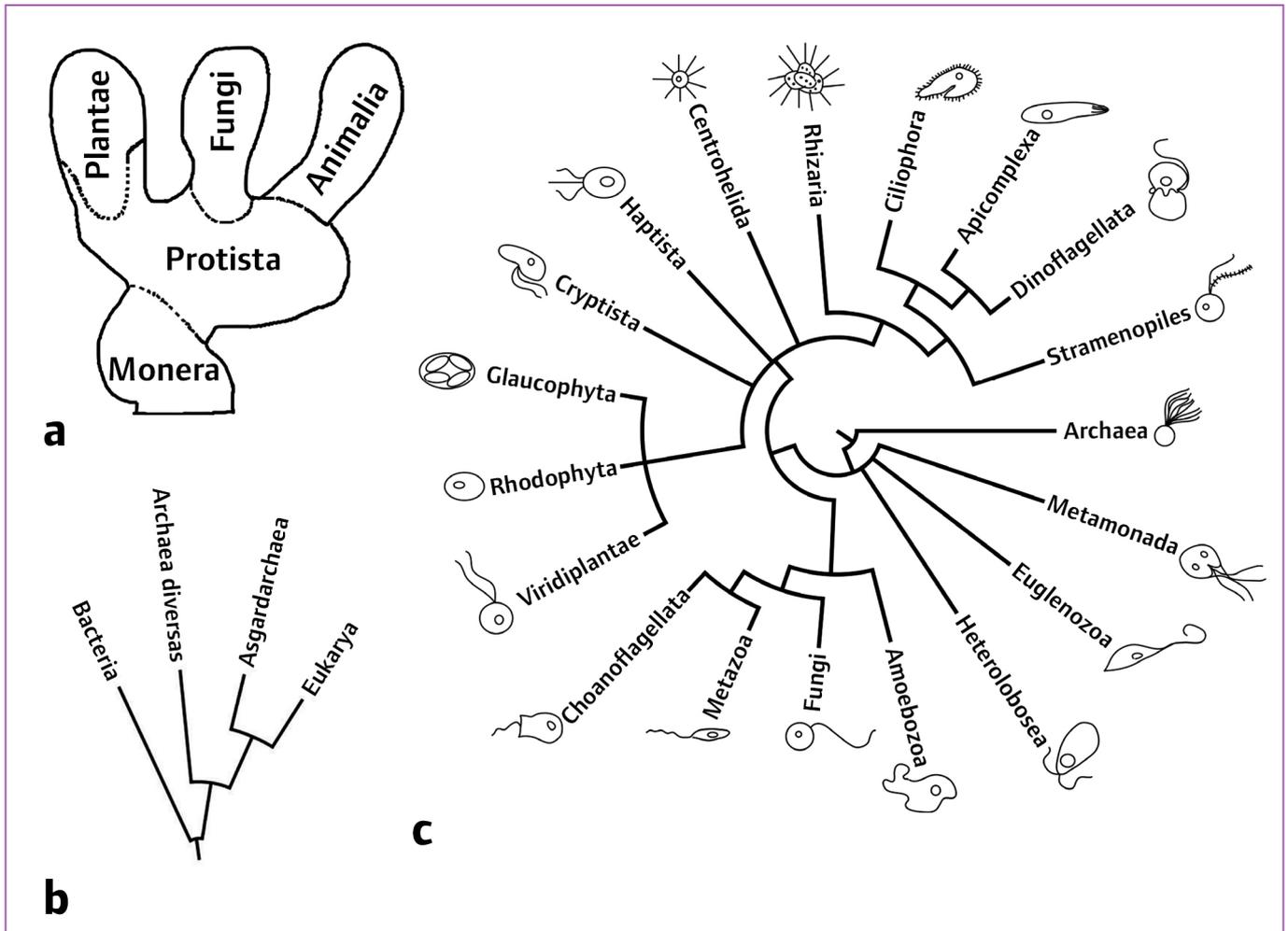


Figura 1. Distribuição dos grandes grupos de eucariontes: processos sexuais (como a meiose) estão presentes em praticamente todos os grupos de eucariontes. A ampla distribuição de processos sexuais nas mais diversas linhagens atuais indica que o ancestral de todos os eucariontes já era capaz de realizar processos sexuais. **a)** Antiga classificação em cinco reinos de Whittaker (1969); Monera inclui Bacteria e Archaea. **b)** Posição dos eucariontes (Eukarya) dentro de Archaea (Archaea diversas + Asgardarchaea). **c)** Principais grupos de eucariontes. Metazoa corresponde aos animais multicelulares e Viridiplantae corresponde às plantas.

Cisto - forma dormente de resistência, capaz de proteger fisicamente o organismo e evitar perda de água. Cistos são geralmente envoltos em uma parede rígida e a célula cessa todos ou quase todos seus processos usuais. Cistos estão muitas vezes associados à ocorrência de meiose.

Alguns elementos básicos permeiam toda a diversidade da vida eucariótica: presença de núcleo, processos de fagocitose, presença de mitocôndrias, flagelos, formação de **cistos** e ocorrência de sexo. Sendo assim, o ancestral hipotético de todos os eucariontes seria um organismo com mitocôndria, provavelmente biflagelado e sexual, além de apresentar uma membrana nuclear, realizar fagocitose como forma de nutrição e com capacidade de formar cistos em situações adversas. No entanto, diversas linhagens tiveram suas mitocôndrias reduzidas (por exemplo, os parasitas anaeróbicos *Giardia*, *Entamoeba* e *Cryptosporidium*); algumas linhagens perderam os flagelos (muitas amebas, algas vermelhas, a maioria dos fungos e as angiospermas); a meiose, porém, parece nunca ser perdida. A ocorrência de processos sexuais em particular sempre foi tratada na literatura sobre evolução do sexo como uma questão de difícil solução: como poderia um processo que aparentemente não oferece nenhuma vantagem evolutiva imediata e que se mostra dispendioso do ponto de vista energético ter sido favorecido pela seleção natural e ser tão persistente ao longo da evolução dos eucariontes?

Os eucariontes e o sexo

A questão da evolução do sexo já foi abordada oportunamente por muitos autores, mas geralmente dentro de uma perspectiva zoocêntrica/antropocêntrica. Em animais, sexo e reprodução são processos intimamente relacionados e coincidentes na maior parte do tempo; no entanto, na maioria dos eucariontes, sexo e reprodução não estão relacionados. O viés zoocêntrico de análise levou ao surgimento de expressões como **reprodução assexuada** em oposição à **reprodução sexuada**. Fora do contexto da Zoologia (ou da Botânica), tais expressões não fazem sentido – afinal, reprodução diz respeito ao aumento do número de indivíduos e sexo é entendido evolutivamente como um fenômeno que promove a reorganização genômica. Em suma, são fenômenos distintos.

Adicionalmente, alguns grupos de protozoários têm sido usados como exemplos de eucariontes assexuados ou, simplesmente, têm sido apresentados como seres assexuados indiscriminadamente. Entre os principais

exemplos de eucariontes assexuados pode-se notar a presença de amebas como um modelo de ciclo de vida que não inclui qualquer processo sexual, criando um paradigma, inclusive entre especialistas, de que estes organismos são assexuados. Isto se dá, em grande parte, pela dificuldade de se observar processos sexuais (como a meiose) em certos grupos de amebas. Inversamente, processos sexuais podem ser facilmente observados em outros grupos de protistas, como ciliados, Apicomplexa (plasmódio e toxoplasma) e muitas algas. Porém, os processos sexuais de representantes de Apicomplexa são muitas vezes omitidos em representações de seus ciclos de vida, nos quais a meiose é chamada de “esporogonia”. Adicionalmente, os processos sexuais de ciliados recebem o nome de “conjugação”, um termo também empregado para processos observados em bactérias, que não realizam meiose. A conjugação dos ciliados não tem relação com a conjugação bacteriana e o mesmo termo serve para se referir a processos diferentes. No caso dos ciliados envolve meiose e sexo com troca de núcleos haploides entre as células em contato, um processo ausente em bactérias, as quais não realizam meiose, mas trocam material genético

Reprodução assexuada

- aumento do número de indivíduos sem a ocorrência de processos sexuais. Exemplos incluem a partenogênese em abelhas, vespas e outros animais, brotação em cnidários, formação de mudas de plantas (que são clones entre si) ou reprodução por simples mitose em organismos unicelulares, como ocorre em algas e protozoários diversos.

Reprodução sexuada

- aumento do número de indivíduos formados com a ocorrência de processos sexuais; termo usado predominantemente em zoologia.

A meiose eucariótica

A meiose é um processo exclusivo dos eucariontes. As principais etapas do processo são altamente conservadas nas mais diversas linhagens eucarióticas. Uma vez alinhados, os cromossomos homólogos são ligados por uma estrutura proteica semelhante a um zíper (o complexo sinaptonemal ou sinaptonema) e tal estrutura mantém os homólogos alinhados entre si. As quebras de dupla-fita de DNA são produzidas por uma maquinaria que contém enzimas específicas da meiose. O dano provocado no DNA recruta uma maquinaria de reparo por homologia e força a recombinação dos cromossomos homólogos de forma coordenada. Durante a recombinação ocorre a formação de quiasmas (conexões físicas entre cromossomos), os quais são resolvidos normalmente por uma maquinaria também específica da meiose. Os cromossomos homólogos são separados aleatoriamente com resultante redução da ploidia da célula, sendo que a ocorrência dos pontos de recombinação ajuda a organizar a correta distribuição de cromossomos para as células resultantes. A coesão entre as cromátides-irmãs é desfeita na segunda divisão da meiose para que sejam também separadas, resultando em quatro células ou quatro núcleos haploides. Como resultado, a meiose pode produzir gametas, esporos, cistos de resistência ou outros produtos.

Mesmo nos meios de protistologistas, prevalecem visões de que alguns grupos de eucariontes seriam sexuais (ciliados, Apicomplexa, algumas algas verdes, as plantas terrestres, algumas algas vermelhas, algas

pardas, muitos fungos e animais) e que outros grupos seriam assexuados (amebas diversas, euglenas, flagelados, algas diversas unicelulares e outros). Grupos mais estudados tendem a ser representados como

grupos sexuais, ao passo que grupos menos estudados e unicelulares tendem a ser representados como assexuais. Tendo em vista as prováveis relações entre as diferentes linhagens de eucariontes entre si, a visão de que grupos sexuais e assexuais estariam espalhados pela árvore dos eucariontes sem nenhum padrão claro desafiaria a lógica.

Um ancestral sexuado para todos os eucariontes já foi proposto a partir dos padrões de distribuição de processos sexuais nas diferentes linhagens. Nesta ocasião, a expressão “sexuado facultativo” foi empregada para se referir a organismos que apresentam seus processos sexuais desatrelados da reprodução, como seria predominante nos eucariontes, à exceção da maioria dos animais, plantas terrestres e algas vermelhas. Tal expressão é vazia, uma vez que sexo e reprodução são processos não relacionados no ciclo de vida da maioria dos eucariontes e, quando o são, isso se deve a limitações impostas aos processos sexuais pela ocorrência de multicelularidade em determinados grupos. Novamente, nota-se a influência da visão zoológica no entendimento acerca do sexo em eucariontes. Sendo assim, pode-se sugerir que expressões como “reprodução sexuada”, “reprodução assexuada” e “sexuado facultativo” sejam evitadas ou deixem de ser usadas fora do contexto específico da zoologia; na realidade, a expressão “sexuado facultativo” não faz sentido algum. Além de vazias e não informativas, tais expressões reforçam a ideia incorreta de uma associação obrigatória entre sexo e reprodução. O sexo pode ser entendido como um processo de recombinação de cromossomos e reparo de DNA; a reprodução, como um processo de multiplicação, aumento do número de indivíduos de uma população ou espécie.

Os processos sexuais em eucariontes parecem obedecer a algumas linhas gerais (Figura 2). Geralmente, processos sexuais são desencadeados por estímulos ambientais que provoquem algum tipo de estresse nos organismos implicados. A ocorrência de sexo em períodos de estresse e incerteza reforça a noção de que o sexo é importante adaptativamente por possibilitar novas combinações de caracteres genéticos. Tais combinações

novas favoreceriam alguns indivíduos permitindo-lhes um maior poder de adaptação às novas condições do ambiente ou a mudanças nas pressões de seleção sobre os organismos. Nota-se, adicionalmente, uma associação entre meiose e a formação de cistos ou esporos de resistência em muitos grupos. Para isso, pode-se apontar inúmeros exemplos, nos quais a meiose ocorre dentro de cistos de resistência: Apicomplexa, Amoebozoa, Fungi, dinoflagelados, algas verdes etc. Tal padrão é sugestivo de que o cisto é uma característica ancestral e sempre esteve associado à meiose. Outro fator associado a processos sexuais é a presença de flagelos. Alguns grupos apresentam flagelos somente em **gametas** – produzidos por meiose – e em nenhuma outra parte de seus ciclos de vida. Exemplos desta associação podem ser vistos em: animais, plantas terrestres (briófitas, pteriófitas e cicadáceas), Foraminifera, mixomicetos, algas pardas, Apicomplexa etc.

Outra característica inerente ao sexo é a presença de gametas complementares. Tradicionalmente, os tipos complementares são chamados de feminino e masculino por convenção, o gameta maior e imóvel sendo o feminino e o gameta menor, geralmente móvel, o masculino. A mesma terminologia é empregada para animais e plantas. O sistema de gametas complementares ajuda a impedir a autofecundação (ou fusão entre clones) e força a recombinação entre **genótipos** diferentes, mesmo que o custo disso seja, muitas vezes, o não-encontro e a perda das células. O sistema de determinação de tipos complementares (*mating types*) pode ser observado na maior parte dos eucariontes e provavelmente esteve presente em seu ancestral comum. Tal sistema envolve a participação da proteína de membrana HAP2, a qual é expressa em apenas um dos tipos de gametas independentemente da ocorrência de isogamia ou anisogamia. HAP2 medeia o processo de fusão dos gametas em praticamente todos os grandes grupos de eucariontes. Embora amplamente distribuída em eucariontes, a proteína HAP2 não pôde ser identificada em Archaea e uma suposta origem viral foi atribuída para a proteína, baseada em evidências estruturais.

Gametas – são células haploides com a função sexual de realizar fusão celular e nuclear; em animais, espermatozoides e óvulos são os gametas. Nem todos os organismos apresentam gametas em seus ciclos sexuais, um exemplo sendo os fungos.

Genótipo – uma dada combinação de alelos em um ou diversos locos gênicos.

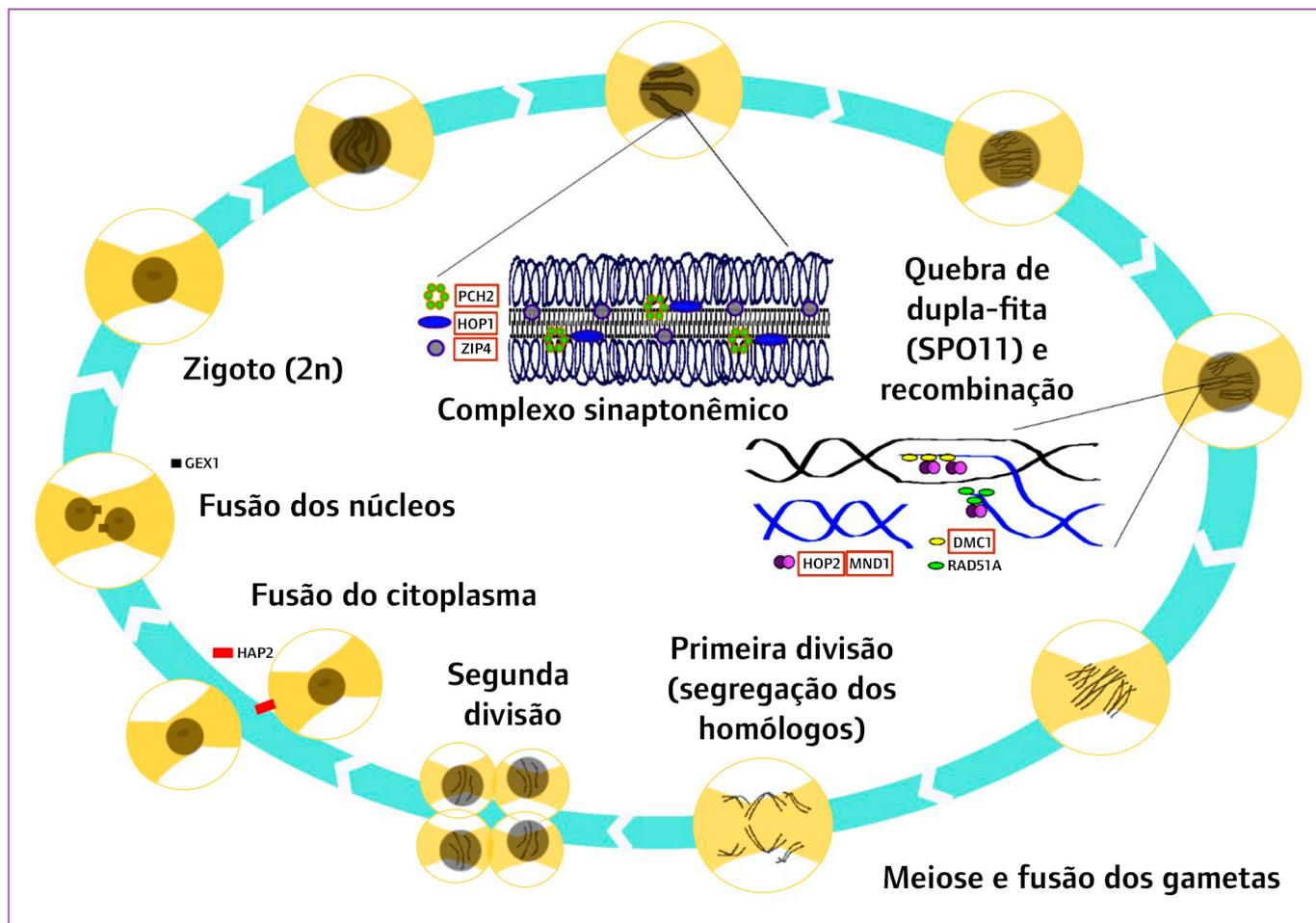


Figura 2.

Meiose e fusão de gametas em eucariontes. Os processos de fusão de citoplasmas e núcleos levam à formação de células diploides, as quais estão aptas a realizar meiose. A meiose é iniciada pela introdução de quebras de dupla-fita de DNA provocadas por enzimas específicas quando os cromossomos homólogos estão alinhados – a formação do complexo sinaptonêmico (*synaptonemal complex*) é um fenômeno exclusivo da meiose. Durante o reparo do DNA danificado no processo, cromossomos homólogos são recombinados. A conexão física entre cromossomos facilita a primeira divisão da meiose (divisão reducional). Após a segunda divisão, quatro células (ou quatro núcleos) são produzidas. Fonte: Figura adaptada de Hofstatter et al., 2018. *Comparative genomics supports sex and meiosis in diverse Amoebozoa*.

Muitas proteínas com função meiótica são específicas da meiose e altamente conservadas ao longo de toda a diversidade eucariótica (SPO11, DMC1, MSH4, MSH5, entre outras). Por causa disso, a presença de sequências genômicas semelhantes aos genes que codificam enzimas participantes do processo de meiose pode ser usada para a detecção de processos sexuais “ocultos” em linhagens de organismos tidos como assexuados e cujo genoma esteja disponível. A abordagem foi inicialmente aplicada a alguns organismos tradicionalmente tidos como assexuados, entre eles *Giardia* e *Trichomonas*, com resultados positivos, ou seja, diversas sequências genômicas semelhantes às das enzimas da meiose foram detectadas nestes protozoários. Resultados positivos como estes abrem a possibilidade de que organismos

tidos como assexuados possam ser encarados como potencialmente sexuados, o que tem implicações evolutivas para a biologia destes grupos. Adicionalmente, pode haver implicações práticas decorrentes do sexo, como no caso de patógenos, já que diferentes cepas do mesmo parasita resistentes a um ou mais medicamentos podem passar por processos sexuais e algumas células podem se tornar duplo-resistentes em um único evento de recombinação. A mera existência de processos sexuais em protozoários parasitas pode representar um desafio para o sistema imune do hospedeiro. Além disso, *Giardia* e *Trichomonas* são linhagens que divergiram há muito tempo dos outros eucariontes e a presença da maquinaria de meiose nestes organismos reforça a noção de um ancestral sexuado para todos os eucariontes.

Os verdadeiros assexuados existem?

A possibilidade de um ancestral eucariótico ser sexuado não significa necessariamente que todos os seus descendentes sejam igualmente sexuados, dada a imensa diversidade dos eucariontes. Algumas linhagens poderiam ter perdido o sexo secundariamente ao longo da história evolutiva dos eucariontes, que se estende aparentemente por mais de um bilhão de anos. Se diversas linhagens puderam ter perdido a mitocôndria ou o flagelo, por que seria o sexo poupado em todos os casos? Uma das maneiras de se responder preliminarmente a esta questão seria a detecção (ou não) da maquinaria meiótica nas mais diversas linhagens conhecidas e amostradas de eucariontes. Dados recentes sugerem que basicamente todos os grandes grupos de eucariontes são ancestralmente sexuados por causa da onipresença da maquinaria meiótica e que os possíveis processos meióticos também são muito conservados. Em suma, estes resultados reforçam a noção de um eucarionte

ancestral sexuado e sugerem a manutenção do sexo em todos os grandes grupos de eucariontes com poucas modificações. No entanto, uma pequena linhagem parece ter perdido a maquinaria meiótica totalmente e, com ela, os processos sexuais como um todo: o gênero de fungos basidiomicetos *Malassezia*, causadores de caspa em humanos e outros animais. Este gênero parece ser um forte candidato para um eucarionte verdadeiramente assexuado. Além de *Malassezia*, um grupo de rotíferos, os Bdelloidea, parece carecer de processos sexuais há milhões de anos, pois machos ou meiose nunca foram observados em séculos de pesquisa (Figura 3). Apesar da literatura tratar Bdelloidea como um grupo assexuado, a recente publicação do genoma de um membro do grupo, *Adineta vaga*, demonstrou que a estrutura de seu genoma é perfeitamente compatível com a ocorrência de processos sexuais, pois a grande semelhança entre os pares de cromossomos homólogos indica que há recombinação entre eles, enfraquecendo a tese de que o grupo seria assexuado. Mas como a literatura tende a considerar ausência de evidência como uma perda do processo em si, o grupo continua sendo tratado como assexuado apesar dos resultados obtidos.



Figura 3.

Um representante de Bdelloidea (Rotifera). Somente fêmeas são conhecidas, machos nunca foram observados. Toda a ordem é tradicionalmente considerada assexuada. Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bdelloidea1_w.jpg.

Como evoluiu a meiose?

Análises genômicas também revelam a origem da maior parte da maquinaria da meiose em Archaea. As proteínas específicas da meiose e que atuam nas diversas etapas do processo são resultado de um amplo processo de duplicação gênica no ancestral eucariótico, com subsequente aquisição de novas funções por parte de **parálogos**. A origem da maquinaria da meiose pode ser vista como um belo exemplo de como os processos de duplicação gênica podem ser importantes para a evolução de novas

características em seres vivos em geral. Parálogos produzidos por duplicação gênica estariam, teoricamente, livres das amarras da seleção natural purificadora e poderiam então adquirir novas funções/subfunções ou se especializar em processos específicos como a meiose, a qual cooptou diversas maquinarias de reparo e manutenção de DNA. Tais processos poderiam ter acontecido antes ou durante a evolução dos primeiros eucariontes como um aprimoramento dos processos de fusão celular e recombinação que podem ser observados em Archaea atualmente, mas que já estariam acontecendo desde uma era que precede a emergência dos eucariontes.

Parálogos - genes homólogos oriundos de processos de duplicação gênica dentro de um mesmo genoma. Podem ser produzidos em massa por processos de poliploidização, ou seja, duplicação completa do genoma.

Mecanismos de duplicação gênica e sua importância

Em sua obra de 1970, *Evolution by gene duplication*, Susumu Ohno descreveu em detalhes processos de duplicação gênica e sua importância para a evolução dos eucariontes. Em tese, duplicações gênicas ocorrem como resultado de falhas em processos celulares básicos, como a replicação do DNA, ocorrência de poliploidização (duplicação do genoma inteiro) ou distribuição incorreta de cromossomos na meiose. Em tese, uma das cópias dos genes duplicados estaria livre da pressão da seleção natural e poderia adquirir novas funções ou ser perdida com o passar do tempo por causa de sua redundância. A ocorrência de duplicações gênicas é relativamente frequente e forneceu um rico material genético para novidades evolutivas nos mais diversos grupos de organismos. Uma das inovações foi o surgimento de uma maquinaria específica para a realização da meiose nos eucariontes.

Uma vez que as maquinarias conservadas de meiose e fusão de gametas podem ser encontradas em todos os grandes grupos, resta a dúvida: se todos os eucariontes são ancestralmente sexuados e conservaram a maquinaria para tal, por que a meiose não é observada em todos os grupos, mas somente em alguns? Mesmo organismos-modelo extensivamente estudados, como *Cyanidioschyzon merolae*, *Galdieria sulphuraria*, *Amoeba proteus*, *Giardia intestinalis*, *Euglena gracilis* e outros, permanecem em ciclos de vida aparentemente mitóticos indefinidamente em cultura. Uma vez que suas maquinarias meióticas conservadas foram evidenciadas, deveria ser somente uma questão de tempo até que seus ciclos de vida fossem completamente descri-

tos. Amebas (Amoebozoa) constituem um interessante exemplo, pois são tipicamente estudadas e entendidas como organismos assexuados, com exceção de um de seus grupos: Myxogastria. Este grupo foi por muito tempo considerado parte de Fungi, sob a denominação de Myxomycota (mixomicetos), e alvo de mais estudos que outros grupos de Amoebozoa como consequência. Como resultado disso, Myxogastria é basicamente o único grupo dentro de Amoebozoa com ciclos sexuais conhecidos e razoavelmente descritos. Tal fato indica que a qualificação de um grupo como assexuado pode ser um artefato da falta de estudos, já que há uma correlação entre falta de estudos e assexualidade. Mesmo em Myxogastria, a demonstra-

ção de processos sexuais é difícil por sua natureza discreta. No artigo da publicação dos resultados preliminares do sequenciamento do genoma de *Physarum*, seu ciclo de vida aparece de forma equivocada, com a meiose sendo apontada nos corpos de frutificação do organismo e não no interior do esporo já liberado, como seria o correto. Outros grupos de Amoebozoa carecem de informações sobre seus processos sexuais por falta de estudos mais detalhados sobre sua biologia. Apesar da aparência de assexuadas, todas as linhagens amostradas de Amoebozoa até o momento apresentam a maquinaria meiótica praticamente completa. Recentemente, demonstrou-se que *Entamoeba* expressa a maquinaria da meiose algumas horas após a formação do cisto de resistência; o cisto maduro termina com a formação de quatro núcleos, o que indica a ocorrência de meiose no interior do cisto.

Assim como Amoebozoa, diversos outros grupos carecem de informações sobre seus ciclos de vida sexuais apesar da presença de maquinaria meiótica. Isso se deve em grande parte por falta de estudos. Mas como poderiam ter seus processos sexuais revelados? Diversas abordagens experimentais podem ser empregadas para revelar mais informações acerca de seus processos sexuais. Uma abordagem possível consiste em expor os organismos a diferentes tipos de estresse, já que processos sexuais e, especialmente a meiose, podem ser desencadeados por estresse. Alternativamente, já que prevalece em eucariontes um sistema de gametas complementares, culturas monoclonais devem ser evitadas, porque a maioria das linhagens de eucariontes aparentemente não realiza autofecundação; diferentes culturas da mesma espécie podem também ser misturadas para se obter fusão de células. Assumindo que a meiose está associada a cistos de resistência, atenção especial deveria ser dedicada aos cistos. Dada a imensa diversidade de formas e processos em eucariontes, é possível que a meiose ocorra de formas um pouco diversas àquelas observadas em animais, plantas

e fungos. Neste caso, a meiose poderia ser confundida com duas mitoses sequenciais. Para se demonstrar a meiose neste caso específico, seria necessário o emprego de técnicas de cariótipo: a contagem do número de cromossomos em diferentes momentos do ciclo de vida pode expor processos de redução do número de cromossomos e uma transição de um estado diploide para um estado haploide.

Conclusão

Em suma, um aprofundamento dos estudos sobre sexo, meiose e sua maquinaria molecular em diferentes grupos de organismos pode revelar histórias naturais ainda desconhecidas. É importante um distanciamento da visão zoológica, já que o conhecimento sobre ciclos de vida de animais pode contribuir pouco para o avanço do conhecimento da biologia dos processos sexuais e ciclos de vida em eucariontes em geral. Animais representam somente um ramo dentro da diversidade eucariótica e muita atenção tem historicamente sido dada a este grupo em detrimento de outros. Somente um entendimento mais detalhado da biologia dos diversos grupos de protistas poderá fornecer subsídios para um entendimento mais profundo da evolução dos próprios animais e plantas e promover avanços científicos significativos nos diversos campos da biologia.

Para saber mais

- FARLEY, J. *Gametes and spores: Ideas about sexual reproduction*. 1982. John Hopkins University Press.
- HOFSTATTER P.G., LAHR D.J.G. All eukaryotes are sexual, unless proven otherwise: many so-called asexuals present meiotic machinery and might be able to have sex. *Bioessays* 41(6): 1800246, 2019.
- MAYNARD-SMITH, J. *A evolução do sexo*. 2012. Editora Unesp.
- SPEIJER, D., LUKEŠ, J. E ELIÁŠ, M. Sex Is a Ubiquitous, Ancient, and Inherent Attribute of Eukaryotic Life. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112 (29): 8827–34, 2015.