

Nelson Ferreira Junior
Paulo Cesar de Paiva

Introdução à Zoologia





Fundação

CECIERJ

Consórcio **cederj**

Centro de Educação Superior a Distância do Estado do Rio de Janeiro

Introdução à Zoologia

Volume 4 - Módulo 4

Nelson Ferreira Junior

Paulo Cesar de Paiva



**SECRETARIA DE
CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

Ministério
da Educação



Apoio:



Fundação Cecierj / Consórcio Cederj

Rua Visconde de Niterói, 1364 – Mangueira – Rio de Janeiro, RJ – CEP 20943-001

Tel.: (21) 2334-1569 Fax: (21) 2568-0725

Presidente

Masako Oya Masuda

Vice-presidente

Mirian Crapez

Coordenação do Curso de Biologia

UENF - Milton Kanashiro

UFRJ - Ricardo Iglesias Rios

UERJ - Cibele Schwanke

Material Didático

COORDENAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO INSTRUCIONAL

Ana Tereza de Andrade

DESENVOLVIMENTO INSTRUCIONAL E REVISÃO

Carmen Irene Correia de Oliveira

Marcia Pinheiro

Márcia Elisa Rendeiro

REVISÃO TÉCNICA

Marta Abdala

Departamento de Produção

EDITORA

Tereza Queiroz

REVISÃO TIPOGRÁFICA

Kátia Ferreira dos Santos

Patrícia Paula

COORDENAÇÃO GRÁFICA

Jorge Moura

PROGRAMAÇÃO VISUAL

Alexandre d'Oliveira

ILUSTRAÇÃO

Equipe CÉDERJ

CAPA

David Amiel

PRODUÇÃO GRÁFICA

Patrícia Seabra

ELABORAÇÃO DE CONTEÚDO

Nelson Ferreira Junior

Fez graduação em Zoologia no Instituto de Biologia / UFRJ, mestrado em Morfologia de Insetos no Museu Nacional / UFRJ e doutorado em Filogenia de Insetos no Instituto de Biociências / USP. Atualmente, Nelson é professor-adjunto do Departamento de Zoologia do Instituto de Biologia da UFRJ, leciona as disciplinas “Zoologia III – Arthropoda” e “Entomologia I” para a graduação em Ciências Biológicas, Instituto de Biologia / UFRJ e colabora na disciplina “Ecologia de Insetos Aquáticos” para a pós-graduação em Ecologia; Instituto de Biologia / UFRJ e para a pós-graduação em Zoologia, Museu Nacional / UFRJ.

Paulo Cesar de Paiva

Fez graduação em Ciências Biológicas no Instituto de Biociências / USP, mestrado em Comunidades de Polychaeta no Instituto Oceanográfico / USP e doutorado em Bentos de Zonas Rasas no Instituto Oceanográfico / USP. Atualmente, Paulo é professor-adjunto do Departamento de Zoologia do Instituto de Biologia de UFRJ e leciona as disciplinas “Zoologia II – Mollusca, Annelida e Echinodermata”, “Invertebrados Marinhos” para a graduação em Ciências Biológicas, Instituto de Biologia / UFRJ; “Ecologia de Bentos de Fundos Inconsolidados para a pós-graduação em Ecologia; Instituto de Biologia / UFRJ; e Polychaeta para a pós-graduação em Zoologia, Museu Nacional / UFRJ.

Copyright © 2004, Fundação Cecierj / Consórcio Cederj

Nenhuma parte deste material poderá ser reproduzida, transmitida e gravada, por qualquer meio eletrônico, mecânico, por fotocópia e outros, sem a prévia autorização, por escrito, da Fundação.

F383i

Ferreira Junior, Nelson

Introdução à Zoologia. v.4 / Nelson Ferreira Junior.
– Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ, 2009.

128p.; 19 x 26,5 cm.

ISBN: 85-89200-81-7

1. Zoologia. 2. Trocas gasosas. 3. Sistemas circulatórios. 4. Sistema nervoso. 5. Sistema sensorial. 6. Reprodução I. Paiva, Paulo Cesar de. II. Título.

CDD: 590

2009/2

Referências Bibliográficas e catalogação na fonte, de acordo com as normas da ABNT.

Governo do Estado do Rio de Janeiro

Governador
Sérgio Cabral Filho

Secretário de Estado de Ciência e Tecnologia
Alexandre Cardoso

Universidades Consorciadas

**UENF - UNIVERSIDADE ESTADUAL DO
NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO**
Reitor: Almy Junior Cordeiro de Carvalho

**UERJ - UNIVERSIDADE DO ESTADO DO
RIO DE JANEIRO**
Reitor: Ricardo Vieiralves

UFF - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
Reitor: Roberto de Souza Salles

**UFRJ - UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO DE JANEIRO**
Reitor: Aloísio Teixeira

**UFRRJ - UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL
DO RIO DE JANEIRO**
Reitor: Ricardo Motta Miranda

**UNIRIO - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO
DO RIO DE JANEIRO**
Reitora: Malvina Tania Tuttman

SUMÁRIO

Aula 26 - Trocas gasosas _____	7
<i>Nelson Ferreira Junior / Paulo Cesar de Paiva</i>	
Aula 27 - Transporte e sistema circulatório _____	29
<i>Nelson Ferreira Junior / Paulo Cesar de Paiva</i>	
Aula 28 - Excreção e regulação osmótica e iônica _____	45
<i>Nelson Ferreira Junior / Paulo Cesar de Paiva</i>	
Aula 29 - Sistema nervoso _____	69
<i>Nelson Ferreira Junior / Paulo Cesar de Paiva</i>	
Aula 30 - Sistema sensorial _____	87
<i>Nelson Ferreira Junior / Paulo Cesar de Paiva</i>	
Aula 31 - Reprodução _____	111
<i>Nelson Ferreira Junior / Paulo Cesar de Paiva</i>	
Gabarito _____	127

Trocas gasosas

AULA 26

objetivo

Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

- Estudar as estratégias utilizadas pelos metazoários para obter oxigênio do meio para seu metabolismo.

Pré-requisitos

Aula 18 – Celoma, Metameria e a diversidade animal.

Aula 25 – Digestão.

INTRODUÇÃO

Por exemplo, você pode ficar horas ou mesmo dias sem comer qualquer coisa e, mesmo assim, suas células e seu organismo continuam vivos. Entretanto, se o seu suprimento de oxigênio for interrompido por alguns minutos, você morre, pois suas células, principalmente as cerebrais, precisam receber oxigênio continuamente.

Na aula anterior, vimos como os metazoários adquirem energia e materiais estruturais através da digestão de material orgânico. Este, para ser transformado em energia, deve ser degradado pela fermentação ou pela oxidação, sendo o segundo processo cerca de 20 vezes mais eficiente do que o primeiro.

O oxigênio é extremamente tóxico para os organismos, devido a sua capacidade oxidativa. Por isso, raramente participa de processos bioquímicos dentro da célula, exceto, é claro, da oxidação no processo de respiração celular. Para isto, ele deve ser “escotado” o mais rápido possível para dentro das células para oxidar a matéria orgânica. Devido ao seu potencial tóxico para os animais, o oxigênio é de difícil armazenagem, tendo de ser obtido continuamente e de forma rápida, ao contrário do alimento que pode ser armazenado nas células e tecidos por longos períodos. Como o oxigênio não é armazenado pelas células ele se torna o maior limitante para a respiração celular, tendo de passar de célula a célula em um curto intervalo de tempo.

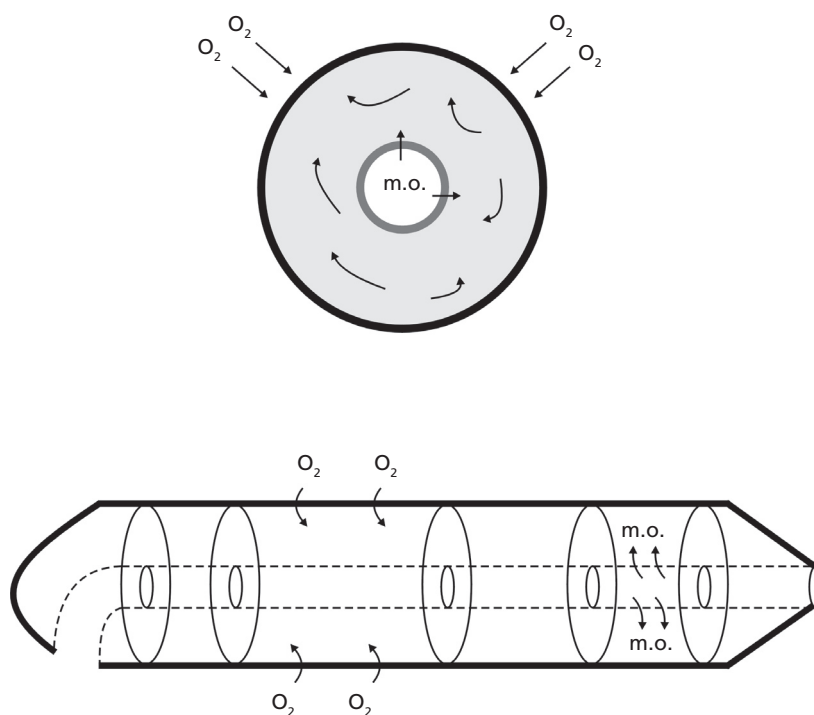


Figura 26.1: Animal hipotético mostrando as vias de entrada de oxigênio e matéria orgânica.

Em um animal de corpo maciço, como nos acelomados, a distância máxima entre a superfície de absorção de oxigênio e as células não pode ultrapassar mais do que 1mm, limitando, portanto, o tamanho corpóreo. Na próxima aula, veremos como os animais resolveram esse problema interno, adquirindo tamanhos corpóreos maiores. Nesta, vamos nos concentrar no seguinte problema: com o aumento do tamanho do corpo, sua área relativa cresce menos do que seu **volume**. Esse problema surge quando consideramos que todas as células do animal precisam de oxigênio e o número delas cresce proporcionalmente ao volume, enquanto a captação de oxigênio é efetuada apenas pela superfície. Veremos, portanto, quais as estratégias utilizadas pelos animais para aumentar a superfície respiratória. Porém antes, veremos que tais estratégias variam em função do meio onde vivem os animais, pois a quantidade de oxigênio e sua difusão são muito diferentes nos meios aquáticos e aéreos.



Ver Aula 15 – Arquitetura Animal.

QUANTIDADE DE OXIGÊNIO NO AMBIENTE

No meio aquático, o oxigênio apresenta uma solubilidade e uma capacidade de difusão entre as moléculas de água extremamente baixas, quando comparados ao meio aéreo (**Figura 26.2**). Enquanto neste, o oxigênio corresponde praticamente a 21% do ar atmosférico, na água, ele raramente ultrapassa 1%. Além desta diferença no conteúdo, se não houver circulação da água (água parada), o oxigênio pode demorar horas ou até dias para se difundir por alguns centímetros; enquanto no ar, a difusão é extremamente rápida.

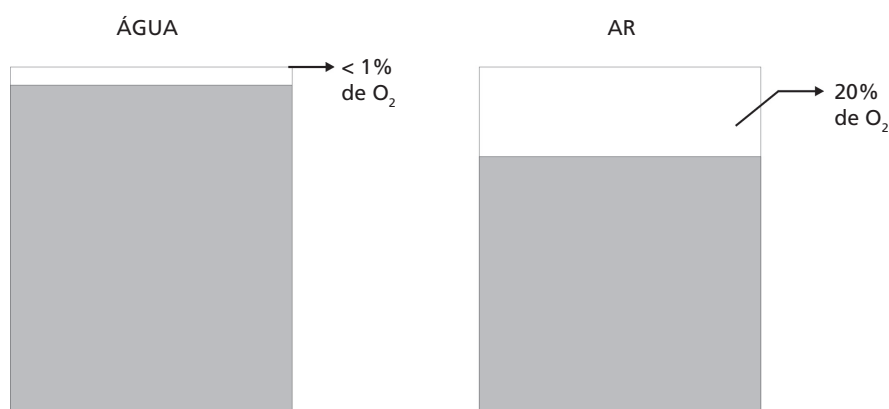


Figura 26.2: Conteúdo de oxigênio nos meios aquático e aéreo.

Outra diferença é quanto à densidade do meio. Em animais que movem o meio para absorver o oxigênio, como acontece nos nossos pulmões, o custo energético varia quando varia também a densidade a ser movida. Assim, quando você respira, a densidade do ar é extremamente pequena. Por outro lado, o peso da água a ser carregada pelos órgãos respiratórios é cerca de 100.000 vezes maior do que o do ar, acarretando um custo energético muito elevado aos animais aquáticos. Por isso, em ambientes aquáticos, o fluxo geralmente é unidirecional, com o meio passando uma única vez pelas estruturas respiratórias. Enquanto, no ambiente aéreo, o fluxo pode ser bidirecional, com o ar entrando e saindo dos pulmões, por exemplo.

Devido a estas notáveis diferenças entre os dois meios, não seria surpresa se observássemos estratégias completamente distintas desenvolvidas pelos animais que neles vivem. Embora se considere que a invasão do meio aéreo pelos animais foi uma etapa complexa da evolução, já que eles têm origem aquática, no tocante ao suprimento de oxigênio, o processo de conquista do meio aéreo não foi um problema tão grande a ser resolvido.

TROCAS GASOSAS NO AMBIENTE AQUÁTICO

Devido à baixa quantidade de oxigênio e sua pequena difusão no ambiente aquático, a evolução de tamanhos corpóreos se deu no sentido de um aumento da superfície em relação ao volume. A presença de cavidades internas (ver Aula 18) solucionou em parte este problema, entretanto, muitos animais ainda que providos de cavidade, apresentam dimensões maiores do que seria possível, se mantivessem a mesma superfície.

Em formas de tamanho pequeno, a superfície externa do corpo é suficiente para a demanda de oxigênio das células internas. Entretanto, quando o corpo é maior, duas estratégias se destacam:

- aumento da superfície através do **achatamento**;
- aumento da superfície através de evaginações (dobras externas da parede do corpo), denominadas **brânquias**.

Alongamento ou achatamento

Tais estratégias foram utilizadas pelos animais vermiformes, aumentando sua superfície de forma proporcional ao volume. Esse tipo de forma do corpo é fruto do crescimento por alongamento ou por achatamento. Por exemplo, alguns pogonóforos podem atingir dezenas de centímetros, mas apresentam um diâmetro pouco maior que um fio de cabelo. O achatamento é típico de muitos platelmintes e algumas formas marinhas podem atingir vários centímetros, mas têm uma espessura de apenas alguns milímetros, se assemelhando a verdadeiros tapetes (Figura 26.3). Entretanto, o crescimento por alongamento ou achatamento tem um limite funcional. Afinal, um animal semelhante a um tapete, por exemplo, teria baixa mobilidade e estaria expondo uma área muito grande do seu corpo, facilitando sua predação.

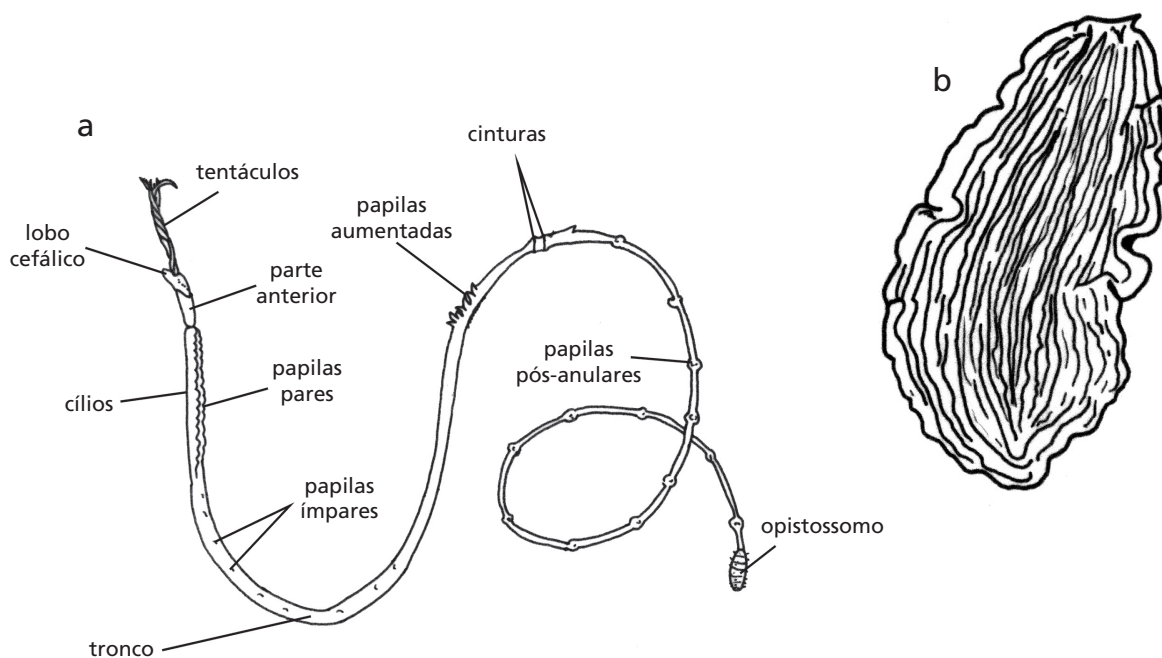
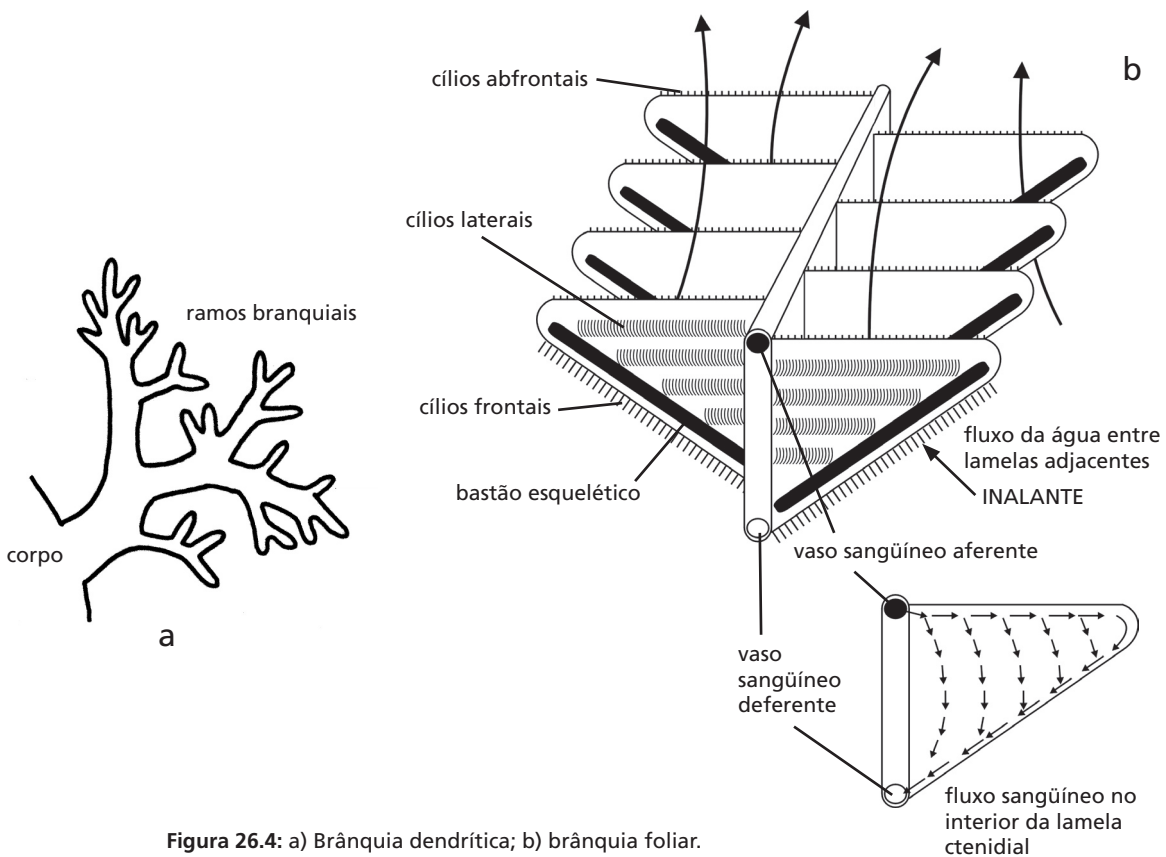


Figura 26.3: Aumento da superfície por alongamento pogonófora (a); e por achatamento platelminte marinho (b).

Brânquia

O aparecimento de dobras permite também um aumento considerável na superfície do corpo sem que haja necessariamente um aumento grande do volume. Todos os grupos aquáticos de grande porte apresentam alguma estrutura que pode ser denominada brânquia. Entretanto, deve ser lembrado que diversos tipos de evaginações que aumentam a superfície são denominadas brânquias, portanto poucos são os casos, entre grupos taxonômicos diferentes, de homologia entre elas. Às vezes, mesmo no próprio grupo, espécies diferentes apresentam brânquias de origem distinta. Geralmente, as brânquias mais eficientes têm formatos dendríticos (como árvores) ou foliares (como folhas) (Figura 26.4).



Muitas destas estruturas também podem ter outras funções, principalmente alimentação ou excreção. As brânquias de alguns poliquetas tubícolas (Figura 26.5.a), de moluscos bivalves (26.5.b) e de briozoários (26.5.c) são também estruturas alimentares. Em geral, a brânquia não é responsável por toda a troca gasosa, mas sim por boa parte dela.

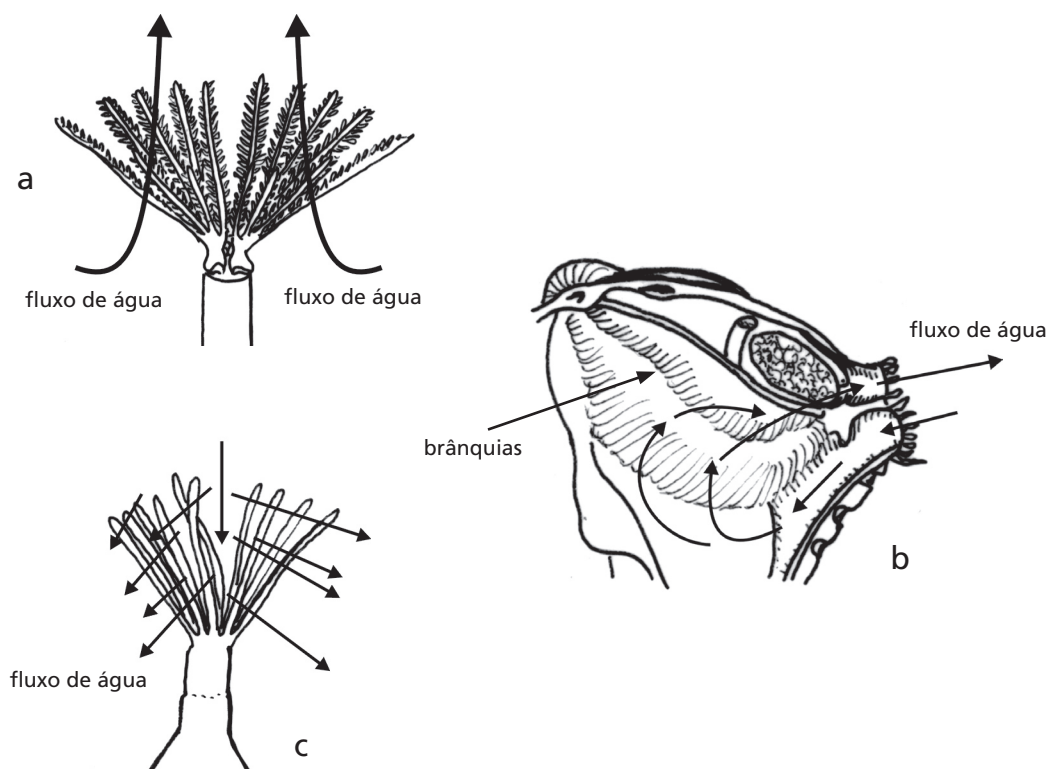


Figura 26.5: Brânquias que acumulam a função de estrutura de captura de alimento: a) coroa branquial de poliqueta sabelídeo; b) ctenídia de molusco bivalve; c) lofóforo de briozoário.

Muitas estruturas com outras funções, e não denominadas brânquias, também podem auxiliar nas trocas gasosas, desde que aumentem a superfície relativa e tenham boa irrigação. Isso acontece nos parapódios (função locomotora) de alguns poliquetas e nos pés ambulacrais de alguns equinodermos (Figura 26.6).

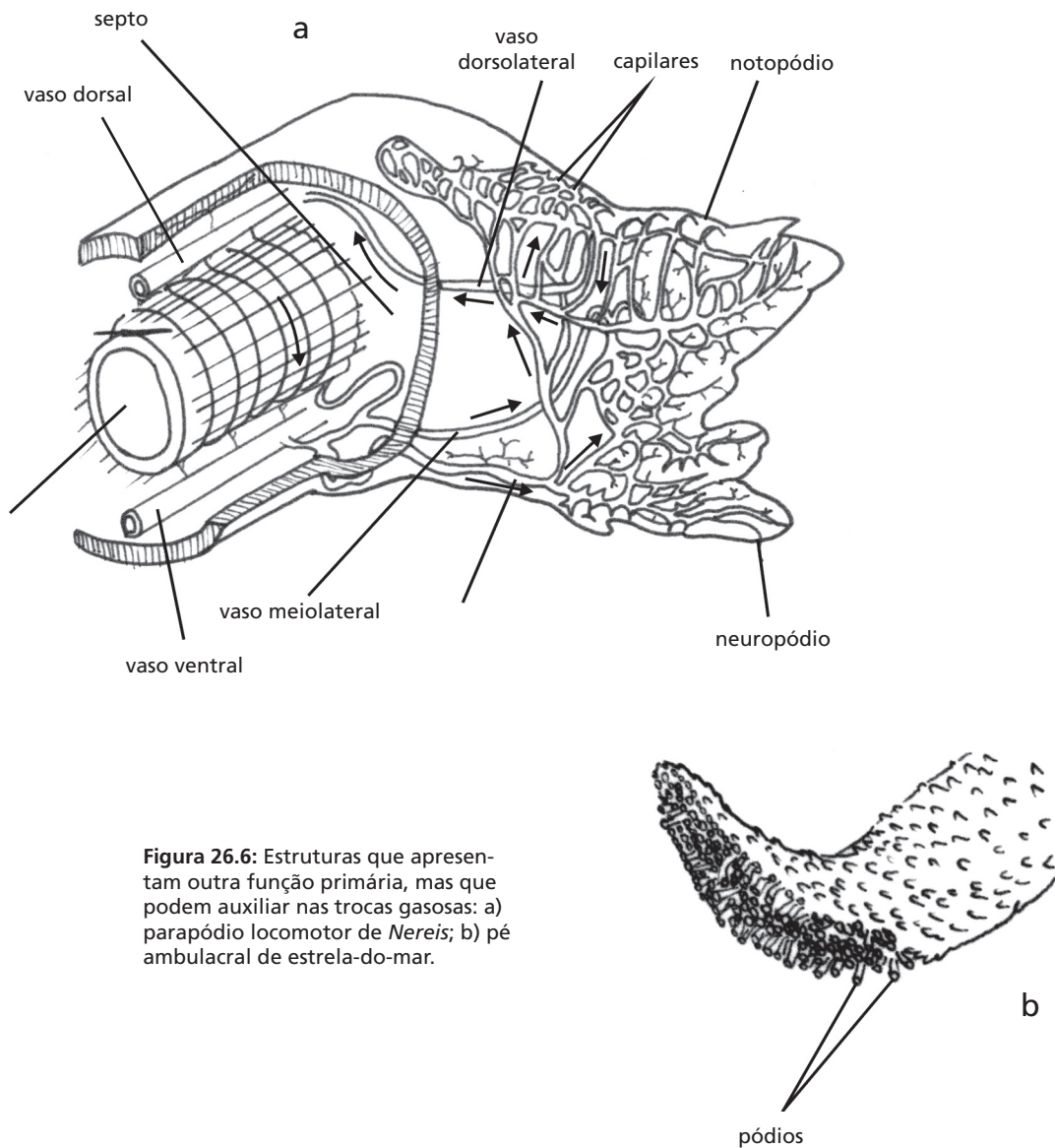


Figura 26.6: Estruturas que apresentam outra função primária, mas que podem auxiliar nas trocas gasosas: a) parapódio locomotor de *Nereis*; b) pé ambulacral de estrela-do-mar.

Vários animais aquáticos apresentam brânquias bem elaboradas, geralmente protegidas por carapaças, como em moluscos e crustáceos. Enquanto nos crustáceos mais primitivos as trocas gasosas eram efetuadas por expansões laterais dos apêndices locomotores, nos mais derivados, como camarões e caranguejos, as expansões são organizadas na forma de árvores ramificadas (dendrobrânquias) ou de folhas (filobrânquias). Tal forma dá a aparência de um livro, o que leva a um aumento considerável da superfície de trocas gasosas, já que devido à presença do exoesqueleto, não ocorrem trocas gasosas realizadas pela superfície corpórea (Figura 26.7).



Diversos crustáceos conquistaram o ambiente aéreo. No entanto, mantiveram suas brânquias aquáticas, sendo restritos a ambientes extremamente úmidos. Um caso peculiar é o caranguejo-fantasma (*Ocypodes quadrata*) muito comum na parte superior das nossas praias. Neles, as brânquias foram reduzidas e a porção superior da câmara branquial funciona através de troca de oxigênio do ar por vasos (semelhante a um pulmão). Desta forma, o animal ficou restrito à praia, pois tem de manter as brânquias sempre úmidas, mas, em compensação, não pode ficar submerso por muito tempo, já que sua superfície branquial foi reduzida.

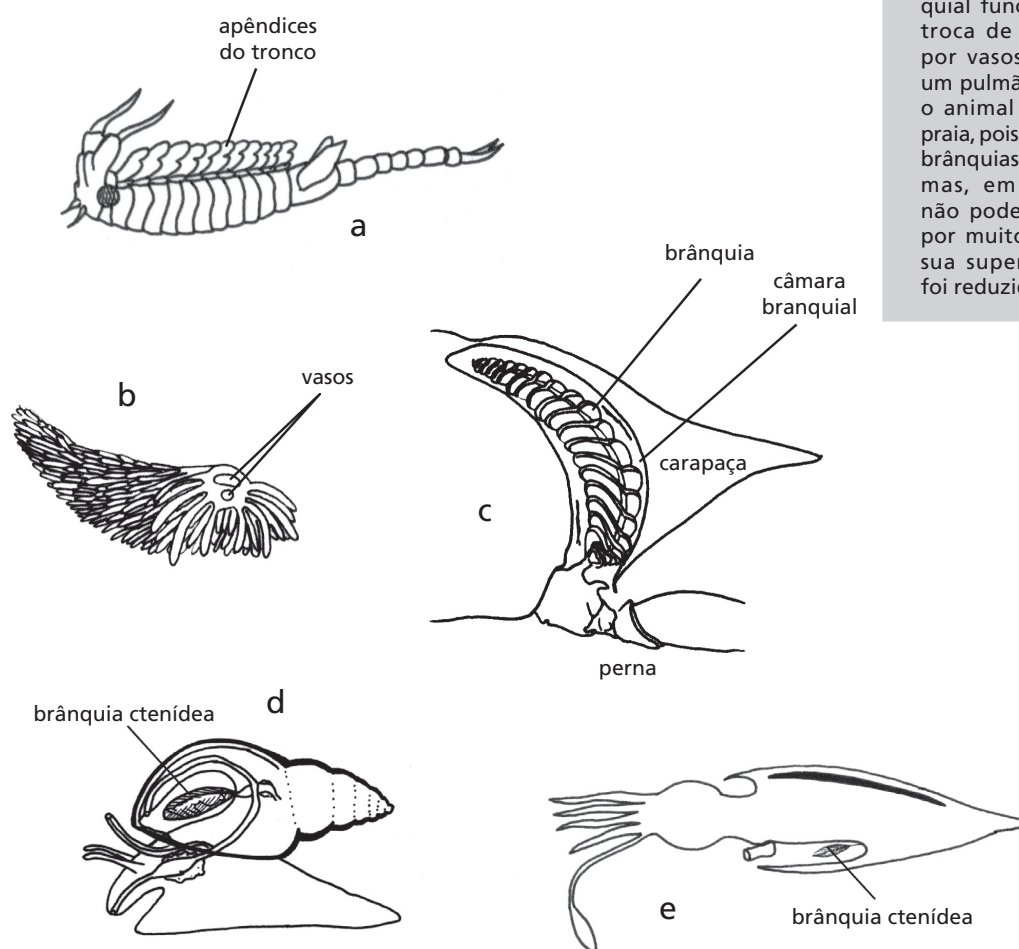
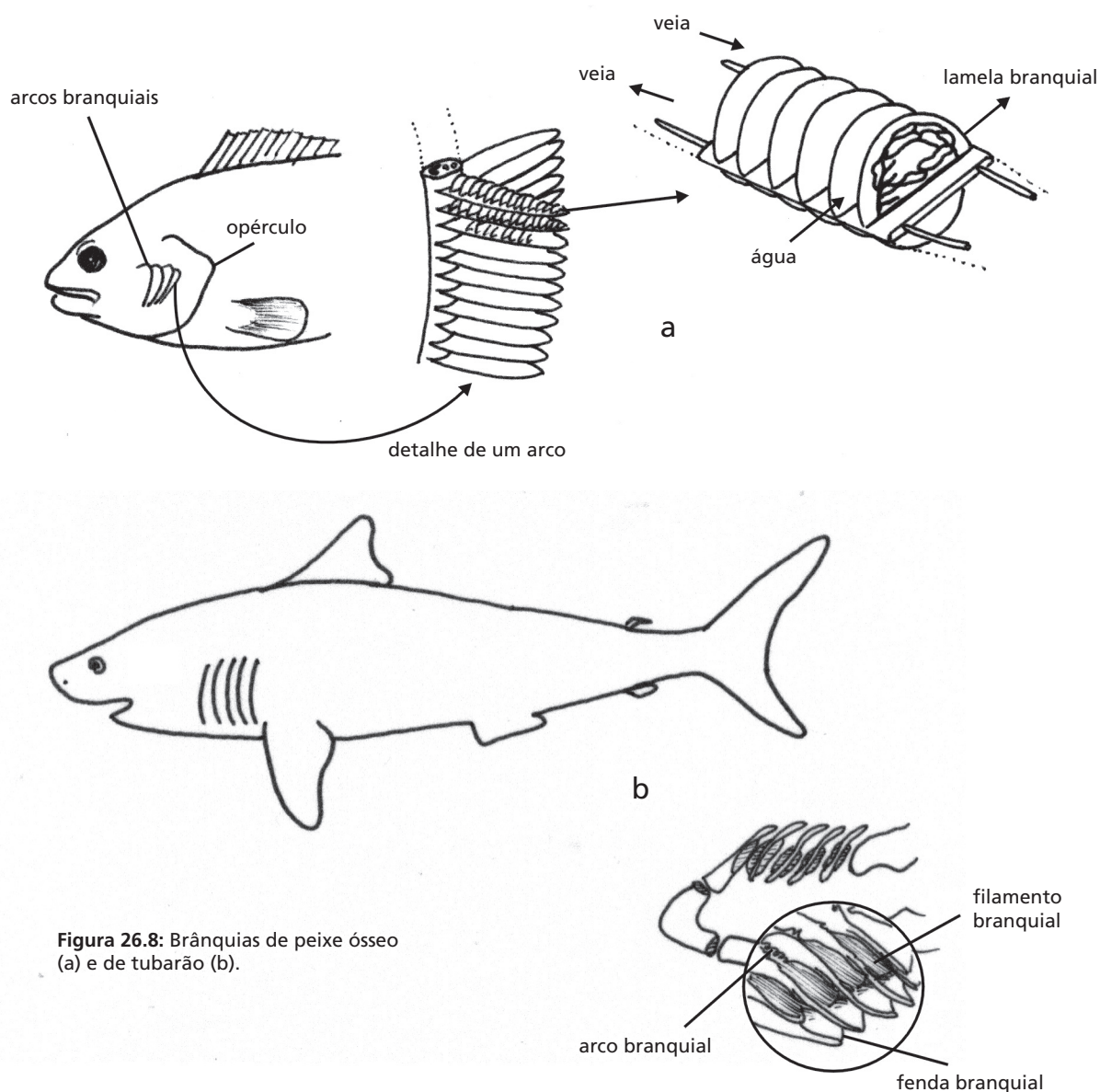


Figura 26.7: Brânquias de crustáceos e gastrópodos: a) apêndice locomotor de artêmia-salina; b) dendrobrânquia de camarão; c) filobrânquia de caranguejo; d) brânquia ctenídea de gastrópode; e) brânquia ctenídea de Lula (*Loligo* sp.).

OPÉRCULO

Estrutura que fecha, cobre ou protege determinadas partes do corpo. Por exemplo, peça córnea ou calcária que fecha a entrada da concha de certos moluscos, peça óssea que protege as guelras de certos peixes, membrana que cobre a abertura dos orifícios respiratórios dos bicos das aves.

As brânquias, também, são comuns em vertebrados aquáticos, embora alguns já apresentem uma respiração aérea. As brânquias das garoupas são estruturas foliáceas organizadas em série e mantidas protegidas por um **OPÉRCULO**. A água entra pela boca e sai pelas brânquias, em um fluxo unidirecional mantido pela natação do animal ou pelo engolfamento da água, quando ele está parado. Então ele engole água para respirar! Os cações e tubarões, que não têm esta capacidade de engolfar água, se mantêm em constante movimento. Neles, as brânquias não são cobertas por opérculos, mas se abrem em fendas laterais.



TROCAS GASOSAS NO AMBIENTE AÉREO

Com a conquista do ambiente aéreo, alguns grupos de vertebrados se depararam com um meio de baixa densidade e muito mais rico em oxigênio.

Se uma sardinha respira oxigênio, por que então ela morre asfixiada quando está fora d'água?

As brânquias, geralmente, não são funcionais fora da água, pois como são muito delgadas não têm como se sustentar no ambiente aéreo. Por exemplo, as brânquias de caranguejos são semelhantes a folhas de um livro que se grudam quando colocadas fora d'água, diminuindo drasticamente a superfície de trocas gasosas.

Com a menor necessidade de área respiratória e a alta difusão do oxigênio na atmosfera, os animais desenvolveram estruturas respiratórias internas através de invaginações. Tais estruturas comprometem uma área desprezível da superfície do corpo, e o ar é sugado com um custo energético relativamente pequeno devido a sua baixa densidade.

A superfície respiratória mínima necessária para a obtenção de oxigênio é relativamente maior no meio aéreo do que no aquático, em função da disponibilidade de oxigênio. Assim, grupos animais cujos representantes aquáticos sem brânquias atingem apenas alguns centímetros (como no caso de pequenos oligoquetos aquáticos) têm representantes aéreos com até dois metros de comprimento (caso do **MINHOCUÇU**). A forma permanece a mesma, mas o tamanho é maior.

As invaginações aéreas são de dois tipos principais, conforme a troca oxigênio: se com um sistema circulatório baseado em líquidos, como no caso dos **pulmões**; se diretamente com as células, como no caso das **traquéias**.

MINHOCUÇU

Anelídeos terrestres do gênero *Megascolex* que podem atingir até quase 2m de comprimento e vivem, em geral, em baixadas de solo fértil.

Pulmões

Assim como as brânquias, os pulmões são geralmente estruturas homoplásticas que surgiram de forma independente em diferentes grupos. Nos vertebrados terrestres, eles são estruturas homólogas originadas provavelmente das bexigas natatórias dos *Actinopyterigii*, a única cavidade aérea desses animais. Todos os vertebrados apresentam pulmões muito semelhantes e com uma área de troca muito grande, devido a sua estrutura formada por microinvaginações denominadas alvéolos (Figura 26.9).

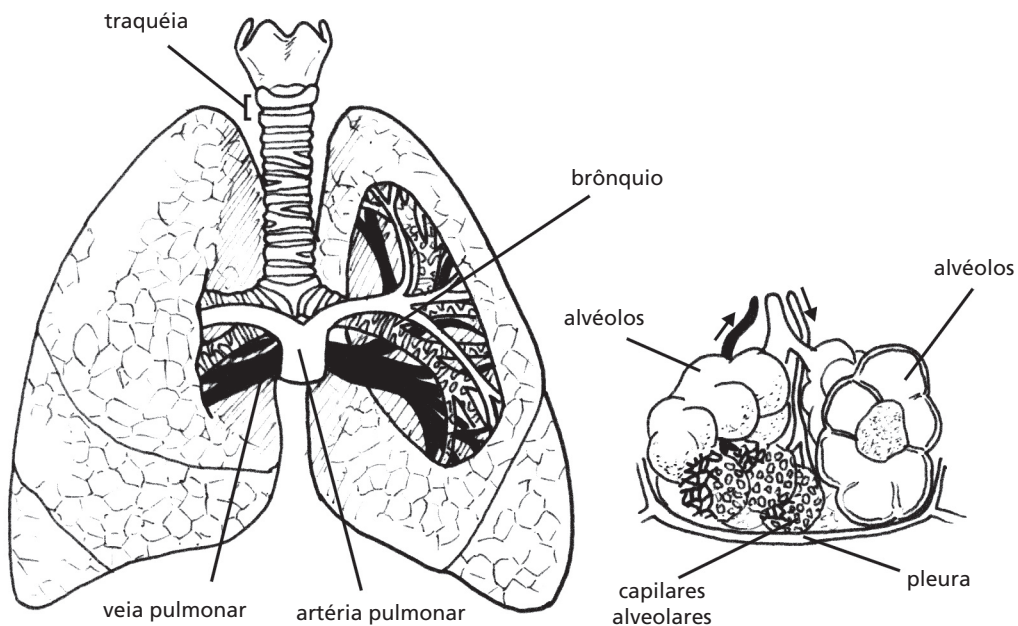


Figura 26.9: Pulmão de vertebrado mostrando os alvéolos pulmonares.

O mecanismo pelo qual o ar é sugado também é semelhante, isto é, o pulmão tem uma parede muito fina e funciona como um balão. A musculatura ligada à caixa torácica provoca sua expansão e cria uma pressão interna menor que a do meio externo, fazendo com que os pulmões suguem o ar externo através das traquéias e da boca ou nariz (Figura 26.10).

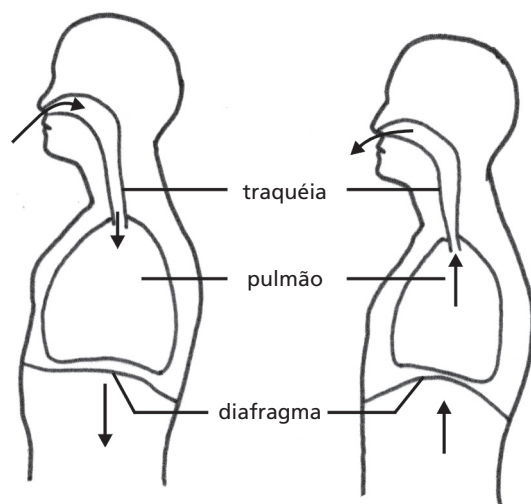


Figura 26.10: Fluxo de ar em um pulmão humano. Observe o papel da musculatura do diafragma, criando uma pressão negativa dentro da caixa torácica.

Outros tipos de pulmões, homoplásticos em relação aos dos vertebrados, ocorrem em gastrópodes e aracnídeos. Por exemplo, nas aranhas os pulmões são foliáceos, às vezes denominados **pulmões em livro** (Figura 26.11.a), sendo muito similares às brânquias dos animais aquáticos, com várias estruturas foliáceas bem irrigadas localizadas na região ventral que aumentam muito a superfície de trocas gasosas.

No caso dos isópodes, as formas de meio aquático utilizam os apêndices abdominais (denominados pleópodos) como brânquias. Nas formas que conquistaram o ambiente aéreo, estes mesmos pleópodos apresentam ramificações internas (invaginações), sendo denominados **PSEUDOTRAQUÉIAS** (Figura 26.11.b), numa comparação com as traquéias dos insetos que veremos mais adiante. Entretanto, funcionalmente são semelhantes a pulmões, como acontece também com os gastrópodes.

PSEUDOTRAQUÉIAS

Nas traquéias verdadeiras, o oxigênio vai direto até os tecidos, enquanto nas pseudotraquéias este é trocado com a hemolinfa que o distribui, como ocorre nos pulmões.

CAVIDADE DO MANTO

É o único resquício de cavidade dos moluscos. Fica localizada entre a concha e o resto do corpo maciço. É nela que normalmente se localizam as brânquias.

Nos gastrópodes, a transição foi semelhante. As formas aquáticas apresentam brânquias localizadas dentro da **CAVIDADE DO MANTO**, enquanto nas formas aéreas, as brânquias desapareceram e a parede da cavidade do manto se tornou muito vascularizada, sendo denominada pulmão (Figura 26.11.c).

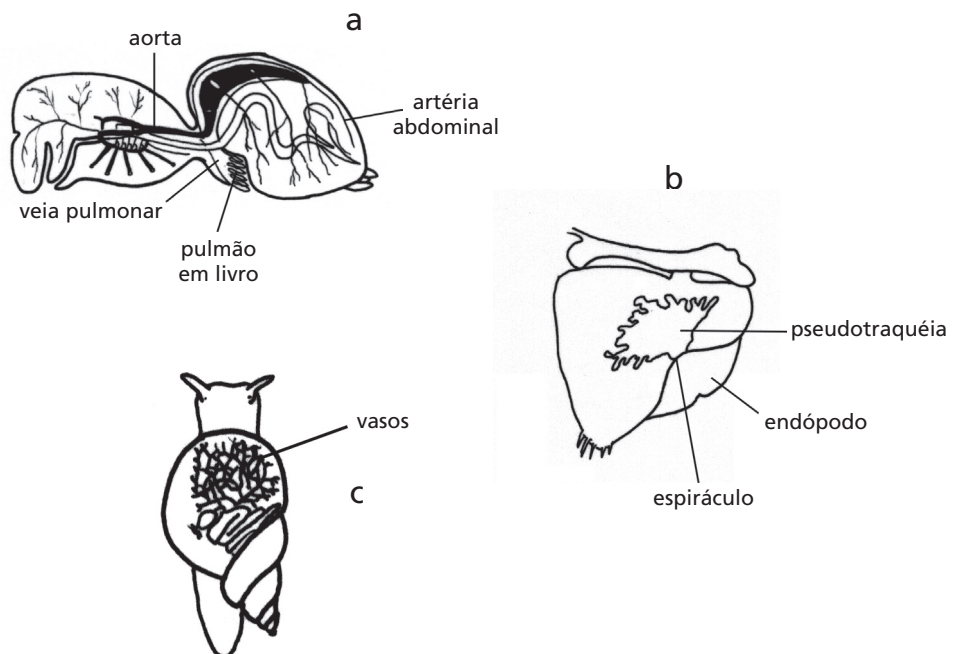


Figura 26.11: a) “Pulmão em livro” de aranhas; b) pseudotraquéia de isópode terrestre; c) “pulmão” de gastrópode (cavidade do manto vascularizada).

TRAQUEÍAS

As traquéias foram uma das grandes novidades evolutivas na conquista do ambiente aéreo e, possivelmente, um dos fatores que auxiliou na grande capacidade dos insetos para conquistarem os mais diferentes nichos desse ambiente. Assim como as demais estruturas respiratórias, elas parecem ter surgido em insetos e miriápodes e em aracnídeos de forma homoplástica.

O sistema traqueal (Figura 26.12.a) abre-se externamente através de **espiráculos ou estigmas**. Na maioria dos insetos, encontramos válvulas que controlam a abertura e o fechamento dos espiráculos, reduzindo a perda de água. As traquéias são invaginações da parede do corpo que se ramificam em tubos menores, os quais se estendem até os tecidos. Os ramos traqueais são revestidos por cutícula, denominada **íntima**, e apresentam um espessamento elicoidal, denominado **tenídio** (Figura 26.12.b). À extremidade de cada traquéia une-se uma célula com projeções tubulares providas de líquido e que se comunica com os tecidos, denominada **célula traqueolar**. Quando o tecido está em repouso, esse líquido permanece nas projeções da célula traqueolar, mas, quando o tecido entra em atividade, o líquido é removido para os tecidos pela pressão osmótica, levando o oxigênio atmosférico diretamente aos tecidos. Quando o líquido retorna para as projeções da célula traqueolar, ele impede a passagem do oxigênio.

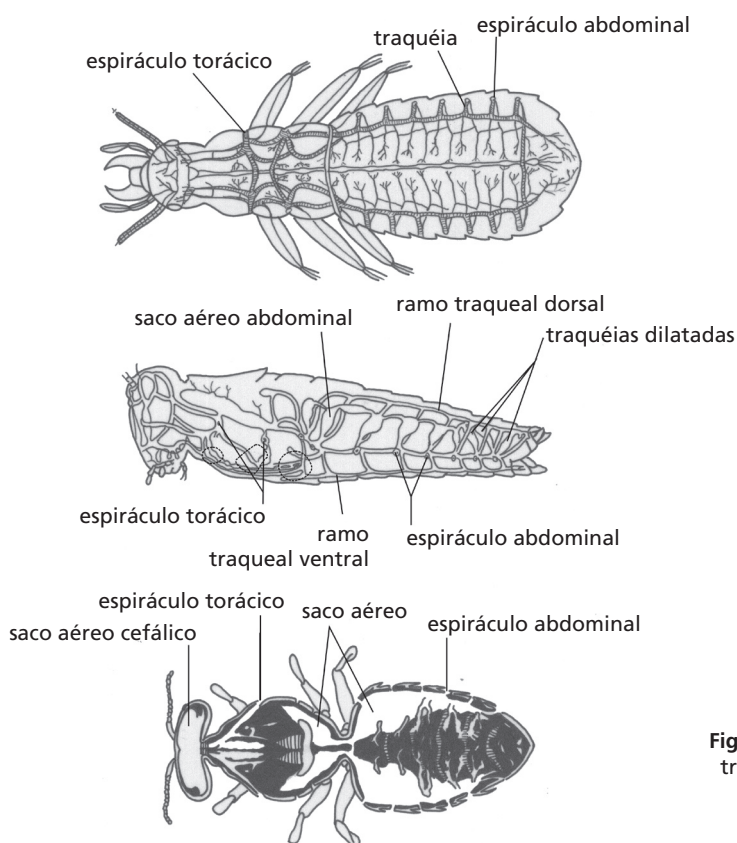


Figura 26.12.a: Sistema traqueal dos insetos.

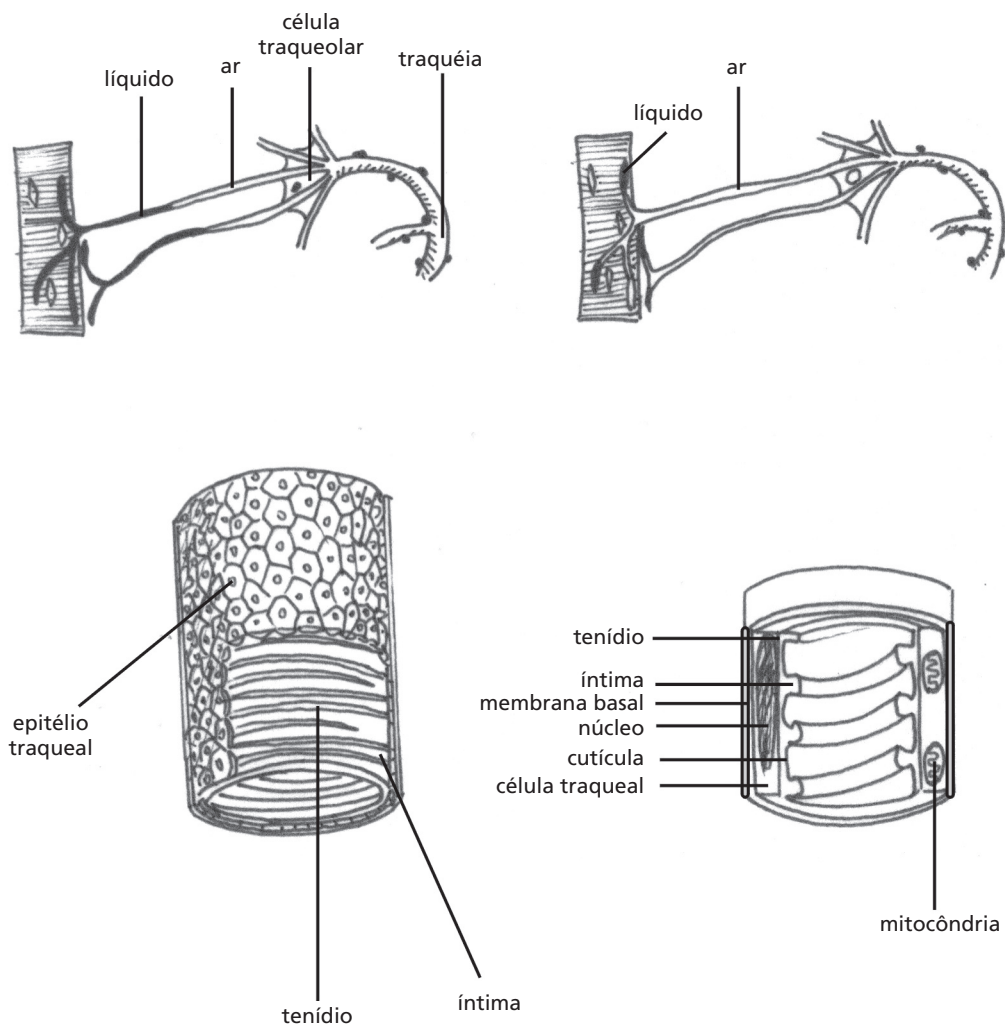


Figura 26.12.b: Um ramo traqueal, mostrando suas estruturas.

Note que nos pulmões, o oxigênio é transferido para o sangue e a circulação promove sua distribuição. No caso das traquéias, o oxigênio atinge diretamente os tecidos e a circulação não participa do seu transporte.

RETORNO AO MEIO AQUÁTICO

Dos animais que retornaram ao meio aquático, depois que seus ancestrais ocuparam o meio aéreo, alguns mantiveram as mesmas estruturas respiratórias e, portanto, ainda são dependentes do ar. Tal dependência faz com que eles tenham de obrigatoriamente subir à superfície para tomar ar.

Isso acontece, por exemplo, com focas, golfinhos, baleias etc., entre os mamíferos, pinguins (aves marinhas), tartarugas. A frequência com que eles sobem à superfície não é necessariamente muito grande, algumas baleias e focas podem subir à superfície para respirar apenas de hora em hora. Essa adaptação está associada a uma série de mecanismos fisiológicos e também à baixa demanda de oxigênio desses animais. No ambiente aéreo, devido à sua densidade, o custo energético da locomoção e da sustentação são muito altos, requerendo constante fluxo de oxigênio. As adaptações fisiológicas dos animais que usam oxigênio atmosférico e mergulham estão mais associadas à capacidade de armazenagem de oxigênio no sangue (sistema circulatório). Eles têm a capacidade de armazenar oxigênio no sangue até duas vezes mais que qualquer vertebrado de ambiente aéreo. Desse modo, não há um aumento na capacidade de seus pulmões e, de fato, boa parte deles mergulha com os pulmões vazios, ao contrário do que ocorre com um ser humano, que enche os pulmões para se manter mais tempo embaixo da água.



Devido ao tempo de submersão, alguns mamíferos aquáticos podem atingir profundidades impressionantes para um animal que depende do ar. Pinguins-antártica podem atingir até 300m, a foca-de-Weddel, até 600m e o cachalote, mais de 1.000m de profundidade.

O surgimento de projeções tubulares que se ligam às estruturas respiratórias, denominadas **sifões**, permitiu que baratas-d'água, larvas de mosquitos e alguns caracóis de água doce, por exemplo, pudessem manter seus corpos dentro d'água e um pouco afastados da superfície (Figura 26.13).

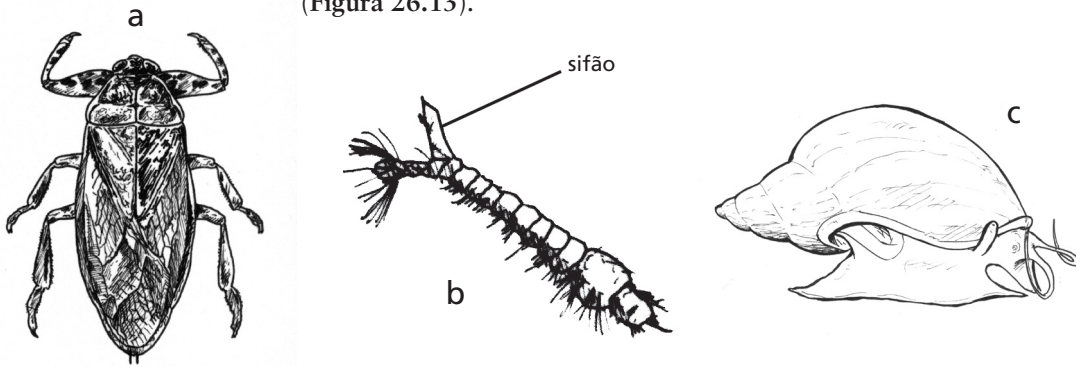


Figura 26.13: Sifões de: a) barata-d'água; b) larva de mosquito; c) caracol de água doce.

Vários besouros aquáticos levam uma bolha de ar para dentro d'água (Figura 26.14.a). As bolas se mantêm aderidas ao corpo deles por uma série de cerdas hidrofóbicas. Algumas aranhas utilizam suas teias para a construção de câmaras que também mantêm bolas debaixo d'água (Figura 26.14.b). Ao levar um estoque de ar para dentro d'água, esses animais aumentam seu tempo de permanência no meio aquático. Contudo, eles retornam periodicamente à superfície para renovar o ar de suas bolhas.

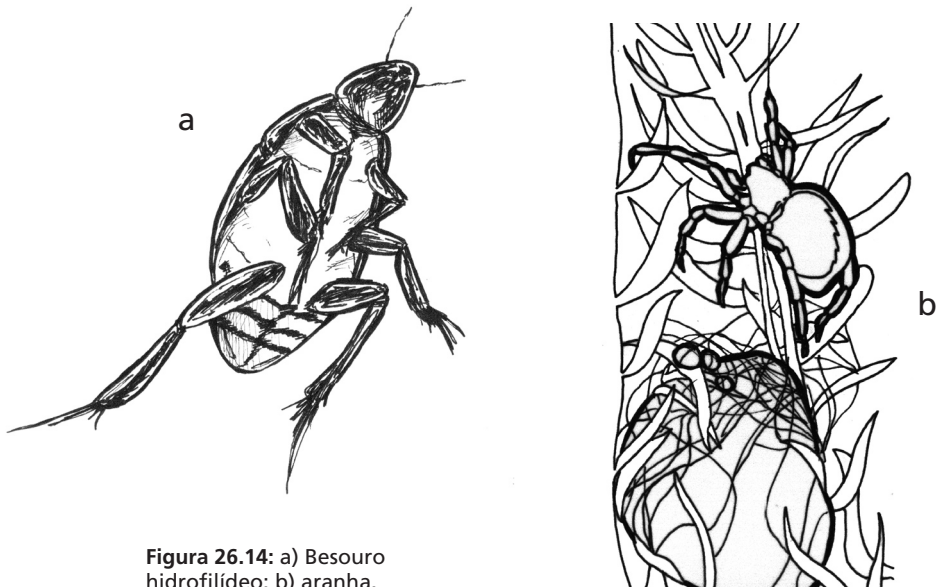


Figura 26.14: a) Besouro hidrofilídeo; b) aranha.

Vários insetos que retornaram ao meio aquático respiram oxigênio dissolvido na água. A maioria deles manteve o sistema traqueal, embora estruturas próprias para a respiração dentro d'água tenham se desenvolvido. Elas correspondem a projeções do corpo que apresentam, internamente, inúmeros ramos traqueais, sendo denominadas **traqueobrânquias** (Figura 26.15). O oxigênio, ao penetrar na traqueobrânquia, passa para as traquéias e é levado por elas diretamente aos tecidos. Alguns poucos insetos aquáticos apresentam brânquias sangüíneas, isto é, o oxigênio passa para o sangue e é transportado por pigmentos respiratórios.

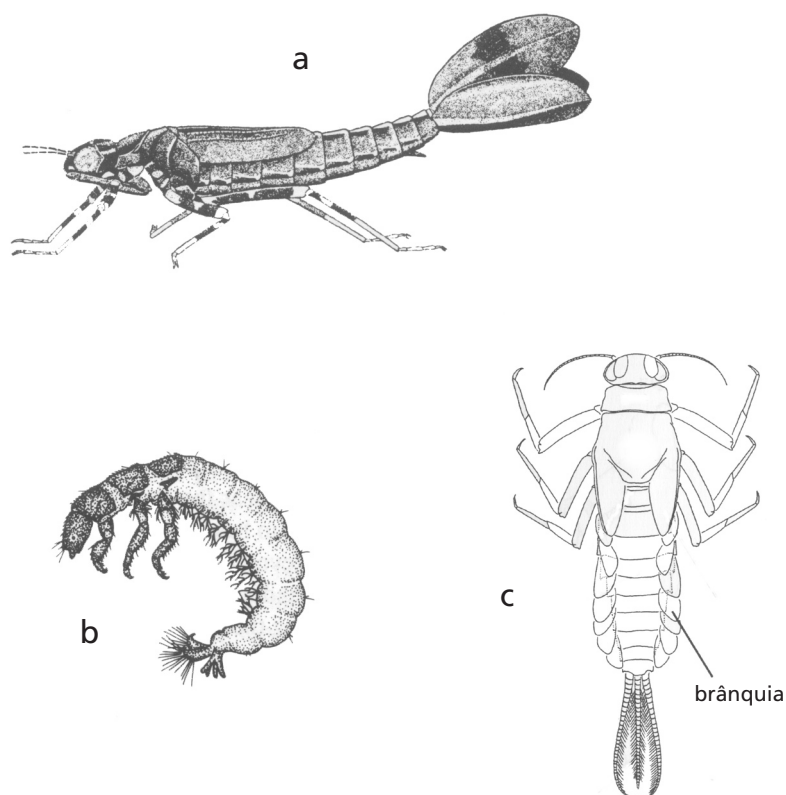


Figura 26.15: Insetos imaturos com suas brânquias: a) *Odonata* (lavadeira); b) *Trichoptera*; c) *Ephemeroptera*.

RESUMO

A energia para as funções vitais de um organismo é proveniente da degradação da matéria orgânica através do oxigênio no processo de **respiração celular**, embora algumas formas possam fazê-lo sem oxigênio, por **fermentação**. O oxigênio, ao contrário do alimento, é de difícil armazenamento, devendo ser constantemente fornecido para todos os tecidos vivos. As adaptações dos animais para captar oxigênio do meio dependem da relação área/volume do corpo e do meio em que vivem os animais. No meio aquático, o conteúdo de oxigênio é relativamente baixo (cerca de 1%) além de ser de difícil difusão. Já no meio aéreo, a quantidade de oxigênio é bem mais elevada (cerca de 20%) e a difusão, molécula a molécula de ar, é muito mais rápida.

As principais estratégias dos animais aquáticos para poderem crescer num ambiente de baixo nível de oxigênio e solucionar o problema da relação aérea (de captura de oxigênio) / volume (de demanda de oxigênio) foram: **achatamento** ou **alongamento** e aumento da superfície do corpo por dobras, ou evaginações, normalmente denominadas **brânquias**. As brânquias são estruturas homoplásticas, que ocorrem nos mais diferentes grupos através de qualquer aumento da superfície corpórea. Geralmente têm formatos dendríticos (árvores) ou foliares para aumentar a área de absorção. Muitas vezes estruturas com outras funções são utilizadas secundariamente como brânquias, principalmente estruturas alimentares.

Com a maior abundância e difusão do oxigênio no ambiente aéreo, é possível um pequeno aumento em tamanho sem qualquer aumento da superfície respiratória, em comparação ao ambiente aquático. Ainda assim muitos animais apresentam invaginações para trocas gasosas denominadas **pulmões**, **traquéias** e **pseudotraquéias**. Pulmões são homólogos em todos os vertebrados e funcionam mesmo naqueles que retornaram ao ambiente aquático, mantendo uma respiração aérea. Nos demais grupos, que não os vertebrados, os pulmões são geralmente homoplásticos, como os pulmões em livro de aranhas e os pulmões de gastrópodes. As **traquéias** dos insetos diferem dos pulmões, pois são tubos que levam o oxigênio direto aos tecidos, enquanto nos pulmões e nas pseudotraquéias de isópodes o oxigênio é transferido para o sistema circulatório (um líquido), que o distribui pelos tecidos.

EXERCÍCIO AVALIATIVO

Na lista dos animais abaixo, quantas vezes você acredita que o caráter pulmão tenha surgido independentemente?

Aranha, caramujo, golfinho, baleia, macaco, jacaré, sapo.

INFORMAÇÃO SOBRE A PRÓXIMA AULA

Na próxima aula veremos como os metazoários obtêm oxigênio do meio ambiente para oxidar o alimento absorvido após a digestão no processo de respiração celular.

Transporte e sistema circulatório

AULA 27

objetivo

Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

- Discutir as principais estratégias utilizadas pelos animais para fazer o transporte interno de substâncias pelo corpo, principalmente quando este adquire um tamanho muito grande.

Pré-requisitos

Aula 18 – Celoma, Metameria e a diversidade animal

Aula 26 – Trocas gasosas

INTRODUÇÃO

A circulação pode ser definida como o processo em que diversas substâncias são transportadas através do corpo de um animal. Entre estas substâncias estão gases, sólidos e líquidos dissolvidos. No processo de respiração celular, por exemplo, o oxigênio, as moléculas alimentares e os resíduos metabólicos desse processo, como gás carbônico e excretas, são transportados pelo processo de circulação. O processo de circulação pode ser efetuado de forma simples pela própria água do ambiente, como no caso de alguns animais aquáticos; ou de célula a célula, como nos animais menores. Entretanto, com o crescimento do corpo dos animais e a conseqüente diminuição da razão área/volume, um número maior de células internas requer um sistema de drenagem de seus metabólicos e catabólicos. Neles surgem os **sistemas circulatórios**.

De todas as substâncias transportadas pelos sistemas circulatórios, o oxigênio tem um papel predominante no grau de desenvolvimento dos sistemas circulatórios, devido à impossibilidade de ser armazenado nas células e à sua toxicidade. Dessa forma, a circulação está intimamente relacionada ao processo respiratório e, conseqüentemente, ao transporte de oxigênio para os tecidos. Naqueles animais com células e tecidos muito próximos do meio externo não encontramos um sistema circulatório. Por exemplo, em esponjas não são encontrados sistemas circulatórios e a própria água, que penetra em seus complexos sistemas de canais, promove a circulação.

Animais de pequeno tamanho, onde a distância entre suas células e o meio externo é muito pequena, também não requerem sistemas circulatórios. Este é o caso de animais muito pequenos, finos ou achatados, como os diversos platelmintos. Neles, esta relação é claramente uma função da área/volume. Assim, formas muito pequenas podem apresentar um corpo como seção transversal cilíndrica, enquanto formas progressivamente maiores, apresentam um alto grau de achatamento do corpo, mantendo as células a uma curta distância do meio externo (**Figura 27.1**).



Figura 27.1: Seção transversal do corpo de platelmintos de diferentes dimensões. Observe como o achatamento é maior nas formas maiores, mantendo a distância entre as células internas e o meio externo.

Em função da taxa de difusão do oxigênio em diferentes tecidos, pode-se constatar que todas as células vivas devem estar, em média, a pelo menos 1mm do suprimento mais próximo de oxigênio (sistema circulatório). Assim, nas formas achatadas e de pequeno tamanho não são requeridos sistemas circulatórios, pois esta distância é mantida entre as células e o meio externo. Nos demais casos, foram selecionados animais que apresentavam algum mecanismo de transporte mais específico, denominados **sistemas circulatórios**.

SISTEMAS CIRCULATÓRIOS

O transporte de substâncias dentro do corpo do animal, seja ele do ambiente aquático ou aéreo, é geralmente efetuado por líquidos, nos quais ficam dissolvidos e são transportados os diferentes metabólicos. Desta forma, diversas cavidades internas preenchidas por líquidos podem se prestar a este papel, sendo denominadas sistemas circulatórios.

Cavidade gastrovascular

Em cnidários e ctenóforos, a cavidade gastrovascular nada mais é do que uma extensão do meio externo (água). Ela, por sua vez atinge todos os tecidos internos do corpo (Figura 27.2.a). Mantendo a distância mínima de 1 mm entre o líquido da cavidade e as células internas na maioria dos casos. Entretanto, em algumas formas, como as medusas, esta distância pode atingir até alguns centímetros. Nesses casos, a **MESOGLEIA** é muito espessa, mas é muito pouco celularizada, não requerendo portanto oxigênio, além de permitir uma difusão mais fácil de célula a célula, por ser gelatinosa (Figura 27.2.b e c).

MESOGLEIA

Camada gelatinosa provida de poucas células em alguns casos, localizada entre a ectoderme e a endoderme dos animais diploblásticos.

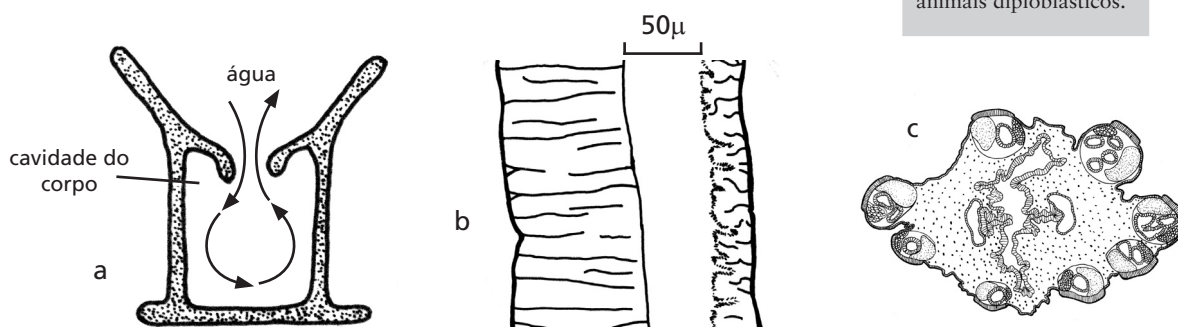


Figura 27.2: a) Circulação por cavidade gastrovascular em cnidários; b) mesoglêia de cnidário; c) mesoglêia de ctenóforo.

Cavidades corpóreas

As cavidades corpóreas como o celoma (nos animais celomados) ou a blastocele (nos animais ditos pseudocelomados) funcionam muitas vezes como sistemas circulatórios (ver Aula 18), pois têm contato com quase todos os tecidos do corpo e são preenchidas com líquido. Quando devidamente movimentadas, elas podem rapidamente transportar substâncias por todo o corpo.

Essas cavidades são o único sistema circulatório de alguns animais, como alguns nematódeos e rotíferos (pseudocelomados), sipunculídeos (celomados) e alguns poliquetos de pequeno tamanho (Figura 27.3). Neles, suas cavidades se encontram em constante pressão devido à contração de suas musculaturas. Com isso, qualquer mudança na contração faz com que o líquido se mova rapidamente, cumprindo assim com a função de transporte.

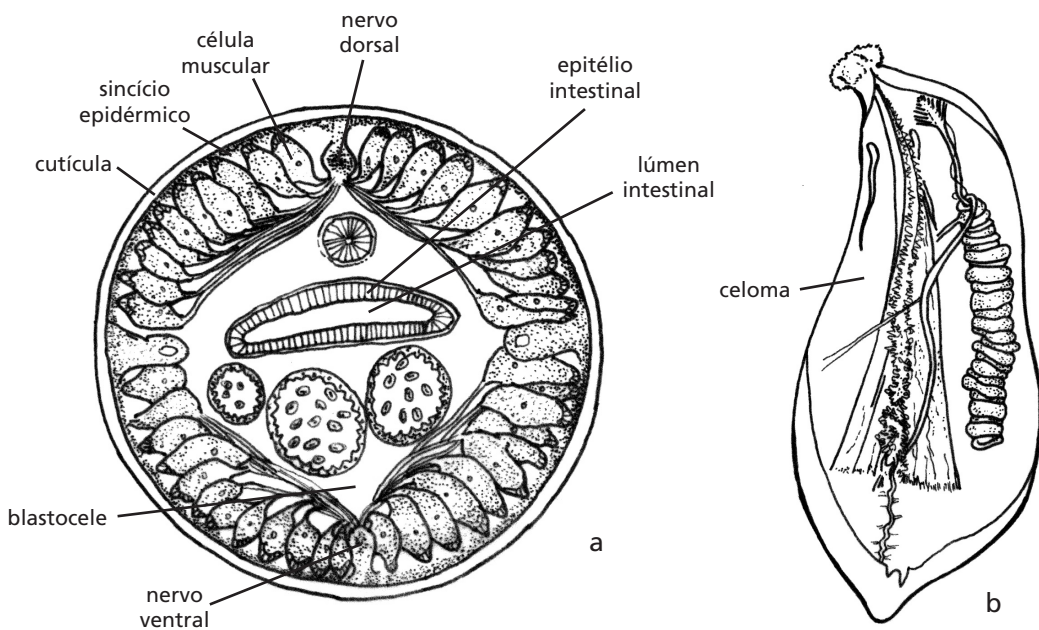


Figura 27.3: Cavidades circulatórias: a) *nematódeo* (blastocele); b) de *sipunculídeo* (celoma).

Sistemas vasculares

Com o aumento do metabolismo animal, houve um crescimento proporcional na demanda energética e, conseqüentemente, na necessidade de um fluxo mais rápido de oxigênio para os tecidos. O sistema de cavidades, devido a seu grande volume, se torna pouco eficiente em duas situações: quando os organismos são muito grandes e alongados e quando seu corpo é dividido em compartimentos, como acontece com muitos celomados metaméricos.

Ao longo da história evolutiva desses organismos, foram selecionados sistemas circulatórios mais eficientes, onde o líquido de transporte, usualmente denominado sangue, corre através de vasos tubulares. Desta forma, os vasos mais importantes correm no sentido longitudinal do corpo, tornando mais rápido o transporte ao longo do animal. Hidraulicamente, um vaso é muito mais eficiente do que uma cavidade, principalmente se ele contar com um mecanismo de contração muscular organizado, de forma a manter o sangue em movimento.

Este sistema com vasos, pode se tornar progressivamente mais complexo, com a presença de válvulas que impedem o refluxo e fazem com que o sangue corra sempre no mesmo sentido (**Figura 27.4**).

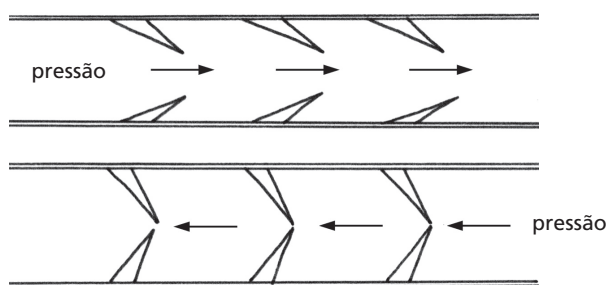


Figura 27.4: Sistema de válvulas em funcionamento, observe que quando o líquido é forçado a se mover, este só se move em um único sentido.

! Um bom exemplo das vantagens de vasos ocorre quando observamos um riacho. Nos trechos mais largos, a água se move lentamente, mas nos trechos mais estreitos ela corre em uma velocidade muito maior, mesmo se tratando do mesmo rio.

CORAÇÕES

O termo coração é muitas vezes considerado como sinônimo de **corações em câmara**. Entretanto, dependendo do seu grau de desenvolvimento, o vaso pulsátil também pode ser denominado coração. Assim, o termo coração em câmaras é mais correto.

A complexidade também pode ser maior no sentido do incremento do mecanismo de movimentação do líquido. Nas formas mais simples, como em alguns vermes, encontramos apenas uma musculatura associada a um vaso. A diminuição no diâmetro desse vaso empurra o sangue, sendo ele denominado vaso pulsátil. (**Figura 27.5.a**) Em sistemas mais complexos, encontramos câmaras providas de poderosos músculos que recebem o sangue e funcionam como bombas, enviando-o para todas as partes do corpo. Estas câmaras são normalmente denominadas **corações** ou mais corretamente **CORAÇÕES em câmara** (**Figura 27.5.b**).

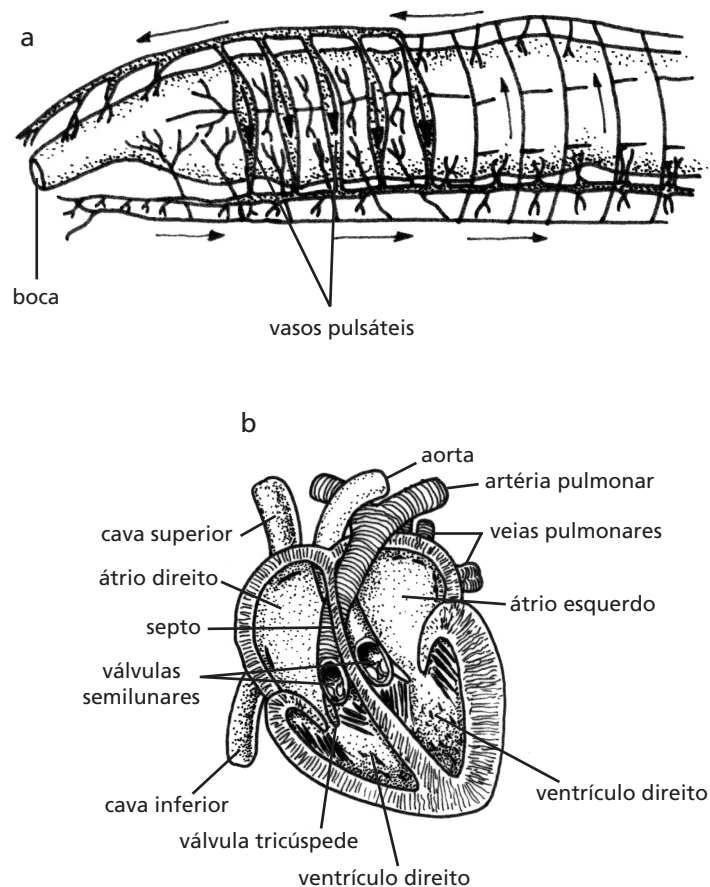


Figura 27.5: a) Vaso pulsátil de um anelídeo; b) coração em câmara de um mamífero.

Os sistemas vasculares podem, muitas vezes, abrir-se em cavidades maiores, as quais banham a maioria dos tecidos. Nestes casos, diz-se que o sistema circulatório é **aberto**, enquanto, nos casos onde o sangue corre sempre dentro de **vasos**, ele é denominado **fechado**.

Sistemas vasculares abertos

Os sistemas vasculares abertos bombeiam e transportam sangue oxigenado para cavidades maiores que banham boa parte dos tecidos (Figura 27.6). Esta cavidade, normalmente denominada **HEMOCELE**, pode ser constituída de um celoma ou, possivelmente, de uma blastocele permanente.

HEMOCELE = Hemo = sangue + cele = cavidade.

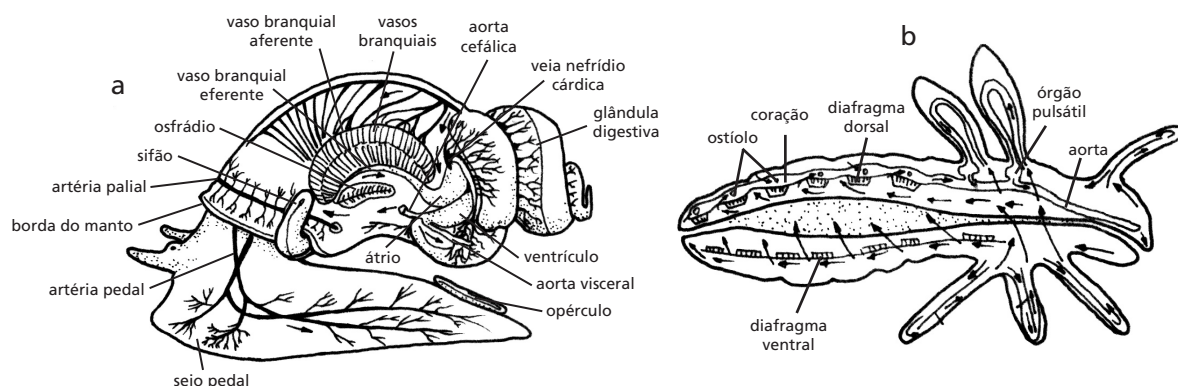


Figura 27.6: Sistemas circulatórios abertos: a) de um gastrópode; b) de um inseto.

O sistema aberto apresenta algumas vantagens e algumas desvantagens para os animais que o possui. A principal vantagem é a de não ser necessário vasos que cheguem a todos os tecidos. Apenas um grande vaso pulsátil para bombear o sangue que banha os tecidos e um vaso para recolher o sangue depois disso. A principal desvantagem é a de não permitir que o sangue corra pelo corpo a grandes velocidades, pois quando “deságua” nas cavidades perde muito sua velocidade, semelhante a uma cachoeira cujas águas caem em uma lagoa. O sistema circulatório aberto é, portanto, comum em animais de baixa atividade, como por exemplo, os moluscos gastrópodes e bivalves. Entretanto, sistemas abertos ocorrem também em artrópodes.

Por que os insetos, com seu alto metabolismo e atividade, apresentam um sistema circulatório aberto?

A resposta a esta pergunta pode ser encontrada na aula anterior e no início desta. Embora o sistema circulatório seja um sistema de transporte, ele é limitado em seu grau de desenvolvimento principalmente pelo transporte de oxigênio, que não pode ser armazenado nos tecidos.



Embora as aranhas, como todo artrópode, tenham patas articuladas, estas são utilizadas apenas na locomoção. A sustentação do corpo é mantida por um esqueleto hidrostático, já que seu exoesqueleto não é tão rígido como o dos demais artrópodes. Por isso, quando você dá uma chinelada em uma aranha, esta “murcha” e ninguém acredita quando você diz que a aranha que você matou era “imensa”.

No caso dos insetos, o sistema circulatório não é responsável pelo transporte de oxigênio, pois, como visto na Aula 26 (Trocias gasosas) as traquéias dos insetos levam o oxigênio direto aos tecidos, não havendo troca de gases com o sangue.

Nos artrópodes com traquéias, a hemocele pode ter também um papel secundário como esqueleto hidrostático, como na sustentação das aranhas, ou auxiliando os artrópodes na substituição da cutícula no período de muda.

Sistemas vasculares fechados

Nos sistemas fechados, o sangue nunca abandona os vasos, fazendo com que o fluxo sanguíneo seja mais rápido e eficiente. Entretanto, ele requer que os vasos tenham extensões em todos os tecidos compostas de microvasos extremamente delgados, denominados **capilares**.

Em protostômios, os sistemas vasculares fechados (**Figura 27.7**) são comuns em anelídeos, principalmente aqueles que apresentam grande atividade, e em moluscos cefalópodes, como os polvos e as lulas. Em deuterostômios, são comuns em todos os vertebrados, que é um grupo caracterizado pela grande atividade e metabolismo.

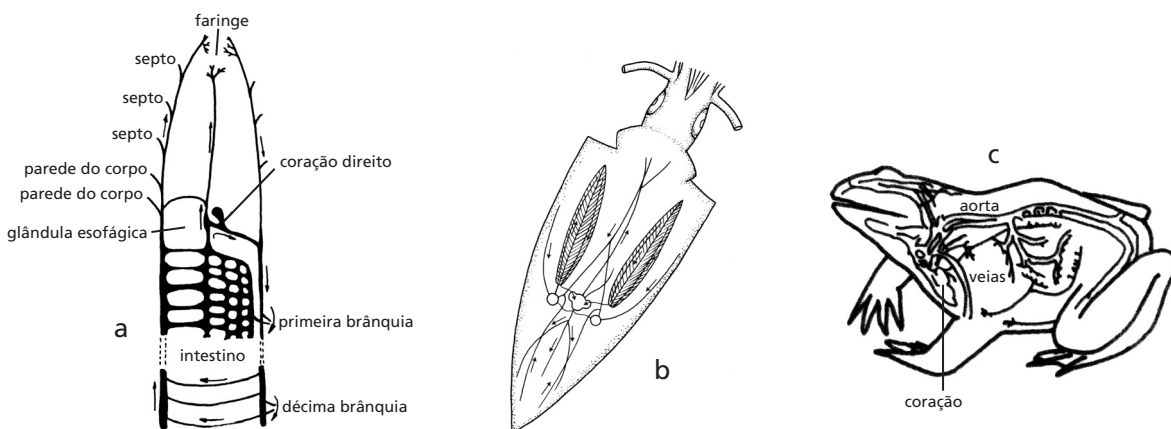


Figura 27.7: Sistemas vasculares fechados: a) anelídeo (*Nereis* sp.); b) lula (*Loligo* sp.); c) sapo (*Bufo* sp.).

Sistemas vasculares mistos

Entre os deuterostômios, ocorrem também esqueletos mistos, onde um sistema vascular fechado está presente paralelamente a um sistema aberto em cavidades. Isto acontece nos equinodermos, como a estrela-do-mar, onde o celoma origina o **sistema aquífero**, cuja função básica é de sustentação e locomoção. Este sistema aquífero pode, entretanto, funcionar secundariamente como um sistema circulatório auxiliado pelo **sistema hemal**, que é o sistema circulatório por vasos fechados que adquire função mais importante nos holoturóides (pepinos-do-mar) (Figura 27.8).

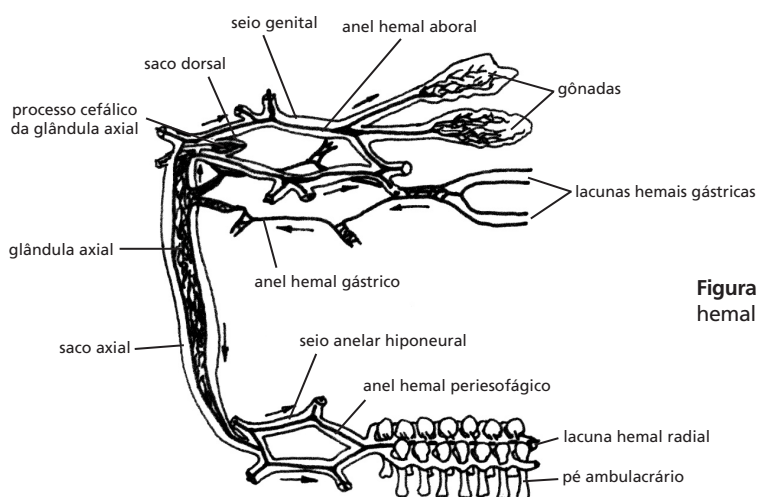


Figura 27.8: Sistemas aquífero e hemal de uma estrela-do-mar.

O TRANSPORTE DE OXIGÊNIO POR UM MEIO LÍQUIDO – O SANGUE

Como visto na aula anterior, a solubilidade do oxigênio na água é muito baixa quando comparada ao ar (ca. 1% do volume total). Animais, sejam eles do ambiente aéreo ou aquático, com sistema circulatório baseado em líquidos, apresentam um sistema com eficiência limitada, uma vez que este é capaz de transportar pouca quantidade de oxigênio.

Assim, para carregar 1 ml de oxigênio de uma região de captura de oxigênio (por exemplo, pulmão) para um tecido, o animal teria de carregar 100 ml de líquido (água). Devido à grande densidade da água existe um custo energético para movê-la. Esse custo, por sua vez, tem que ser compensado pela produção de energia que depende da quantidade de oxigênio transportado.

Desta forma, um passo evolutivo muito importante na evolução dos sistemas circulatórios foi o aparecimento de moléculas, dissolvidas no sangue, que são capazes de carregar oxigênio, além daquele já dissolvido.

Essas moléculas, geralmente, são proteínas que têm um metal ligado, o qual, tem uma grande afinidade pelo oxigênio. Ao se associar ao oxigênio, o sangue passa a carregar uma quantidade que pode chegar a 20 vezes mais do que se o carregasse apenas dissolvido na água. Portanto, é um aumento impressionante na eficiência do transporte de oxigênio e, não por acaso, surgiram provavelmente de forma independente nos mais diversos grupos. Essas moléculas são denominadas **PIGMENTOS RESPIRATÓRIOS**.

PIGMENTOS RESPIRATÓRIOS

Embora tenham função de transporte de oxigênio, estas moléculas são normalmente denominadas pigmentos, pois em geral dão cor ao líquido que as carrega (o sangue). Esta cor pode variar conforme a estrutura da molécula ou ao fato de estarem ou não oxigenadas podendo ser vermelhas, azuis ou mesmo verdes.

Pigmentos respiratórios

Os pigmentos respiratórios são normalmente moléculas de proteínas que têm um grupo prostético, geralmente na forma de uma porfirina, que se liga reversivelmente a um átomo de metal que tem grande afinidade pelo oxigênio. Esta porfirina em muitos pigmentos é denominada grupo **HEME**, como no caso da hemoglobina (**Figura 27.9**).

HEME

Você estudou isso em Bioquímica I.

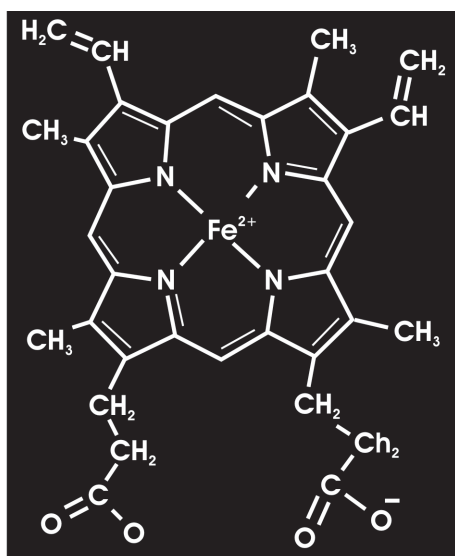


Figura 27.9: Estrutura de uma molécula de hemoglobina.

Os pigmentos respiratórios podem ocorrer dissolvidos no sangue ou dentro de células ou corpúsculos, não sendo exclusivos do sistema vascular. Alguns animais apresentam pigmentos respiratórios no líquido celomático. São conhecidos quatro pigmentos respiratórios nos animais: **hemoglobina, hemocianina, hemeritrina e clorocruorina**. As diferenças entre eles estão na estrutura da porfirina, no metal que se liga ao oxigênio e no tamanho das moléculas. No quadro abaixo, podemos ver qual o metal, qual o peso molecular e sua ocorrência nos grupos taxonômicos de cada um dos pigmentos:

Quadro 27.1

PIGMENTO	METAL	PESO MOLECULAR	GRUPOS TAXONÔMICOS
HEMOGLOBINA	Ferro	1.700 até 3.000.000	Protistas, alguns anelídeos e crustáceos, poucos moluscos e insetos, vertebrados.
HEMOCIANINA	Cobre	300 até 9.000.000	Moluscos e alguns crustáceos.
HEMERITRINA	Ferro	108	Uma família de poliqueta, sipúnculos, braquíópodes e priapulídeos.
CLOROCRUORINA	Ferro	2.750.000	Quatro famílias de poliquetos.

A partir da observação do quadro acima, podemos estabelecer alguns fatos:

O pigmento hemoglobina ocorre em grupos tão distintos como protistas e vertebrados, e ainda tanto em protostômios como em deuterostômios.

Animais do mesmo grupo taxonômico como moluscos e crustáceos podem apresentar dois pigmentos diferentes (hemoglobina ou hemocianina).

Anelídeos poliquetas podem apresentar até três pigmentos diferentes (hemoglobina, hemeritrina, clorocruorina).

Pigmentos menos comuns, como a hemeritrina, podem ocorrer dispersos em vários grupos taxonômicos (poliquetas, sipúnculos, braquíópodes e priapulídeos).

Em função das questões levantadas acima podemos supor que os pigmentos respiratórios devem ter surgido independentes diversas vezes (são homoplásticos), pois o mesmo pigmento ocorre em grupos muito distintos.

Além disso, o fato de os poliquetas apresentarem três dos quatro pigmentos existentes, pode indicar que o caráter “pigmento respiratório” pode ter surgido no ancestral dos anelídeos. Um de seus estados teria surgido inicialmente e, por pequenas mutações, ele teria se modificado nos demais estados dentro do grupo.

Para tentarmos compreender a homoplasia dos pigmentos, basta notar que o peso molecular das hemoglobinas varia muito, o que reforçaria a idéia de um surgimento independente. Este não surpreende se considerarmos a importância adaptativa de uma molécula que aumenta em mais de 20 vezes a capacidade de transporte de oxigênio e o fato de o grupo prostético dos pigmentos respiratórios já ter surgido, ao longo da evolução, com outras funções. Isto ocorre nas citocromo oxidases, inclusive de plantas onde elas fazem parte do sistema de transporte de elétrons na cadeia respiratória. Ou seja, uma molécula com afinidade por oxigênio que tinha outra função celular, adquiriu secundariamente a função de transporte de oxigênio.



Este tipo de adaptação secundária do estado de um caráter é normalmente denominado pré-adaptação.

AFINIDADE PELO OXIGÊNIO DOS PIGMENTOS RESPIRATÓRIOS

Nem todos os pigmentos respiratórios apresentam a mesma afinidade pela molécula de oxigênio. Muitas vezes, o mesmo pigmento pode apresentar afinidades diferentes em espécies diferentes. Além disso, até mesmo os pigmentos de um mesmo indivíduo podem ter afinidades distintas em função das condições químicas e de temperatura do meio interno e externo.

A afinidade é normalmente expressa através de uma curva denominada **curva de dissociação do oxigênio**. Ela caracteriza a afinidade do pigmento pelo oxigênio através de um gráfico (Figura 27.10). No eixo das abscissas, temos a pressão parcial de oxigênio no meio ambiente e, no das ordenadas, a porcentagem de moléculas de pigmento que estão saturadas de oxigênio.

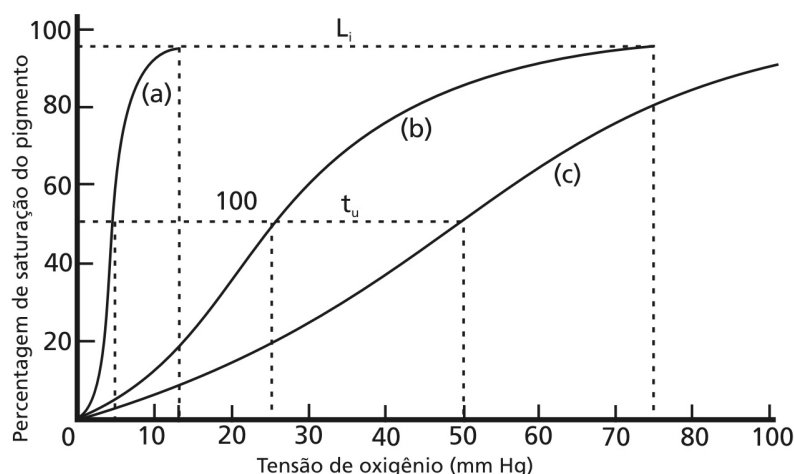


Figura 27.10: Curva de dissociação do oxigênio para diferentes grupos animais: a) anelídeo poliqueta de ambiente entre-marés (*Arenicola* sp.); b) ser humano (*Homo sapiens*); c) pombo.

Uma curva de dissociação, como no caso de *Arenicola* sp. (Figura 27.10.a), indica uma afinidade muito maior, ou seja, o sangue do animal é capaz de se ligar ao oxigênio mesmo quando sua pressão parcial no ambiente é baixa. Uma curva de baixa afinidade ocorre, por exemplo, em pombos (Figura 27.10.c), onde a porcentagem de moléculas saturadas de oxigênio é menor mesmo quando a pressão parcial do meio é grande. Uma forma mais simples de comparar diferentes curvas, sem ter de se preocupar com a sua forma, é considerar o valor da pressão parcial de oxigênio do meio no qual metade das moléculas de pigmentos estão saturadas (50%). Este ponto é usualmente denominado P_{50} .

Afinidades diferentes por oxigênio podem ser interpretadas de diversas formas. Aqui nos limitaremos a apontar aqueles casos em que a afinidade está relacionada ao tipo de ambiente onde vivem os animais. Como exemplo, veremos alguns animais aquáticos e o significado de seus valores de P_{50} .

- P_{50} alto (baixa afinidade) – ocorre em formas de ambientes muito oxigenados onde as estruturas respiratórias não oferecem grande resistência à difusão do oxigênio. Nestes casos, a pressão parcial de oxigênio no meio é semelhante à do sangue. São comuns em alguns animais de ambiente aéreos e em animais de ambientes aquáticos muito saturados como as regiões de forte batimento de ondas.

- P_{50} baixo (alta afinidade) ocorre também em formas de ambientes bem oxigenados (meio aéreo ou mesmo aquático), mas onde as estruturas respiratórias oferecem uma grande barreira à difusão do oxigênio. Nestes casos, a pressão parcial de oxigênio do sangue é menor que a do meio. Ocorre por exemplo em crustáceos cujas brânquias não permitem uma fácil difusão.

- P_{50} muito baixo (afinidade muito grande) ocorre em animais aquáticos que vivem em ambientes muito pobres em oxigênio, como áreas poluídas ou regiões entre-marés (águas paradas durante os períodos de maré-baixa). A alta afinidade permite a esses animais captarem o pouco oxigênio disponível no ambiente. Ocorre em muitos animais que indicam ambientes poluídos organicamente, e, portanto, pobres em oxigênio, como lagos e baías poluídas. Alguns exemplos são oligoquetos tubificídeos e larvas aquáticas de alguns insetos quironomídeos.

A afinidade dos pigmentos também pode variar dentro do mesmo organismo, com os pigmentos apresentando maior afinidade quando em contato com as estruturas respiratórias e menor afinidade quando em contato com os tecidos, liberando assim o oxigênio para estes.

Outras variações ocorrem também quando há mistura de sangue oxigenado, proveniente das estruturas respiratórias, com sangue desoxigenado proveniente dos tecidos. Nesses animais a afinidade é alta enquanto, naqueles em que não há mistura entre os dois tipos de sangue, a afinidade pode ser mais baixa. Entretanto, não nos estenderemos neste tópico que está além dos objetivos propostos na presente aula.

RESUMO

Os sistemas circulatórios surgem como uma necessidade para o transporte interno de oxigênio, devido à sua baixa difusão quando efetuada célula a célula. Nos metazoários pequenos e nos poríferos, como o meio ambiente está a uma curta distância dos tecidos, eles não são necessários. Os animais maiores apresentam sistemas circulatórios na forma de **cavidades corpóreas**, como o celoma e a blastocele, ou de **sistemas vasculares**. Uma maior eficiência no metabolismo ocorre quando o líquido de transporte, ou sangue, corre através dos **sistemas vasculares**. Eles podem ser do tipo **aberto**, onde vasos se abrem em uma cavidade **hemocélica** que banha os tecidos, ou **fechados**, onde o sangue nunca abandona os vasos e a troca de gases e outras moléculas se dá por difusão entre a parede de vasos minúsculos (capilares) e o tecido. Os sistemas abertos não requerem redes vasculares muito complexas, mas são mais lentos no transporte, sendo restritos, na maioria dos casos, a animais de baixo metabolismo e atividade. Os sistemas fechados requerem uma densa e complexa rede de capilares para atingir todos os tecidos, entretanto, sua circulação é mais rápida, ocorrendo em animais de maior metabolismo e maior atividade.

Como o sangue é basicamente composto de água, onde a solubilidade de oxigênio é extremamente baixa (<1%), surgiram, nos diferentes grupos animais, moléculas que se ligam ao oxigênio, podendo transportar uma maior quantidade deste por volume de sangue. Estas moléculas aumentam em mais de 20 vezes a eficiência do transporte, sendo denominadas **pigmentos respiratórios**. São conhecidos quatro tipos diferentes de pigmentos respiratórios nos animais, sendo que todos são muito semelhantes e ocorrem dispersos nos mais diferentes grupos, configurando uma origem provavelmente homoplástica.

A afinidade maior ou menor dos pigmentos pelo oxigênio pode ser observada pela curva de dissociação do oxigênio, a qual pode variar em função de uma série de fatores, incluindo o ambiente onde vive o animal, a mistura ou não, dentro do corpo de sangues oxigenados e desoxigenados, e a barreira à difusão que as estruturas respiratórias podem oferecer às trocas gasosas.

EXERCÍCIO AVALIATIVO

Suponhamos que você fosse fazer um estudo sobre filogenia dos principais grupos de metazoários. Na etapa de levantamento de caracteres, você incluiria os diferentes tipos de pigmentos respiratórios na sua análise?

INFORMAÇÃO SOBRE A PRÓXIMA AULA

Na próxima aula, veremos como os metazoários obtêm oxigênio do meio ambiente para oxidar o alimento absorvido após a digestão no processo de respiração celular.

Excreção e regulação osmótica e iônica

AULA 28

Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

- Conhecer os principais produtos de excreção dos animais.
- Discutir as estruturas primárias e secundárias utilizadas no processo de excreção e na regulação osmótica.

Pré-requisitos

Aula 18 – Celoma, Metameria e a diversidade animal.

Aula 27 – Transporte e sistema circulatório.

INTRODUÇÃO

EXCRETAS

NITROGENADOS

O termo é aplicado a substâncias produzidas pelo metabolismo celular após a degradação de proteínas. Como são substâncias tóxicas para o organismo, elas devem ser eliminadas de forma eficiente, tornando-se as grandes responsáveis pela eficiência do sistema excretório, embora outros resíduos não tóxicos também façam parte do processo de excreção.

SISTEMA HEMAL E AQUÍFERO

Sistema hidráulico de canais vasculares com múltiplas funções (trocas gasosas, circulação e locomoção).

Uma estrela-do-mar, quando colocada em água doce, morre em questão de segundos devido a sua incapacidade de controlar as concentrações internas de solutos.

A excreção pode ser apresentada como um processo biológico ou como um sistema. Como processo, podemos definir excreção como a eliminação de resíduos metabólicos. Entretanto, ela envolve alterações na pressão osmótica interna das células, tecidos ou corpo do animal. Esse processo está intimamente associado à manutenção de concentrações apropriadas de solutos e de um volume corpóreo adequado.

Como sistema, podemos defini-la como o conjunto de estruturas responsáveis pela eliminação dos resíduos derivados do metabolismo celular. Entre os principais resíduos encontramos o gás carbônico, o qual, por ser um gás, já foi discutido na aula de trocas gasosas. Portanto, consideraremos como sistemas excretórios apenas aqueles responsáveis pela eliminação dos demais resíduos, principalmente, os tóxicos como os **EXCRETAS NITROGENADOS**.

A manutenção do volume corpóreo adequado e da concentração de solutos, embora seja realizada pelas mesmas estruturas excretórias, será apresentada separadamente no item **regulação osmótica**.

ESTRUTURAS EXCRETÓRIAS E DE REGULAÇÃO OSMÓTICA

Alguns metazoários, como os cnidários e os equinodermos, não apresentam qualquer estrutura excretória. A eliminação de excretas se dá diretamente através da cavidade gastrovascular (cnidários) ou do **SISTEMA HEMAL E AQUÍFERO** (equinodermos) ou, ainda, pela própria superfície corporal. Com a ausência de estruturas excretórias, a regulação da concentração interna de solutos (que será vista mais adiante) também fica prejudicada. Não é por acaso que estes animais são formas tipicamente marinhas, onde a concentração do meio é semelhante a dos tecidos, e são incapazes de sobreviver em ambientes de **água doce**. A famosa hidra, hidrozoário de água doce, é uma exceção. Ela é hipertônica em relação ao meio e ganha água por osmose. No entanto, não se tem conhecimento de como ela elimina o excesso de água.

Nos demais animais, podemos encontrar diversos tipos de estruturas excretórias, algumas com esta função e outras que apresentavam primariamente uma outra função (reprodução, trocas gasosas etc.) e adquiriram a função excretória secundariamente.

Vacúolos

As esponjas (poríferos) de água doce apresentam mecanismos de controle da concentração interna de solutos em nível celular. Elas apresentam **vacúolos contráteis**, assim como os protistas, evidenciando a manutenção de uma característica plesiomórfica no grupo. O mecanismo de funcionamento dos vacúolos ainda não é claro, mas alguns deles conseguem manter internamente concentrações osmóticas muito menores que as do citoplasma circundante, funcionando, portanto na eliminação do excesso de água que entra por difusão nas células da esponja.

Estruturas excretórias e de regulação osmótica primárias

As estruturas excretórias, aqui denominadas primárias, são aquelas que têm uma origem ectodérmica, ou seja, são uma invaginação corpórea cujo papel primário é eliminar resíduos e controlar a concentração de solutos. Muitos nomes foram dados para estruturas similares e provavelmente homólogas, fazendo crer que existe uma grande diversidade de estruturas excretórias, o que não corresponde à realidade.

As principais estruturas primárias, encontradas nos animais, são: protonefrídio, metanefrídio, túbulo de Malpighi e rim.

Protonefrídio

Os **PROTONEFRÍDIOS** são tubos cuja extremidade interna ao corpo é fechada e provida de um flagelo ou de vários cílios, muitas vezes denominados solenócitos e células-flama ou células-chama, respectivamente. O batimento dos cílios ou flagelos cria uma pressão interna negativa que faz com que os líquidos corpóreos sejam sugados através de uma membrana em um mecanismo de ultrafiltração, onde íons dissolvidos passam pela membrana e as moléculas em suspensão ficam retidas.

Os protonefrídios ocorrem em animais que não apresentam cavidade celomática, como na maioria dos acelomados (platelmintos e nemertíneos) e nos pseudocelomados.

PROTONEFRÍDIO

Protonefrídios - do grego *Prôto* = primário + *Nephros* = rim.

Alguns autores consideram que os protonefrídios de **protocordados** são, na realidade, homoplásticos e, portanto, uma convergência devido à função. Embora não possa ser descartada a hipótese de se tratar de um carácter plesiomórfico, devido ao fato de manterem uma estrutura tipicamente larval.

Também em alguns celomados de pequeno tamanho (anelídeos poliquetas), na maioria das larvas de metazoários marinhos, cujos adultos têm metanefrídio, e em adultos de anfioxos (**protocordados**). Geralmente são encontrados em grande número (**Figura 28.1**), drenando os espaços extracelulares ou a blastocele desses animais.

Pense no seguinte caso.

Um animal celomado de grande volume corpóreo com protonefrídio? Isso seria viável?

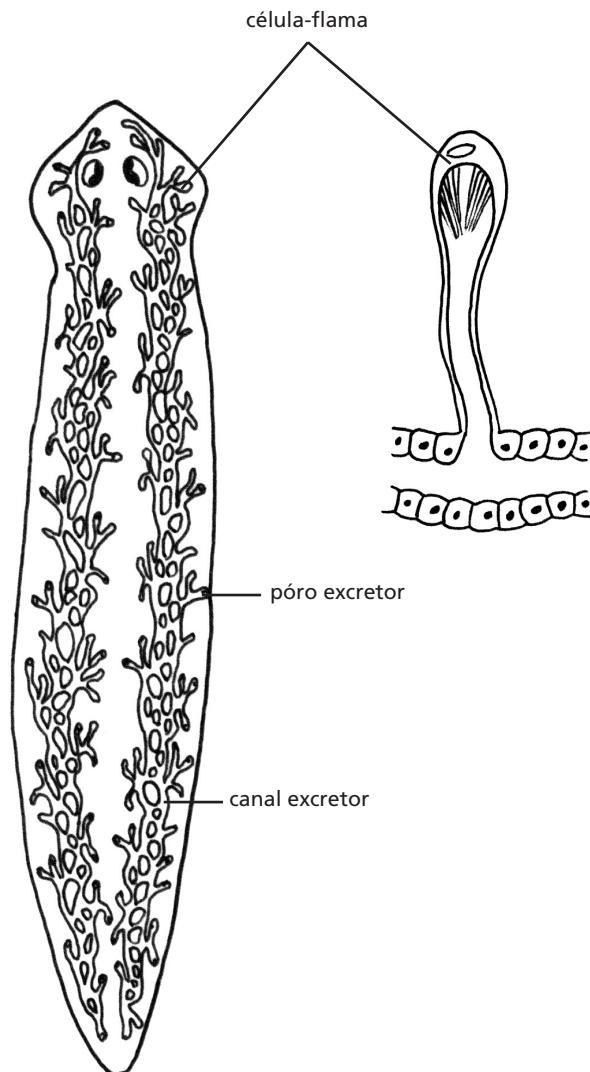


Figura 28.1: Protonefrídio de planária.

Metanefrídio

Os **METANEFRÍDIOS** também são tubos que ligam o meio interno do corpo ao meio externo. São provavelmente originados de protonefrídios que se abriram internamente. A abertura externa é denominada nefridióporo e a abertura interna, nefróstoma. Esta, geralmente, tem forma de um funil ciliado (**Figura 28.2**). O batimento dos cílios puxa os líquidos internos para o tubo metanefridial e os elimina para fora do corpo.

Por serem abertos, os metanefrídios não efetuam a ultrafiltração de líquidos, mas sim a reabsorção ativa de substâncias dissolvidas, principalmente íons, através de seus longos tubos. O fato de serem abertos se deve, provavelmente, à sua maior capacidade de drenagem, comparada à dos protonefrídios. Os metanefrídios são encontrados apenas naqueles animais que têm uma cavidade verdadeira, os celomados.

Agora pense nesta outra situação.

Um animal acelomado com metanefrídio? Isso também seria viável?

METANEFRÍDIOS

Do grego *Metá* = posterior, secundário.

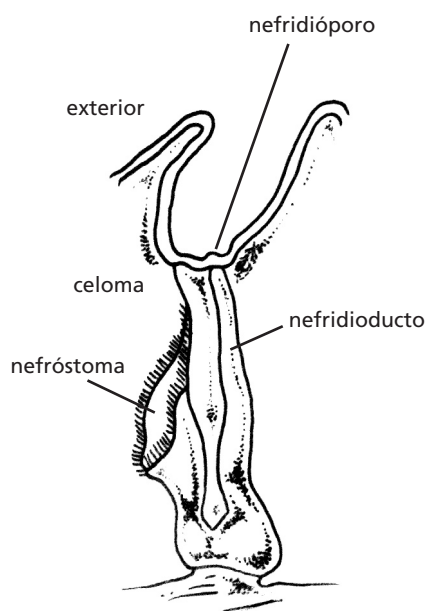


Figura 28.2: Metanefrídios de anelídeos.

Túbulo de Malpighi

Em insetos e em alguns aracnídeos, o sistema excretório é do tipo secretor e consiste de túbulos de origem ectodérmica, que desembocam entre as porções média e posterior do intestino, denominados **túbulos de Malpighi**. Sua extremidade interna termina em fundo cego (é fechada) e situa-se na cavidade hemocelomática. O potássio, os uratos e outros solutos são secretados ativamente para o seu interior e a água atravessa passiva por osmose. No interior do túbulo, os uratos são mantidos em solução e passam para o tubo digestivo. No intestino posterior, o potássio, a água e grande parte dos solutos são reabsorvidos pelas glândulas retais e o ácido úrico é precipitado, sendo expelido juntamente com as fezes (Figura 28.3). Nos insetos, o número de túbulos de Malpighi pode variar de 2, na cochonilha (*Coccidae*), a cerca de 250, no gafanhoto do deserto (*Acrididae*), sendo ausente em pulgão (*Aphididae*) e *Collembolla*.

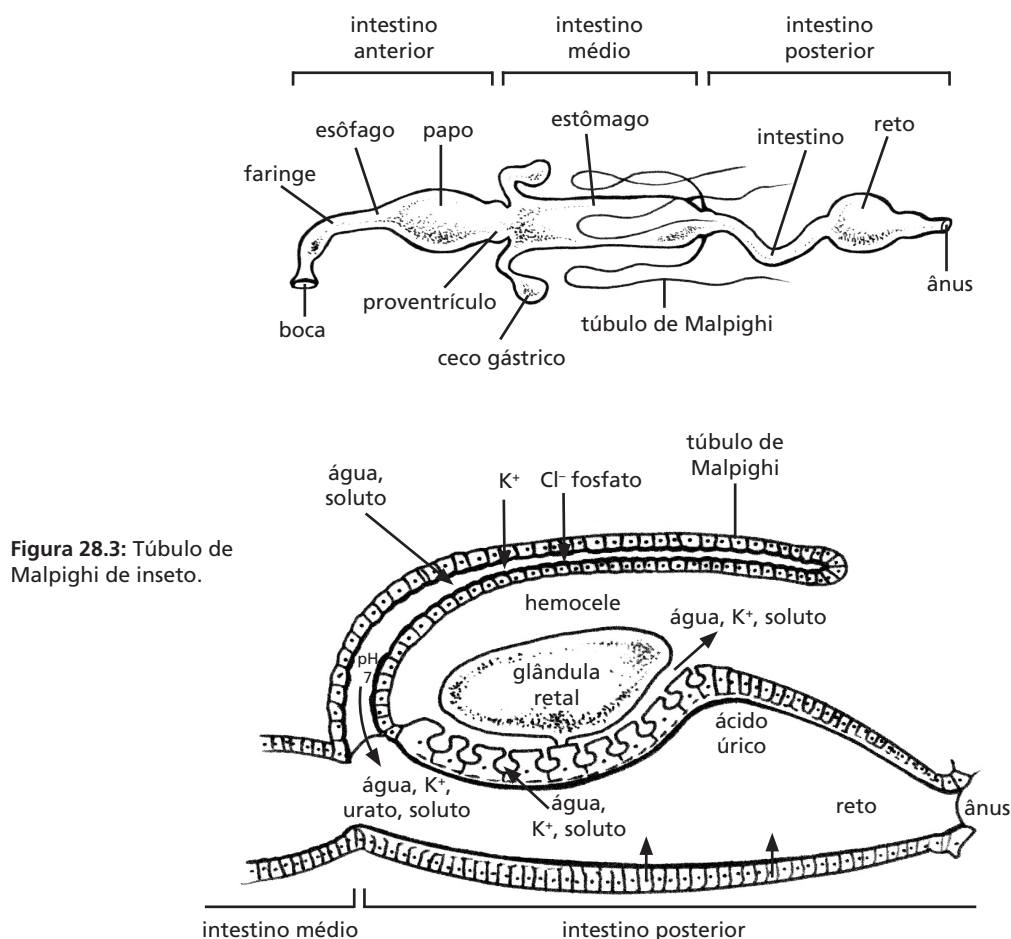


Figura 28.3: Túbulo de Malpighi de inseto.

Por ser muito insolúvel, o ácido úrico pode ser, temporariamente, armazenado nos corpos adiposos de muitos insetos. Por exemplo, a barata acumula grandes quantidades de ácido úrico quando sua dieta é rica em nitrogênio, mas esse estoque diminui quando é pobre nesta substância. O ácido úrico também forma depósitos permanentes na epiderme dos insetos. Este acúmulo contribui com o seu padrão de coloração, como por exemplo, as manchas brancas das ninfas (formas imaturas) do percevejo do gênero *Dysdercus*.

Rim

As estruturas excretórias são similares em todos os vertebrados e são denominadas rins. Funcionando pelo princípio de filtração-reabsorção, eles conseguem filtrar grandes volumes de fluidos, reabsorvendo mais de 90% desse volume e excretando cerca de 1% como urina. Somente alguns actinoptérgios marinhos que vivem em ambientes estáveis apresentam um rim do tipo secretor, como o dos insetos.

O rim é formado por um número variado de diminutos túbulos, denominados **néfrons**, que se unem por um sistema de ductos (**Figura 28.4**). Sua função é a remoção do excesso de água, de sais, de metabólitos e de substâncias estranhas ao sangue.

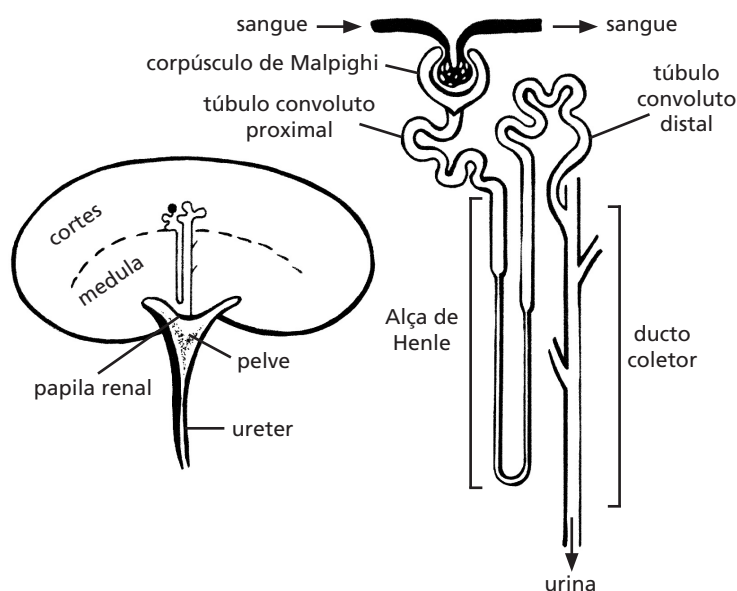


Figura 28.4: Rim de um mamífero (Schmidt-Nielsen, 1996).

Na extremidade interna de cada néfron, denominada **corpúsculo de Malpighi**, ocorre a integração entre o sistema circulatório e o excretório (Figura 28.5). Ela é constituída por um **glomérulo**, aglomerado de capilares arteriais porosos e enovelados (sistema circulatório), e uma cápsula, denominada **cápsula de Bowman**, parte interna do túbulo. O glomérulo é envolto pela cápsula que tem forma hemisférica e é formada por uma dupla camada. Sua camada interna está intimamente aderida aos capilares e funciona como um filtro. A pressão sangüínea arterial impele o fluido através das finas paredes dos capilares do glomérulo para a cápsula de Bowman; formando um ultrafiltrado, composto por sangue sem suas células e as moléculas maiores.

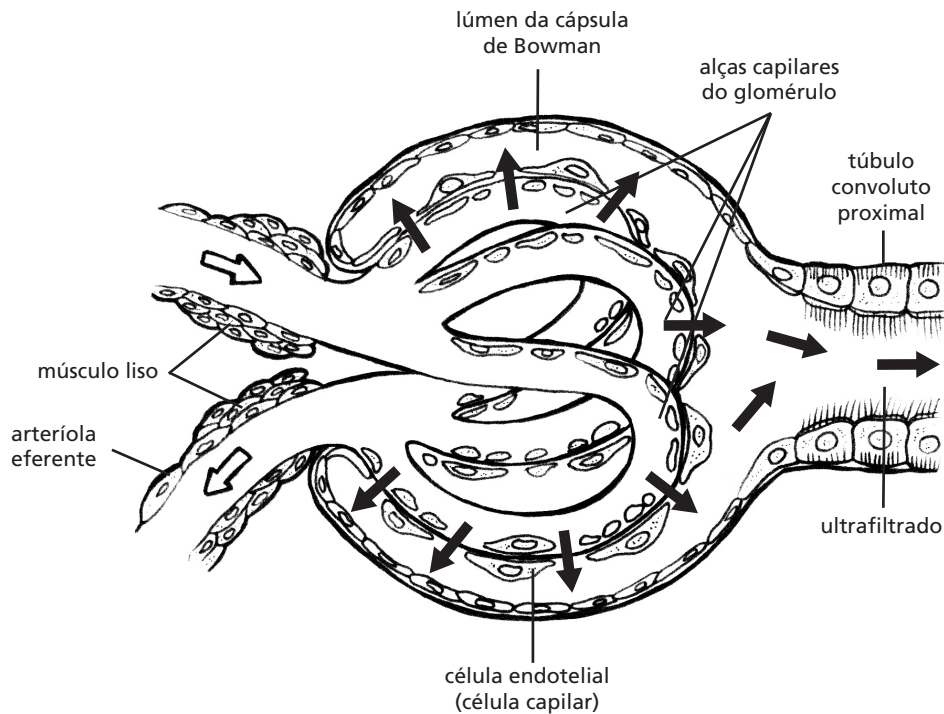


Figura 28.5: Detalhe do corpúsculo de Malpighi típico de um mamífero (Pough *et al.*, 2003).

O corpúsculo de Malpighi continua através do **túbulo convoluto**, que pode atingir um comprimento considerável (**Figura 28.6**). Dentro dele, o fluido é modificado pela reabsorção dos metabólitos essenciais (glicose, aminoácidos etc.) e da água. As porções proximal e distal do túbulo convoluto de mamíferos e aves são separadas por uma alça delgada, denominada **alça de Henle**. Esta alça é a região responsável pela formação de uma urina mais concentrada que o plasma sangüíneo. Como os néfrons dos demais vertebrados (tubarões, sardinhas, pererecas, cobras etc.) não têm essa alça, sua urina não é mais concentrada que o seu plasma sangüíneo.

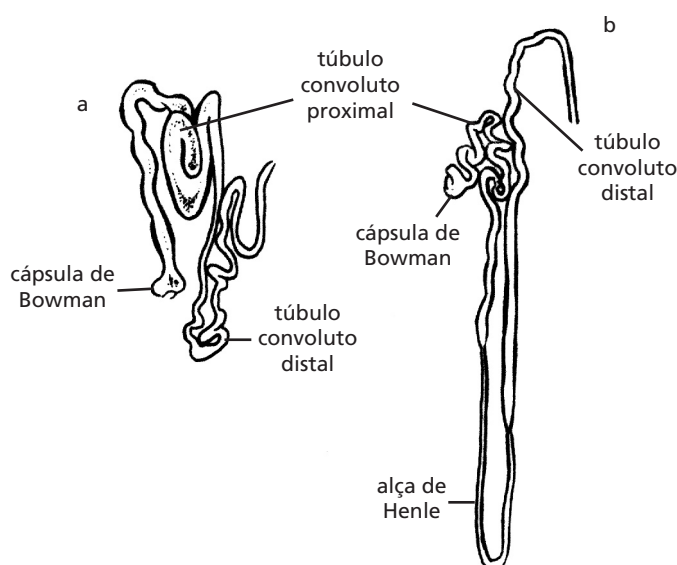


Figura 28.6: Tipos de néfrons: a) de anfíbio; b) de mamífero.

Nos vertebrados, como por exemplo, tubarões (condrictes), sardinhas (actinoptério), pererecas (anfíbio) etc. a urina passa do rim para um ducto de origem mesodérmica, denominado **ducto arquinéfrico**. Nos vertebrados **AMNIOTAS** adultos, a urina é coletada em cada rim por um ducto, denominado **ureter**, que se origina da base do ducto arquinéfrico. Antes de se abrir para o exterior, o ducto urinário, de um lado, une-se ao ducto do lado oposto. Esta junção ocorre próximo à cloaca.

AMNIOTA

Grupo de animal vertebrado (aves, mamíferos e demais répteis) cujo embrião se desenvolve dentro de uma membrana denominada **âmnio**. Ela forma o saco ou cavidade amniótica, na qual está contido o líquido amniótico, destinado a conservar úmido o embrião e protegê-lo contra choques e adesão.

Uma bexiga urinária surgiu apenas nos tetrápodes, embora alguns dos condrictes e dos actinoptérígios apresentem dilatações em seus ductos urinários para armazenar urina. Dentre os tetrápodes amniotas, somente os mamíferos mantiveram a bexiga urinária, nos demais ela foi perdida. Na maioria dos vertebrados, os órgãos urinários, reprodutores e alimentares chegam ao exterior por meio de uma única abertura, denominada **cloaca**.

Estruturas excretórias e de regulação osmótica secundárias

As estruturas excretórias secundárias, celomoduto e brânquia, têm origem endodérmica, ou seja, a partir de tecidos internos e crescem para fora. Embora participem respectivamente da reprodução e da respiração, elas desenvolveram secundariamente a função de eliminar excretas e controlar a concentração de solutos.

CELOMODUTO

Diversos autores denominam nefrídios estas estruturas excretórias de moluscos e artrópodes. No entanto, segundo sua origem embrionária, eles devem ser considerados como celomodutos que adquiriram a capacidade excretória secundariamente.

Celomoduto

Os **CELOMODUTOS** são estruturas de origem mesodérmica e não ectodérmica como os proto e metanefrídios. Apresenta função reprodutiva, sendo formada por um tubo que liga, primariamente, o celoma dos anelídeos com o meio externo para expulsão de gametas. Em alguns anelídeos, eles se fundem aos metanefrídios formando uma estrutura única, de origem mista, denominada mixonefrídio, com função excretória e reprodutiva (**Figura 28.7**).

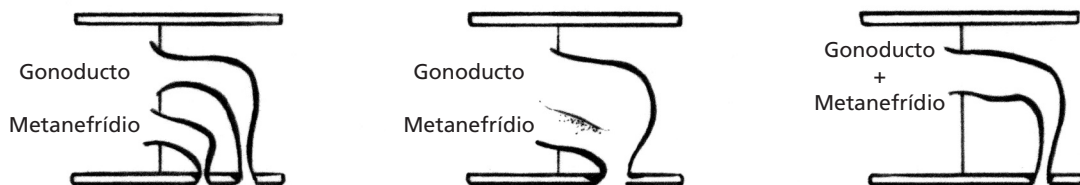


Figura 28.7: Origem dos mixonefrídios de anelídeos através da fusão dos metanefrídios e celomodutos.

Os celomodutos parecem ter se mantido em diversos grupos como em moluscos, onicóforos e diversos artrópodes. Eles ligam o meio externo a uma cápsula interna, que representa o resquício de celoma destes animais. Historicamente, tais estruturas eram denominadas nefrídios e recebem nomes especiais como **glândulas coxais**, **glândulas antenais**, **glândulas verdes**, entre outros, dependendo da posição que ocupam no corpo.

A **Figura 28.8** mostra a tendência de redução no número de celomodutos, com a perda da metameria. Alguns mantendo a função excretória e outros se tornando estruturas reprodutivas. Com isso, o resquício de celoma que fecha a parte interna dos celomodutos funciona como um órgão de filtração dos líquidos internos, desempenhando uma função semelhante a dos protonefrídios de ultrafiltração e reabsorção.

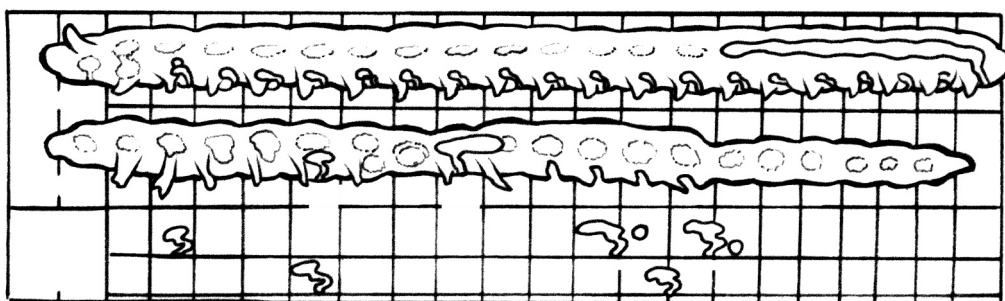


Figura 28.8: Diagrama mostrando os celomodutos excretórios e genitais de onicóforos, aracnídeos, crustáceos e insetos.

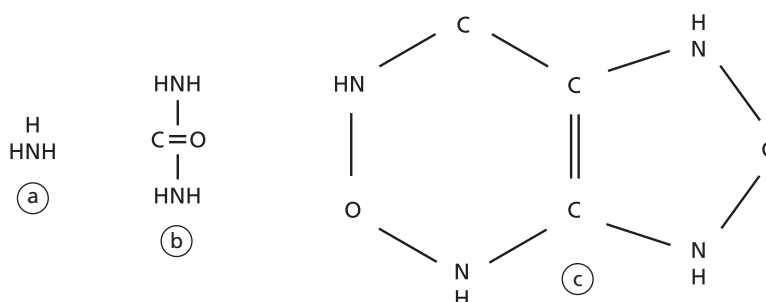
Brânquia

Em crustáceos e diversos vertebrados aquáticos, onde as paredes do corpo são impermeáveis ou pouco permeáveis à água, a brânquia é a única via de entrada e saída de íons ou excretas. Por serem estruturas muito delgadas, elas adquirem secundariamente a função de estruturas excretórias. Em crustáceos, enquanto os celomodutos (glândulas verdes ou antenais) funcionam na eliminação de excretas nitrogenados, as brânquias acumulam funções de excreção e regulação osmótica. O mesmo ocorre em condrictes e actinoptérígios, como veremos mais adiante nos mecanismos de regulação osmótica.

PRODUTOS DE EXCREÇÃO

A excreção envolve a eliminação de resíduos metabólicos, principalmente os resultantes da degradação de proteínas como o nitrogênio. Conforme o ambiente onde os animais vivem, o nitrogênio pode ser eliminado de diferentes formas.

Vamos apresentar aqui os três principais excretas nitrogenados e discutir as principais consequências de sua eliminação nos diferentes grupos animais, nos ambientes marinho, de água doce e aéreo. Os excretas nitrogenados mais comuns são **amônia**, **uréia** e **ácido úrico** (Figura 28.9). As aranhas excretam **guanina**, um composto muito semelhante ao **ácido úrico**, sendo provavelmente derivado deste.



	<i>Amônia</i>	<i>Uréia</i>	<i>Ácido Úrico</i>
C/N	0	0,5	1,2
Calor de combustão	378	638	1932
Toxicidade	***	**	*
Necessidade de água	***	**	*

Figura 28.9: Estrutura da molécula dos principais excretas nitrogenados e suas respectivas solubilidades em água, toxicidade e valor energético:
 a) amônia; b) uréia; c) ácido úrico.

Amônia

A amônia é o resíduo mais facilmente produzido após a degradação das proteínas. Como você pode observar na **Figura 28.9**, ela é composta basicamente de nitrogênio e hidrogênio, não desperdiçando átomos de carbono na sua eliminação. Entretanto, devido ao nitrogênio estar relativamente livre, ela é extremamente tóxica e solúvel em água. A excreção de amônia requer um grande volume de água e é o excreta mais comum na maioria dos animais aquáticos, visto que a água não é problema no ambiente onde vivem.

Alguns animais aéreos, como tatuzinhos-de-jardim, minhocas, lacraias e gongolos, ainda excretam amônia, sendo esse um dos motivos que os tornam muito dependentes de ambientes úmidos.

Uréia

Por ser uma molécula mais complexa, a uréia representa um custo maior na sua produção e desperdiça alguns átomos de carbono e alguma energia na sua eliminação (**Figura 28.9**). Sua solubilidade é menor do que a da amônia, assim como sua toxicidade. É um produto de excreção bem adaptado aos animais do meio aéreo, nos quais o acesso à água não chega a ser um grande problema, tais como anfíbios e muitos mamíferos, incluindo os seres humanos. Embora ocorra também em tubarões e raias marinhas, neles representa uma estratégia de regulação osmótica (como veremos no tópico mais adiante).

A excreção de uréia em mamíferos parece estar associada ao surgimento da placenta. A urina, menos tóxica e solúvel em água, pode passar do embrião para o organismo materno que a elimina através de seus rins.

Ácido úrico

Muito mais complexo do que os demais excretas nitrogenados, o ácido úrico é uma molécula de uma purina (como a guanina dos aracnídeos). Sua formação requer diversos átomos de carbono e oxigênio, o que significa um desperdício ainda maior de energia na sua eliminação. Entretanto, requer pouquíssima água na sua excreção, tendo ainda uma toxicidade muito baixa. É o produto de excreção dos gastrópodes terrestres, mas principalmente de animais que apresentam **OVOS CLEIDÓICOS** como insetos, aves e “répteis”. Por esta razão, você nunca viu um passarinho ou uma galinha fazendo “xixi”; o ácido úrico acaba saindo junto com as fezes (observe, nas fezes destes animais, uma porção mais esbranquiçada ou acinzentada, ela é o ácido úrico).

OVO CLEIDÓICO

Tipo de ovo que tem uma membrana permeável aos gases, mas impermeável à água, como no caso do ovo da galinha. Na verdade, o que chamamos ovo de galinha não é um ovo, mas um óvulo não fecundado. Bem, isto é outra história.



Imagine um pintinho dentro de seu ovo excretando uréia. Ele morreria afogado ou intoxicado pela própria urina.

A relação entre a excreção do ácido úrico e a presença de ovos cleidóicos sugere a seguinte origem evolutiva para o ácido úrico: sendo esse tipo de ovo impermeável aos líquidos, os embriões não poderiam sobreviver se excretassem uréia, que é mais tóxica e requer água, ou amônia, que requer ainda mais água e é bem mais tóxica que a uréia. Estes embriões desenvolveram a capacidade de produção de ácido úrico em grandes quantidades e a mantiveram até sua fase adulta. Isso permite a eles uma independência ainda maior da água, se comparados aos animais que excretam uréia, como se pode observar na grande variedade de ambientes explorados pelos insetos e no hábito de algumas serpentes e lagartos muito comuns em desertos.

Embora os animais possam ser denominados **amonotélicos**, **ureotélicos** ou **uricotélicos**, devemos lembrar que tal nomeação ocorre em função do produto de excreção predominante. Por exemplo, a urina humana é basicamente uréia, mas tem também pequenas quantidades de amônia e de ácido úrico.

REGULAÇÃO OSMÓTICA

Regulação osmótica é a capacidade que os animais possuem, em maior ou menor grau, de manter a concentração interna de solutos e um volume interno adequado. Obviamente, ela depende do meio onde os animais vivem. Por exemplo, as concentrações de íons dissolvidos na água salgada são muito similares às das células e tecidos dos animais, o que de certa forma, confirma a sua possível origem marinha.

Assim, considerando que tais animais estão em equilíbrio osmótico com o meio, isto é, as concentrações sendo iguais dentro e fora do seu corpo, não há pressão osmótica em nenhum dos sentidos. Neste caso, dizemos que o animal é isosmótico em relação ao meio.

O fato de um animal ser isosmótico (Figura 28.10), não significa que não exista troca de íons; isto é, mesmo apresentando as mesmas concentrações internas e externas, alguns íons são mais concentrados de um lado ou de outro, o que requer um fluxo constante. Entretanto, do ponto de vista osmótico, eles estão no que chamamos um equilíbrio dinâmico, onde a taxa de entrada e de saída de íons se compensam.

Quando o animal está em ambientes mais diluídos, como mangues e estuários (ambientes de água salobra), e principalmente quando vive em água doce, diz-se que o animal é **hiperosmótico** em relação ao meio. Nesses ambientes, há uma pressão para a entrada de água para dentro do corpo do animal, onde a concentração de íons dissolvidos é maior.

Quando o animal vive em um ambiente muito salgado, como por exemplo na Lagoa de Araruama (RJ), diz-se que o animal é **hiposmótico** em relação ao meio. Nesse caso, há uma tendência de perda de água dos fluidos internos do corpo, pois a concentração interna de íons dissolvidos é menor (Figura 28.10).

Controle da concentração osmótica

Se não houver qualquer mecanismo de controle nos animais hipo e hiperosmóticos, eles podem morrer quando condições adversas se mantiverem por um tempo prolongado. Para alguns animais, como os que vivem em regiões entre mares, tais condições são periódicas e de curta duração. Por exemplo, na maré alta, eles ficam submersos e as condições são, então, isosmóticas. Na maré baixa, eles ficam fora d'água e, se houver muita evaporação, a pequena quantidade de água retida por eles se torna mais salgada. Por outro lado, ainda na maré baixa, se o animal viver próximo à foz dos rios ou se chover no período, a água fica menos salgada (meio mais diluído) devido ao grande aporte de água doce. Em geral, esses animais suportam tal condição periódica e são denominados **osmoconformadores**. Nos casos em que a condição é permanente, como nas porções mais internas dos estuários, na água doce ou nas lagunas hipersalinas, o animal requer algum mecanismo de controle, e são, então, denominados **osmorreguladores**.

De maneira geral, todo animal tem alguma capacidade de controle, nem que seja apenas em condições extremas. Por isso, existe um contínuo entre a situação de conformação total e a de regulação total. Você pode visualizar isso na **Figura 28.10**, onde mostramos as concentrações osmóticas internas dos líquidos corpóreos (ordenadas) quando o animal em questão é submetido a concentrações diferentes do meio (a concentração média da água do mar encontra-se apontada por uma seta).

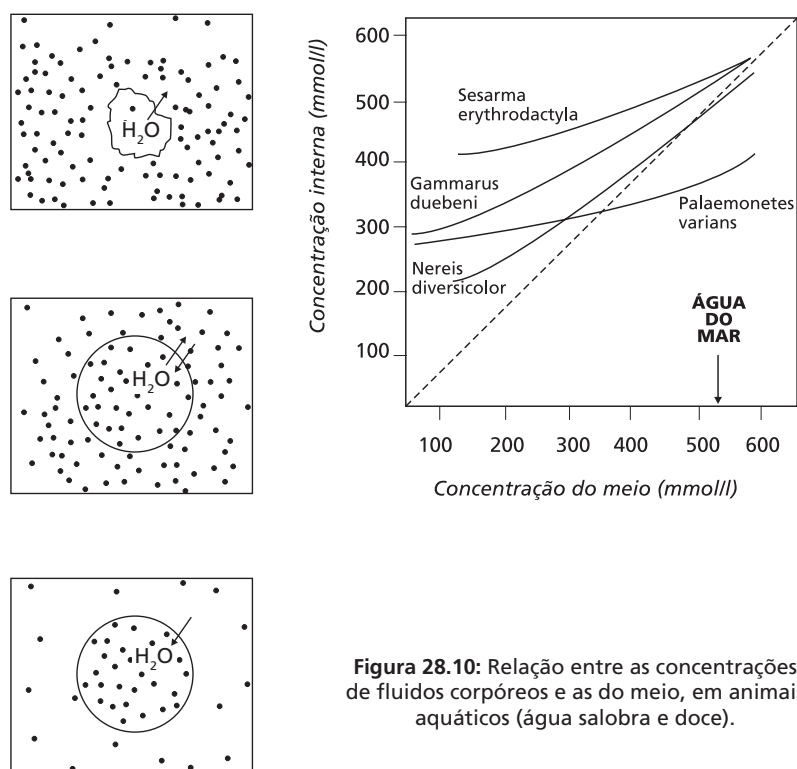


Figura 28.10: Relação entre as concentrações de fluidos corpóreos e as do meio, em animais aquáticos (água salobra e doce).

Observando a figura, podemos fazer algumas considerações:

- Alguns animais, como o poliqueta *Nereis diversicolor*, se aproximam muito do hábito osmoconformador, com sua concentração interna praticamente acompanhando a do meio, exceto nos níveis extremamente baixos de diluição.

- O crustáceo marinho *Gammarus obtusus* apresenta uma forte capacidade reguladora, mudando pouco a concentração interna de seus fluidos, apesar da grande variação.

- Todas as espécies de água doce regulam em algum nível. Entretanto, repare que seus níveis máximos estão quase sempre abaixo da concentração da água do mar, indicando que a longa história evolutiva destes grupos neste ambiente, tornou os fluidos de tais animais mais diluídos do que os de seus ancestrais marinhos.

- *Palaemonetes varians*, um lagostim marinho, é um excelente osmorregulador. Observe que ele se apresenta hiposmótico em relação à água do mar, tendo de se regular constantemente, ao contrário da maioria das formas marinhas. Este fato sugere, como já constatado por estudos filogenéticos, que os *Palaemonetes* descendem de ancestrais de água doce, sendo um típico caso de reinvasão do ambiente marinho.

Mecanismos de regulação osmótica

Se não houver qualquer mecanismo de regulação, os animais hipo e hiperosmóticos estarão sujeitos ao inchamento ou encolhimento, devido ao ganho ou perda de água. Neles existem estratégias de regulação que conseguem manter uma concentração osmótica adequada. Estas, por sua vez, requerem um gasto de energia considerável, pois envolvem mecanismos como a reabsorção ativa mesmo contra um gradiente de difusão.

As principais estratégias encontradas nos metazoários são melhor estudadas em animais de água salobra ou doce, que são hiperosmóticos em relação ao meio. São elas: a impermeabilização da superfície corpórea; a reabsorção ativa; o incremento no número e no comprimento dos tubos nefridiais ou dos celomodutos; o esqueleto hidrostático e a reabsorção ativa.

Impermeabilização

Como boa parte da absorção de água se dá pela superfície corpórea, muitos metazoários aquáticos apresentam uma superfície impermeabilizada que impede a entrada de água doce ou salobra quando eles são hiperosmóticos. Esta estratégia é comum em crustáceos, em actinopterígios e em condrictes. Em crustáceos, pode-se notar as diferentes permeabilidades de seus exoesqueletos em função do ambiente em que vivem, conforme observado na **Figura 28.11**.

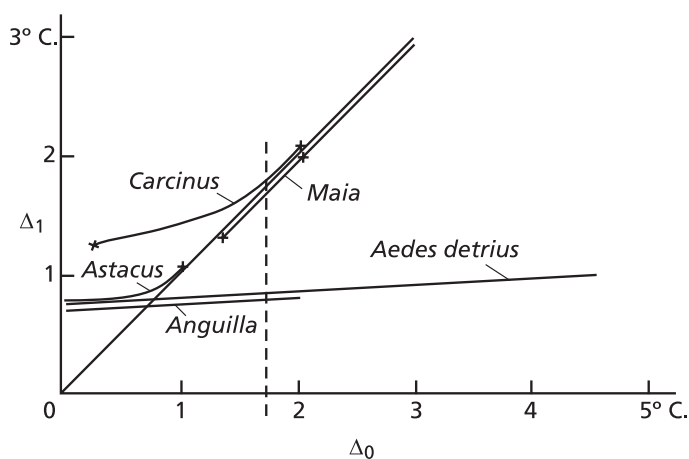


Figura 28.11: Permeabilidade de diferentes crustáceos decápodes e hábito de vida de cada espécie.

A impermeabilização pode ocorrer também em metazoários desprovidos de exoesqueletos, os quais tendem a acumular íons de potássio na parede do corpo, um processo de reabsorção ativa que diminui a permeabilidade da parede.

Alongamento e incremento no número de nefrídios ou celomodutos

Esta é a adaptação mais comum entre metazoários. Uma simples comparação das formas estritamente marinhas com as formas de água doce mostra que as últimas têm um número muito grande de nefrídios e que eles apresentam seus túbulos alongados formando uma série de alças que tendem a aumentar a superfície de reabsorção de íons antes da eliminação da urina (Figura 28.12). Assim, estes animais produzem, em geral, uma urina hipotônica em relação aos líquidos internos do animal, evitando a perda excessiva de íons.

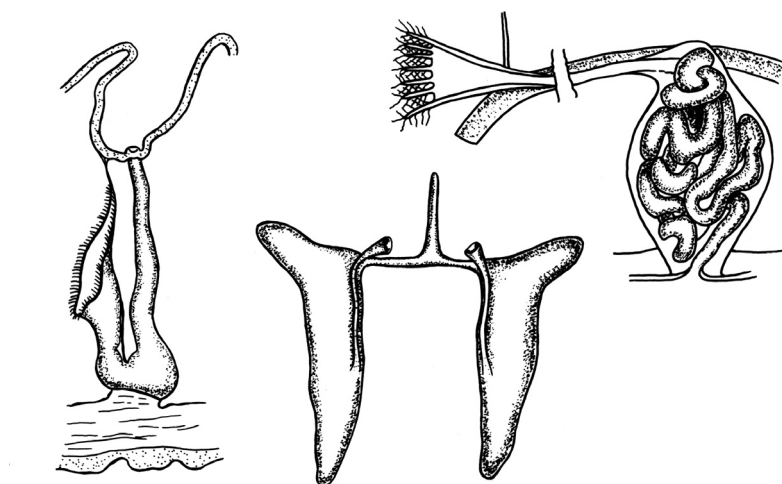
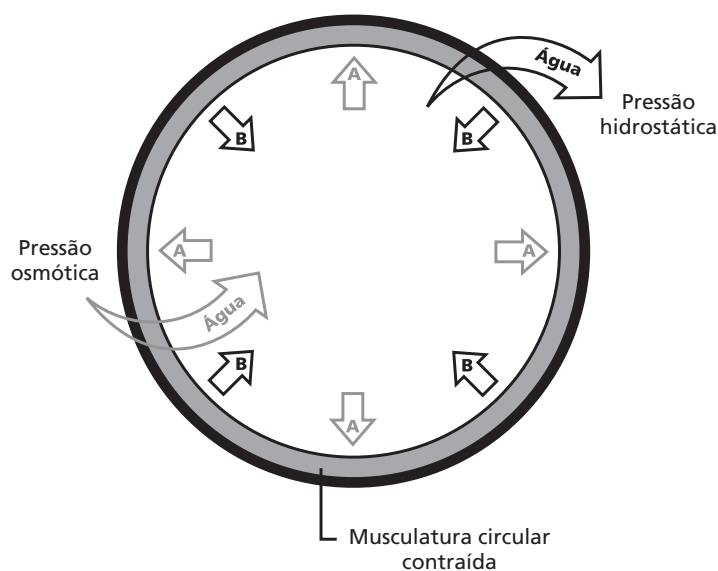


Figura 28.12: Nefrídios e celomodutos alongados.

Esqueletos hidrostáticos

As formas cuja permeabilidade da parede do corpo ainda é um problema, como alguns anelídeos ou pseudocelomados, mantêm o esqueleto hidrostático com sua musculatura em constante contração. Com isso, os líquidos das cavidades internas ficam sob uma pressão maior que o meio externo. Assim, a entrada de água de fora para dentro do corpo, por pressão osmótica, tem de enfrentar uma pressão hidrostática contrária, conforme pode ser observado na **Figura 28.13**.



- A- Força exercida pela pressão osmótica.
B- Força exercida pela pressão hidrostática.

Figura 28.13: Pressões hidrostática e osmótica agindo em metazoário de água doce ou salobra.

Reabsorção ativa

A reabsorção ativa se dá ao longo dos nefrídios, celomodutos ou brânquias. Ela ocorre nos metanefrídios e celomodutos de todas as formas de água doce, ou nas brânquias, como nos crustáceos.

Entre os vertebrados, um bom exemplo pode ser observado quando se compara um actinoptérigio marinho e um de água doce (**Figura 28.14**). O marinho é hiposmótico em relação ao meio, isto é, o mar tem muito mais íons dissolvidos do que seu corpo, o qual tende a perder água por difusão.

Assim, ele engole água do mar em grandes quantidades e, como esta é salgada, ele tem de eliminar o excesso de íons. A eliminação é efetuada pelas brânquias de forma ativa, isto é, com gasto energético, já que o seu rim não produz urina hipertônica. (Figura 28.14.a).

O actinoptérigio dulciaquícola é hiperosmótico e, como os demais metazoários, tende a ganhar água. Neles, as brânquias excretam amônia, mas reabsorvem íons ativamente, assim como os rins, que produzem uma quantidade muito grande de urina (no caso amônia), bastante diluída em relação ao corpo (Figura 28.14.b).

Os condrites são diferentes. Eles excretam uréia e suas brânquias, embora impermeáveis a ela, reabsorvem ativamente íons. Como sua concentração de íons é menor do que a da água do mar, eles armazenam grande quantidade de uréia em seus rins para manter uma pressão osmótica similar à do meio marinho, produzindo pouca urina. Eles conseguem manter níveis de uréia 100 vezes maior que os mamíferos, quantidade esta que não poderia ser suportada por outros vertebrados (Figura 28.14.c).



Este acúmulo de uréia em cações e raias é o responsável pelo forte cheiro de urina que se sente quando eles são mantidos fora de água em mercados de peixes. Procure observar a diferença de cheiro entre eles e os actinoptérigios da próxima vez que for a um mercado.

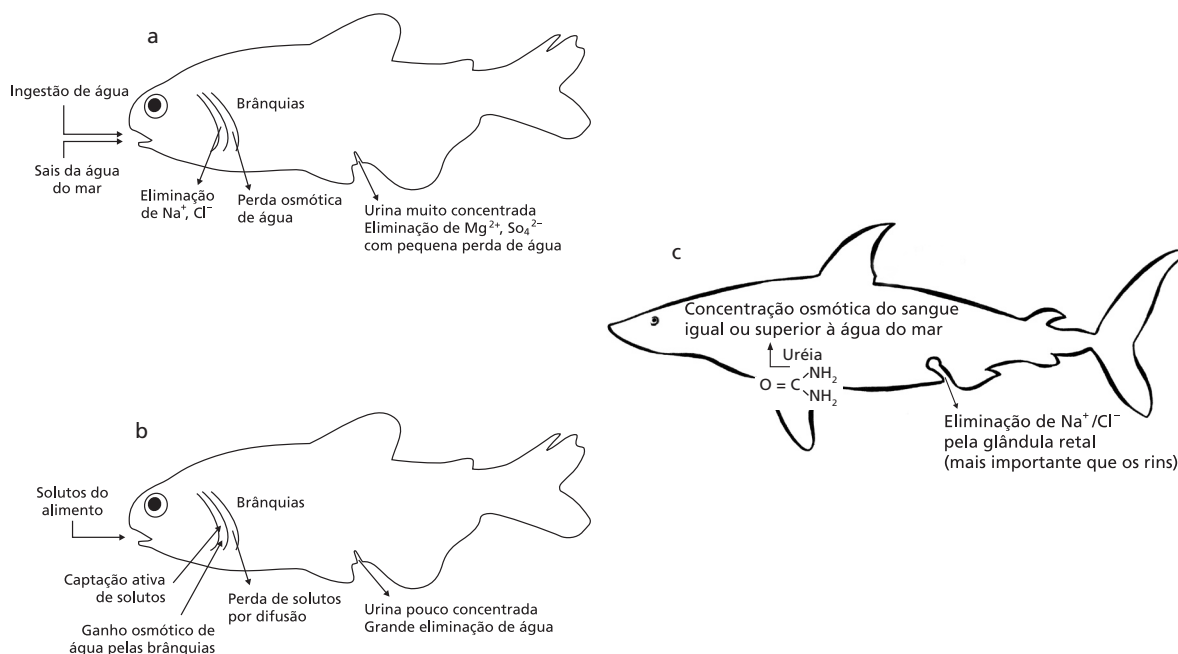


Figura 28.14: Excreção e regulação osmótica em: a) actinoptérigios marinhos; b) de água doce e c) condrites.

RESUMO

O processo de excreção envolve a eliminação de resíduos metabólicos. Geralmente, os denominados sistemas excretórios são responsáveis pela eliminação de resíduos nitrogenados, que são tóxicos, pelo controle da concentração interna de solutos e pela manutenção de volume corpóreo. Estas duas últimas funções também são denominadas regulação osmótica. As estruturas excretórias podem ser de dois tipos: as primárias, que têm função original de excreção e osmorregulação, como **protonefrídios**, **metanefrídios** e **túbulos de Malpighi**; as secundárias, que têm uma função original diferente como, por exemplo, trocas gasosas ou reprodução, adquirindo depois a função excretora ou osmorregulatória, como é o caso dos **celomodutos** e **brânquias**. Os produtos da excreção (excretas nitrogenados) mais comuns nos animais são: **amônia** (tóxica e altamente solúvel) principalmente em animais aquáticos; **uréia** (menos tóxica e menos solúvel) que requer um custo energético extra para ser produzida, sendo comum em vertebrados terrestres, como mamíferos, anfíbios, e em condrictes marinhos; **ácido úrico** (baixíssima toxicidade) é excretado praticamente na forma sólida, sendo comum em gastrópodes terrestres e em animais com **ovos cleidóicos** como insetos, aves e “répteis”.

A manutenção de um equilíbrio osmótico interno e, conseqüentemente, de um volume adequado do corpo dependem muito do meio em que os animais vivem. Em geral, metazoários marinhos estão em equilíbrio com o meio. Entretanto, os vertebrados apresentam líquidos corpóreos mais diluídos devendo reabsorver água e excretar sais através de suas brânquias ou rins. Todos os metazoários de água salobra ou água doce são hiperosmóticos em relação ao meio, tendo de eliminar água e reabsorver sais. Em vertebrados aquáticos, como actinoptérígios, isto se dá pela excreção de água através de uma urina muito diluída e da reabsorção ativa de sais pelas brânquias.

EXERCÍCIO AVALIATIVO

Você lembra as duas questões que fizemos durante a aula?

1. Um animal celomado de grande volume corpóreo com protonefrídio?
Isso seria viável?
2. Um animal acelomado com metanefrídio? Isso também seria viável?
Agora é o momento de desenvolvê-las.

INFORMAÇÃO SOBRE A PRÓXIMA AULA

Na próxima aula veremos a evolução do sistema de transmissão de informações entre partes do corpo dos metazoários, também denominado sistema nervoso.

objetivo

Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

- Conhecer a evolução do sistema de informação entre as partes do corpo de um animal denominado sistema nervoso.
- Relacionar o grau de complexidade do sistema nervoso com o hábito de vida dos diferentes animais.

Pré-requisitos

Aula 16 – Arquitetura animal. Parte II.

INTRODUÇÃO

O funcionamento do corpo de um animal depende, de alguma forma, de um sistema de comunicação entre as suas células e tecidos. A comunicação pode se dar pela própria deformação das células ou pode ocorrer através de células especiais cuja função é apenas a transmissão de informação. O grau de complexidade destas células acarreta uma maior velocidade na transmissão de informações e está diretamente relacionado ao hábito de vida do animal. Um animal sésil, por exemplo, lida com um número de informações muito menor do que um animal predador e com grande capacidade de locomoção. Este tem à sua disposição um ambiente que varia muito rapidamente, além de necessitar de uma coordenação melhor das diferentes partes do corpo.

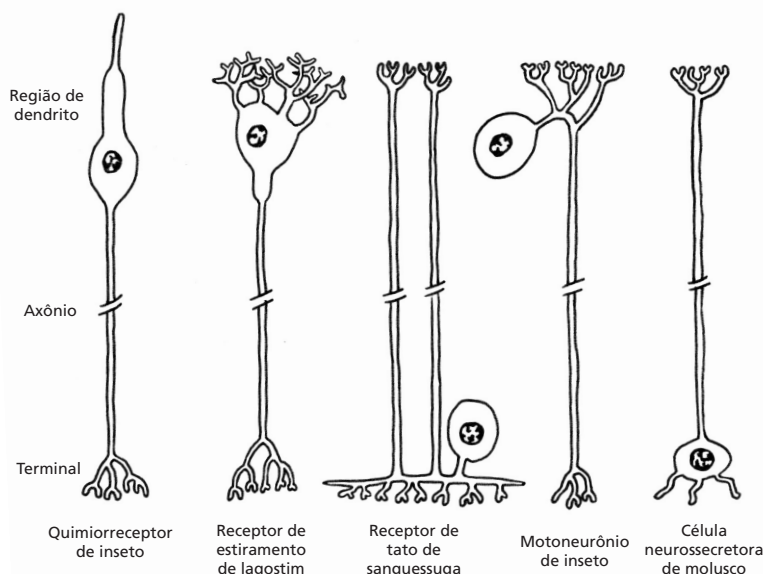
Não é por acaso que o sistema nervoso origina-se do ectoderma; afinal é este folheto embrionário que mantém contato com o meio externo. Portanto, nada mais natural do que as células superficiais ou epiteliais serem as primeiras a receber informações acerca do meio. Com o surgimento de células especiais para a função de recepção e transmissão de informações, os sistemas nervosos foram internalizados, ou seja, migraram para dentro do corpo onde puderam atingir um grau de complexidade maior.

O sistema nervoso pode ser definido como uma série de células especializadas capazes de conduzir a informação de forma rápida através de sua excitação. A informação pode ser recebida do meio ou enviada para outros tecidos, como músculos, para que eles possam dar respostas aos estímulos do meio. As células modificadas para receber informação do meio, serão estudadas na próxima aula, que abordará o **sistema sensorial**. Entretanto, deve ficar claro que o sistema sensorial é apenas uma parte de um sistema maior de informações que é o sistema nervoso.

Antes de iniciarmos uma rápida análise dos diferentes tipos de sistema nervoso, vamos recapitular de forma sintética como são estas células especializadas que transmitem informações e que são denominadas neurônios.

A CÉLULA NERVOSA

Nos animais que apresentam um sistema nervoso verdadeiro, a informação é transmitida por impulsos elétricos. A célula nervosa ou **neurônio** (Figura 29.1) apresenta uma polarização, com cargas negativas do lado externo e positivas do lado interno. Com a excitação, ocorre uma inversão destas cargas fazendo com que um sinal seja transmitido de forma extremamente rápida ao longo da célula.



! Como o sinal transmitido é em função de uma inversão de cargas, a energia transmitida em um neurônio é elétrica. As principais vantagens de uma transmissão elétrica estão na sua rapidez. Isto pode ser observado quando você liga uma lâmpada. O sinal elétrico que sai quando você aperta o interruptor, chega tão rápido à lâmpada que você tem a impressão de que é imediato.

Figura 29.1: Diferentes tipos de neurônios.

O neurônio, por sua vez, vai transmitir seu sinal para um outro neurônio ou para um tecido. A transmissão ocorre através de uma região denominada **sinapse**, onde o sinal elétrico vai levar a uma descarga de substâncias, denominadas **neurotransmissores**, que excitarão a membrana da próxima célula, iniciando novamente um sinal elétrico (Figura 29.2).

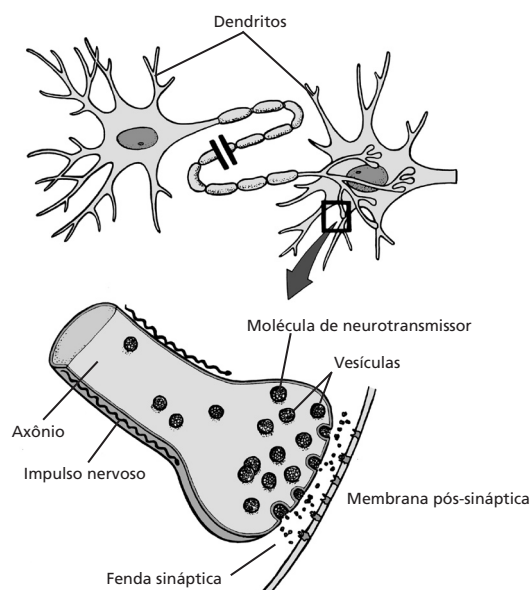


Figura 29.2: Transmissão elétrica em um neurônio e descarga de neurotransmissores em uma sinapse.

O tamanho, o diâmetro e o grau de desenvolvimento ou mesmo de isolamento elétrico dos neurônios variam de animal para animal, levando a menor ou maior eficiência (velocidade) de transmissão de sinais. Em muitos casos, as células nervosas estão agrupadas formando grandes feixes com velocidades muito grandes. No entanto, nem sempre a transmissão de informações se dá por células nervosas especializadas. É esta diversidade de complexidade de sistemas nervosos que veremos agora.

TRANSMISSÃO SEM NEURÔNIOS

A transmissão sem neurônios é efetuada por células comuns e, por não haver uma especialização, ela geralmente é dispersa e muito lenta em comparação com aquela efetuada por neurônios.

Sistema neuróide

A forma mais simples de condução de informação é através da comunicação célula a célula, como parece ser o caso dos poríferos (esponjas). Elas apresentam comportamentos que exigem alguma forma de comunicação entre as células, como a contração do **ÓSCULO** para expulsão de gametas e a inversão do sentido do batimento dos flagelos para desentupimento dos canais das esponjas. A informação é transmitida de uma célula para outra através da deformação das células. Entretanto, em raras esponjas foi constatada a transmissão de sinais elétricos através do corpo, mesmo não tendo elas apresentado células especializadas para tal função. Nos sistemas neuróides, a transmissão é ainda muito lenta, sendo da ordem de 0,2 cm/s.

ÓSCULO

Abertura principal de uma esponja, por onde sai a água que entra através dos múltiplos poros localizados na superfície do animal.

Condução epitelial

A condução epitelial ocorre muitas vezes associada a outras formas de transmissão nervosa. É o caso das medusas (cnidários), cuja sua porção superior (umbrela) funciona como uma antena parabólica invertida, com uma superfície de contato com o meio ambiente muito grande. As sensações recebidas pela superfície são transmitidas por toda a umbrela e depois são transmitidas para neurônios internos. A condução epitelial se dá pela transmissão de sinais elétricos e ocorre também em grupos muito derivados, como os **UROCORDADOS** planctônicos. A velocidade nesse tipo de transmissão é bem maior do que no sistema neuróide, podendo atingir velocidades de 3 a 35 cm/s.

UROCORDADOS

Ver Aula 20.

TRANSMISSÃO COM NEURÔNIO

A transmissão com neurônios é muito mais eficiente e rápida do que a transmissão por células não especializadas, já que eles têm uma única função. Esse tipo de transmissão se dá através de redes nervosas ou sistemas polarizados.

Rede nervosa

As redes nervosas consistem em uma série de neurônios que formam um emaranhado semelhante a uma rede de pesca. Estes neurônios fazem, portanto, múltiplas comunicações e os sinais são transmitidos em vários sentidos, isto é, não existe uma única **POLARIDADE** ou um único sentido de transmissão de sinais elétricos.

Este tipo de transmissão, embora já apresentando células especializadas, ainda ocupa uma posição superficial no corpo. Ele tem a vantagem de cobrir todo o corpo do animal através de um grande emaranhado de células interligadas. Isso faz com que o sinal possa ser transmitido de forma alternativa se houver uma interrupção de alguma via neural.

POLARIDADE

Utiliza-se o termo polaridade quando existe um sentido em um sinal elétrico, como acontece com uma pilha comum, onde o sinal elétrico é transmitido entre os pólos negativo e positivo da pilha em um único sentido (por isso você deve colocar a pilha na direção correta). Os neurônios que apresentam esta polaridade, como a pilha, são chamados unipolares. Quando o sinal é transmitido em mais de um sentido, como no caso da rede neural, ele é denominado multipolar.

Podemos comparar a evolução dos sistemas nervosos com aquela de rede de estradas e rodovias. Neste caso, os neurônios multipolares seriam como uma série de estradas de terra que cobrem uma região extremamente ampla e cuja velocidade de transmissão é pequena. Entretanto, se uma delas for interrompida, os carros podem usar facilmente um caminho alternativo.

As redes nervosas são comuns em cnidários, como as anêmonas-do-mar (**Figura 29.3.a**) ou podem ocorrer ainda associadas aos sistemas nervosos mais complexos. Por exemplo, os moluscos apresentam uma rede nervosa em seu pé muscular; diversos metazoários apresentam uma rede nervosa associada ao sistema digestivo (**Figura 29.3.b**), cuja função é apenas controlar seus movimentos relativamente simples. Essas redes podem atingir velocidades que variam de 1 a 100 cm/s.

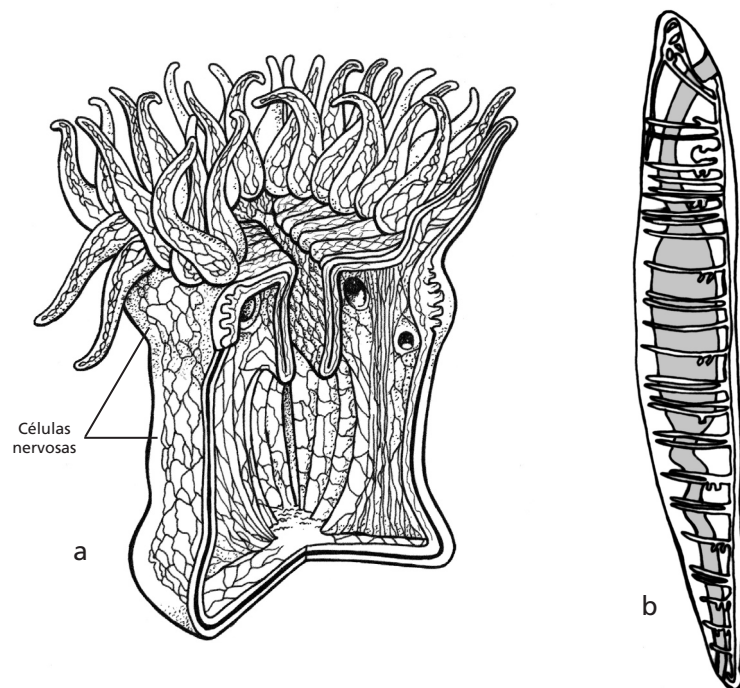


Figura 29.3: Redes nervosas: (a) anêmona-do-mar; (b) sistema digestivo de anelídeo.

Sistemas polarizados

Nos sistemas polarizados, os sinais são transmitidos de forma mais direcionada. Neles, os neurônios se agrupam em cordões nervosos que correm no sentido do corpo. A evolução destes sistemas está associada ao surgimento da bilateralidade e da capacidade de locomoção. Animais bilaterais que se locomovem lidam com uma grande quantidade de informações que recebem do meio e precisam dar respostas rápidas e ordenadas.

Numa comparação com a rede viária, tal sistema assemelha-se a grandes vias ou estradas asfaltadas no meio da malha de pequenas estradas de terra. Estas estradas podem ter sentido único ou duplo (mão única ou mão dupla), o que permite uma velocidade maior. O mesmo ocorre nos neurônios, os cordões (“estradas”) permitem uma transmissão mais rápida dos sinais no sentido principal do corpo, ou seja, ao longo do corpo.

Com o surgimento de cordões polarizados houve uma tendência à presença de poucos cordões nervosos, deixando a transmissão local para nervos periféricos, semelhante ao que acontece na nossa “malha viária” onde, a partir de uma estrada principal, pode-se tomar uma via secundária.

Os cordões principais se tornam progressivamente mais espessos e, portanto, mais rápidos (como uma estrada com 3 ou 4 faixas), ao longo da história evolutiva dos animais. Eles ocupam ainda uma porção mais interna do corpo, pois sua importância agora é maior (imagine que a interrupção de uma via expressa tem consequência muito maior do que a de uma via secundária). Portanto, a internalização do sistema nervoso permite maior proteção.

Os cordões mais espessos são também reduzidos em número, restando apenas aqueles que correm no sentido principal do corpo. A redução no número de cordões fez com que se mantivessem apenas os cordões mais ventrais ou os mais dorsais. Isso é uma característica marcante na história evolutiva dos animais, como vimos na grande divisão dos animais em protostômios e deuterostômios.

Sistemas nervosos ventrais

Os sistemas nervosos ventrais parecem ter derivado do sistema nervoso em cesto, típico de alguns platelmintos, como será visto a seguir. Este grupo de acelomados apresenta desde o sistema em cesto simples até um sistema em que os cordões nervosos se restringem à região ventral, como nas planárias terrestres.

Em cesto

A forma mais simples de sistemas em cordões polarizados ocorre em alguns platelmintos mais simples, nos quais o sistema nervoso é chamado **em cesto**, devido à semelhança com um cesto de vime. Neles, os cordões correm ao longo do corpo e formam anéis ao seu redor, sendo todos interligados (Figura 29.4).

Neste sistema mais complexo já surge um centro de integração, denominado **GÂNGLIO**, que é responsável por receber aos estímulos sensoriais, selecionar as respostas adequadas e responder aos estímulos através da via motora. Por ser o principal gânglio do animal, este centro é denominado **gânglio cerebral**.

GÂNGLIO

Massa de tecido nervoso, geralmente envolvida por tecido conjuntivo, que contém muitas células nervosas (neurônios) e sinapses.

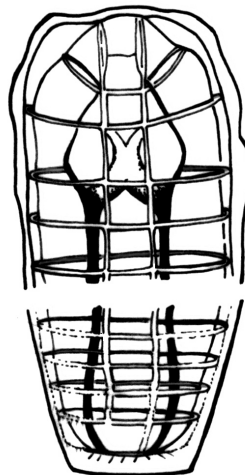


Figura 29.4: Sistema nervoso em “cesto” de platelminto.

Em cordões

O passo seguinte, na evolução dos sistemas nervosos, foi uma redução ainda maior no número de cordões associada ao seu maior desenvolvimento. Neste sentido, os vários cordões nervosos do tipo cesto são reduzidos a apenas quatro ou dois cordões ventrais. Este processo já aparece nos platelmintos mais derivados, como os turbelários (planária). Neles, forma-se um sistema nervoso com os cordões sendo ligados entre si, como os degraus de uma escada (Figura 29.5).

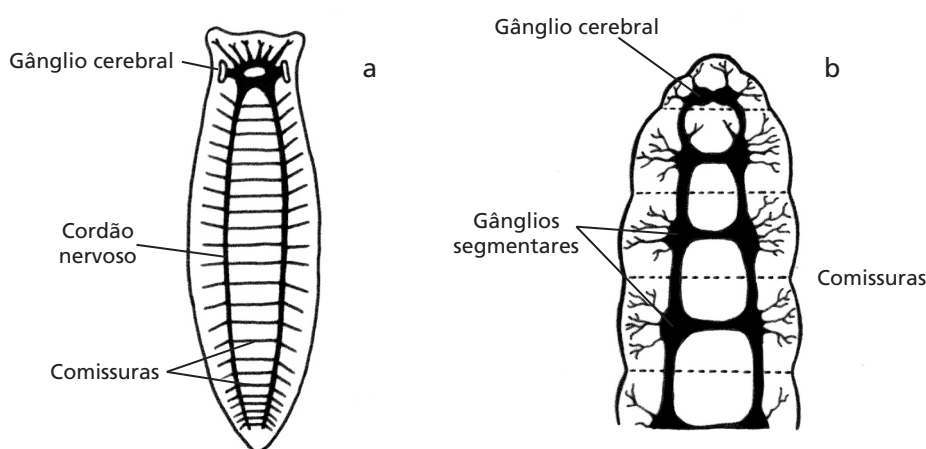
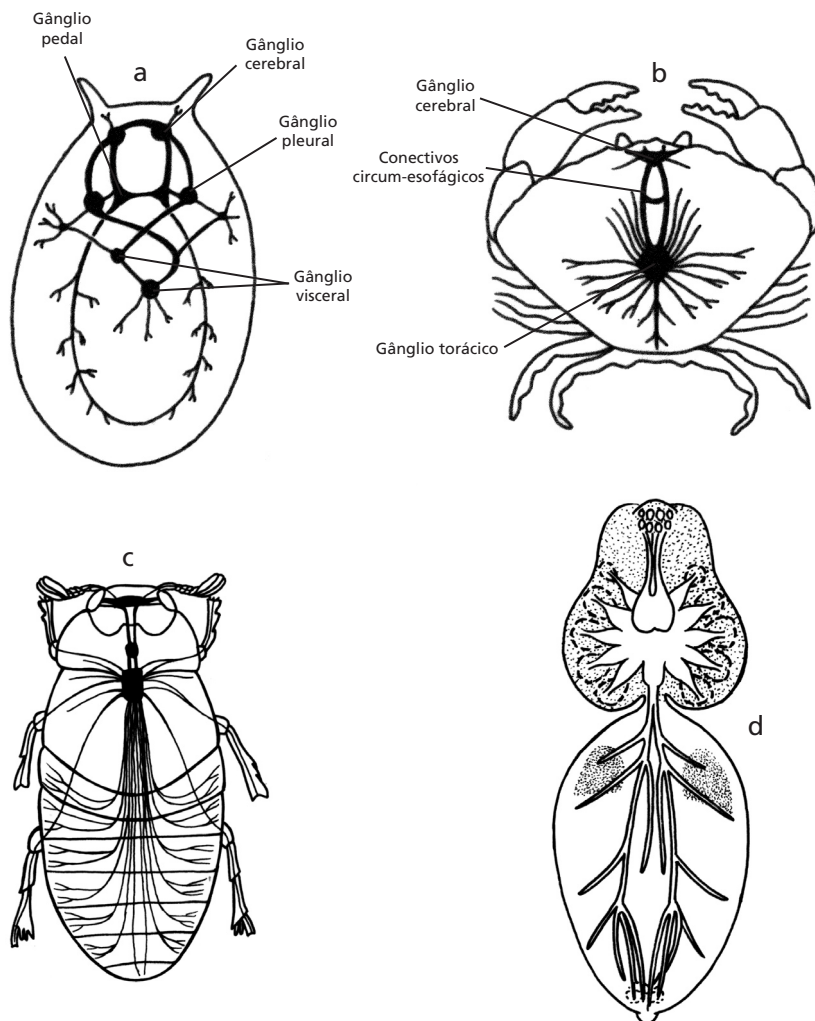


Figura 29.5: Sistema nervoso em escada de (a) platelminto turbelário e (b) anelídeo.

O sistema nervoso em escada é o mais comum nos protostomados segmentados, como os anelídeos e os artrópodes. Devido ao fato de eles serem metaméricos, nas conexões entre os cordões transversais (“degraus”) e os cordões principais formam-se gânglios locais. Eles, geralmente, ocorrem em um par por segmento, sendo denominados gânglios segmentares.

Uma tendência nos protostomados foi a fusão dos gânglios segmentares da região posterior do corpo. Por exemplo, em alguns grupos, os cordões nervosos ventrais se fusionam e formam um único cordão aparente. Como se pode observar em um corte histológico, sua origem é comprovadamente dupla. Esta tendência ocorreu nas minhocas, dentro dos anelídeos, e em alguns artrópodes, como por exemplo, nas espinhas e baratas.

Com a redução da segmentação e a fusão de segmentos formando regiões especializadas (tagmatização), houve uma redução no número de gânglios. Por sua vez, os gânglios de diferentes segmentos podem migrar e se fundir, restando apenas alguns gânglios periféricos locais, como acontece em moluscos e artrópodes (**Figura 29.6.a**). No caso dos moluscos, um bom exemplo é o dos gastrópodes com seus gânglios pleurais e viscerais. Nos artrópodes, por exemplo, os caranguejos apresentam fusão dos seus gânglios torácicos, devido a sua forma do corpo (**Figura 29.6.b**). Nos besouros (insetos), os gânglios abdominais migram e se fundem aos torácicos (**Figura 29.6.c**). As aranhas apresentam uma grande massa ganglionar anterior em volta do tubo digestivo (**Figura 29.6.d**).



Você já deve ter visto as consequências da interrupção de uma via principal de uma cidade ou de uma estrada importante de grande fluxo. Isto pode levar a congestionamentos imensos e, muitas vezes, a quase paralisação das atividades de uma cidade ou região.

Figura 29.6: Sistema nervoso; (a) gastrópode; (b) caranguejo; (c) besouro; (d) aranha.

A presença de vias rápidas (os cordões) e de um sistema ganglionar local, além de um centro integrador (o gânglio cerebral), nos permite dividir estes sistemas nervosos mais complexos em dois grupos:

- a) o sistema nervoso central, descrito anteriormente;
- b) o sistema nervoso periférico, constituído pelos nervos que innervam todos os tecidos e os receptores sensoriais.

Voltando à nossa analogia com o sistema viário, as vias expressas tornam-se cada vez mais largas e rápidas, mas mantêm estradas vicinais ou secundárias mais lentas e menos complexas para atingir todas as regiões. Ainda considerando nossa analogia, devemos lembrar que quanto mais rápida e importante é uma via, piores são as conseqüências de sua interrupção.

Nesse sentido, paralelamente ao aumento da importância do sistema nervoso central, que pode atingir velocidades de até 4 m/s, houve uma maior tendência à sua internalização, mantendo-o mais protegido de pequenos acidentes, mordidas etc. Os gânglios periféricos também adquirem uma importância maior, sendo responsáveis pelo controle local, ou seja, pela tomada de decisões que não necessitam ser enviadas para o cérebro. Eles funcionam como pequenos cérebros locais.

Agora, vamos fazer uma analogia com o seu pólo. Quando surgir alguma dúvida sobre o conteúdo, você irá procurar o tutor presencial. Ele tentará esclarecer sua dúvida aí mesmo no pólo. Se sua dúvida não for solucionada, vocês poderão solicitar a ajuda do tutor a distância. Se, ainda assim, sua dúvida não for resolvida, o professor da disciplina poderá esclarecê-la. Portanto, pequenas dúvidas não são necessariamente enviadas ao professor, podem ser resolvidas localmente. Da mesma forma, nesse sistema, pequenas decisões podem ocorrer em nível local, não sendo necessariamente enviadas ao gânglio cerebral.

Com o aumento da capacidade de locomoção e do surgimento de comportamentos mais complexos, houve um grande aumento na massa de neurônios e nas sinapses no gânglio cerebral. Quanto maior o gânglio cerebral, mais complexo é o comportamento do animal. Essa tendência levou à divisão do gânglio cerebral em partes diferentes com funções diferentes.

Por exemplo, o cérebro dos insetos é dividido em três partes, que inervam estruturas diferentes. No caso deles, a função motora é realizada pelos gânglios ventrais do tórax (Figura 29.7). Por isso, quando você tira a cabeça de uma barata, ela continua andando.

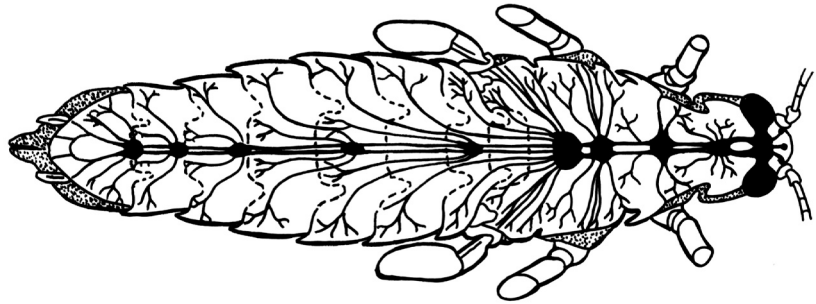


Figura 29.7: Sistema nervoso de um gafanhoto.

Células nervosas gigantes

A transmissão de sinais através de neurônios, embora rápida, sofre uma redução na sua velocidade quando encontra sinapses. A comunicação entre um neurônio e outro é química sendo, portanto, mais lenta. Assim, uma via nervosa muito longa sofre uma série de “atrasos” em cada sinapse que passa. Este atraso, denominado retardo sináptico, é fundamental, pois são nas sinapses que o sinal pode ser desviado para o sistema nervoso periférico e atingir a estrutura necessária, como um músculo, por exemplo.

Em alguns grupos de metazoários, paralelamente ao sistema nervoso central, surgiram fibras nervosas gigantes denominadas **neurônios ou axônios gigantes**. Eles têm uma espessura muito maior do que a dos nervos que compõem os cordões nervosos, além de não apresentarem sinapses. Estas vias extremamente rápidas (10 a 35 m/s) transmitem sinais elétricos sem qualquer retardo sináptico, podendo atingir velocidades de até alguns metros por segundo.

Elas surgiram de forma independente em diversos grupos como uma via para comportamentos emergenciais, como por exemplo, fuga rápida de um predador. Elas são, portanto, homoplásticas. São estas fibras rápidas que conduzem impulsos nervosos, permitindo que uma lula dê saltos rápidos quando perturbada e que a lagosta faça um movimento brusco com a cauda, arremessando o corpo para longe (**Figura 29.8**). O mesmo comportamento pode se visto na minhoca-louca, ou puladeira, que, quando perturbada, contrai vigorosamente todo o corpo, praticamente pulando de forma descoordenada. Este sistema se mantém em paralelo e independente ao sistema nervoso central normal, sendo utilizado apenas nestas condições emergenciais.

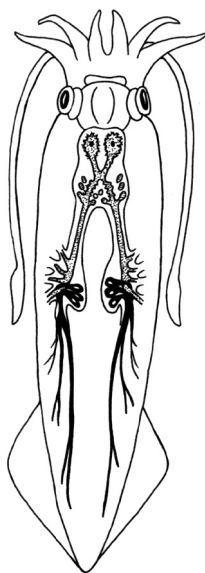


Figura 29.8: Axônio gigante: lula.

Sistemas nervosos dorsais

Como visto, nos deuterostômios também houve uma tendência à redução no número de cordões associada a um maior desenvolvimento destes, conforme seus comportamentos e capacidade de locomoção se tornam mais complexos.

A grande diferença está no fato de os cordões que se mantiveram dorsais e não ventrais, mas a evolução foi semelhante a dos protostômios, com uma internalização e um aumento na espessura dos cordões restantes.

Descentralizados

Como muitos deuterostomados mantiveram um hábito de vida mais simples com forma sésseis ou com capacidade locomotória restrita, como a maioria dos protocordados e urocordados, o sistema nervoso ainda é muito simples, composto de um gânglio cerebral pequeno e de um cordão nervoso ventral não muito desenvolvidos.

Em equinodermos, com sua simetria radial, o sistema nervoso também é pouco centralizado. O centro integrador não é tão desenvolvido, sendo representado pelo anel nervoso dorsal, que inerva as partes radiais do corpo, como no caso da estrela-do-mar.

A pouca integração e a descentralização do sistema nervoso em equinodermos é representada ainda pela presença de dois sistemas nervosos, um denominado **ectoneural** e o outro **hiponeural**. Curiosamente, estes dois sistemas não apresentam qualquer comunicação via neurônios entre si (**Figura 29.9**). Provavelmente, a comunicação entre eles é meramente química.

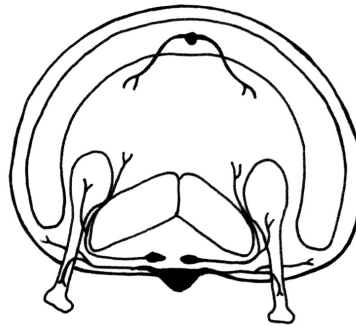


Figura 29.9: Sistemas ectoneural e hiponeural em um corte sagital do braço de uma estrela-do-mar.

Em cordões

Nos cordados ocorre um desenvolvimento maior no sistema nervoso central. Os cordões nervosos se tornam muito mais espessos e a velocidade de transmissão é a maior de todos os metazoários, principalmente no caso dos vertebrados. Nestes, os cordões apresentam um tecido conjuntivo que recobre os neurônios, a **mielina**, que funciona como um isolante elétrico, evitando a dissipação da energia elétrica, funciona de forma semelhante a cobertura plástica de um fio elétrico. Isto leva a velocidades impressionantes da ordem de 3 a 120 m/s (**Figura 29.10**).

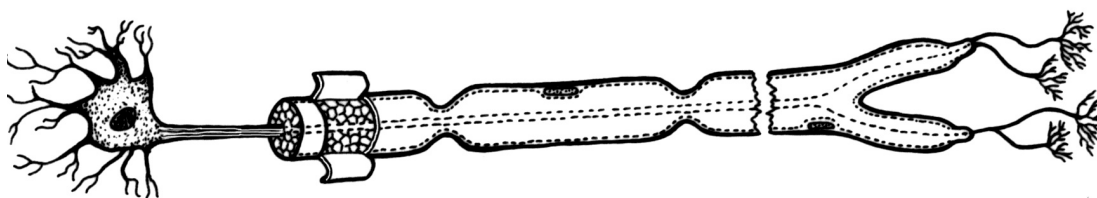


Figura 29.10: Fibra nervosa de vertebrados, mostrando a bainha de mielina em volta do nervo.

O processo de internalização também ocorre nos vertebrados, sendo que, neste caso, a maior importância e complexidade do sistema nervoso central são representadas pela proteção extra que estes apresentam. Neste caso, o esqueleto recobre o sistema nervoso com: a coluna vertebral protegendo a medula, a caixa craniana e o cérebro. Nos vertebrados, o cérebro é dividido em diferentes partes com múltiplas funções (Figura 29.11).

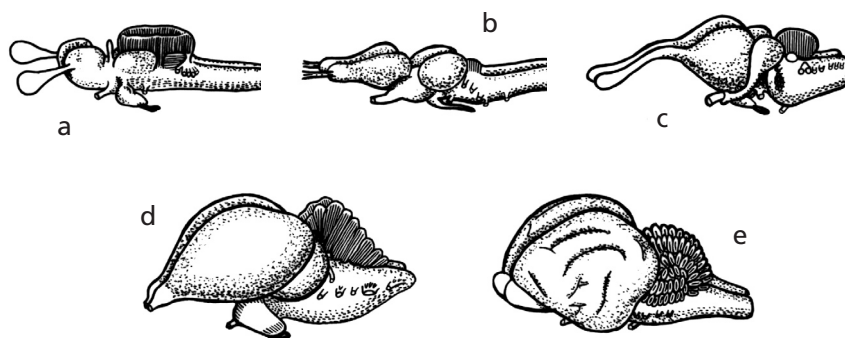


Figura 29.11: Cérebros de diferentes grupos de vertebrados: a) tubarão; b) sapo; c) crocodilo; d) galinha; e) gato. (Fonte: STORER, Tracy I. et al. *Zoologia Geral*. São Paulo: Editora Nacional, 1991.)

Embora ainda existam gânglios dispersos pelo corpo, algumas decisões podem ser tomadas ao nível de medula. Estas decisões são denominadas de **ARCO-REFLEXO**.

Nos vertebrados, principalmente em mamíferos que o sistema nervoso encontra seu mais alto grau de complexidade, com uma capacidade de integração que permitiu comportamentos extremamente complexos nestes animais.

ARCO-REFLEXO

As decisões tomadas ao nível de medula são comportamentos reflexos, estes são testados pelos médicos, como a famosa martelada no joelho. A resposta de levantar a perna não é “pensada” e é tomada ao nível de medula.

Muitos comportamentos podem se tornar reflexos através do aprendizado. Um exemplo é a necessidade de mudar de marcha em um carro. Quando você aprende a dirigir, você “pensa”, “preciso passar da primeira marcha para a segunda”.

Com o aprendizado, este comportamento se torna automático. Você muda de marcha “sem perceber”. O mesmo ocorre quando você aprende a digitar ou datilografar. Em um estágio inicial, você procura as letras no teclado, com o tempo você automaticamente digita a letra correta sem precisar procurá-la.

RESUMO

O sistema nervoso é encarregado de transmitir informações recebidas do ambiente, pelo animal, de interpretá-las e enviar respostas. Nas formas mais simples, como esponjas, a transmissão é feita entre quaisquer células não especializadas, sendo denominada **sistema neuróide**. Em algumas formas, como medusas, a condução do sinal elétrico nervoso pode ser efetuada pelas próprias células epiteliais, sendo denominada **condução epitelial**. Com o surgimento de comportamentos mais complexos, surgiram células especializadas alongadas, denominadas **neurônios**, os quais transmitem a informação de forma rápida através de sinais elétricos. A forma mais simples de condução é através da **rede nervosa** das anêmonas e urocordados planctônicos, onde o sinal se dispersa por todo o corpo do animal. Com o surgimento da bilateralidade, houve uma maior especialização das células nervosas, formando cordões menos numerosos e mais espessos, mas de condução mais rápida. Esta evolução levou ao surgimento dos sistemas nervosos **em cesto** e, posteriormente, com uma maior redução, **em escada**, e, na linha evolutiva dos protostômios. Neles, o sistema nervoso se localiza ventralmente. Em deuterostômios, os cordões nervosos, que se mantiveram, foram os dorsais. O alto grau de especialização dos nervos levou a uma maior importância destes e a comportamentos mais complexos. Estes, que inicialmente ocupavam uma posição superficial no corpo, sofreram o processo de internalização, que nos vertebrados foi acompanhado ainda por uma proteção esquelética (coluna vertebral e caixa craniana).

Além dos centros integradores principais (gânglios cerebrais ou cérebros), tanto em protostômios como em deuterostômios surgem centros secundários, denominados **gânglios periféricos**, que são responsáveis por respostas mais locais.

EXERCÍCIO AVALIATIVO

Por que os axônios gigantes são considerados uma característica homoplástica nos grupos de metazoários onde ocorrem?

INFORMAÇÃO SOBRE A PRÓXIMA AULA

Na próxima aula, veremos como o sistema nervoso se relaciona com o ambiente, ou seja, como os sinais recebidos do ambiente são transformados em impulsos nervosos através de células sensoriais.

objetivo

Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

- Aprender como os animais percebem as informações do meio ambiente.
- Discutir a variedade de tipos de informação que o animal recebe e a importância relativa de cada uma das modalidades sensoriais em função do ambiente onde eles vivem.

Pré-requisitos

Aula 29 – Sistema nervoso.

INTRODUÇÃO

Como visto na aula anterior, o sistema nervoso transmite para o corpo as informações recebidas do meio. Como no meio ambiente os tipos de informação que podem chegar a um animal são muito diferentes, há a necessidade de células especializadas para cada uma das modalidades sensoriais – são os chamados receptores ou órgãos sensoriais.

A distribuição e o tipo de receptores vão variar em função de:

Onde vive o animal – Dependendo do ambiente, o tipo de informação é diferente. Por exemplo, a visão é muito importante para animais aéreos, mas nem tanto para os marinhos, onde a luz se limita às camadas mais superficiais da água.

O hábito de vida – Um animal sésil, por exemplo, lida com uma pequena variedade de informações que chega a ele, ao passo que um animal móvel recebe um número de informações muito grande em um curto espaço de tempo.

O hábito alimentar também afeta a importância relativa de uma modalidade sensorial. Um animal que se alimenta de folhas caídas, por exemplo, não utiliza uma grande variedade de receptores sensoriais, já um predador utiliza um espectro muito grande de informações para localizar sua presa em potencial.



Você pode fazer uma analogia com um motorista de carro que está perdido. Se ele estiver em alta velocidade, não terá tempo útil em reparar nas placas das ruas, porque elas vão chegando aos seus olhos de forma muito rápida. Por isso, você sabe quando alguém está perdido; ele dirige lentamente, pois, assim as informações (placas, sinais) chegarão aos seus olhos em uma taxa mais lenta. Portanto, quanto mais móvel um animal, maior a quantidade de informações que recebe por unidade de tempo.

Como o sinal transmitido é em função de uma inversão de cargas, este é um sinal do tipo elétrico; a energia transmitida em um neurônio é, portanto, elétrica. A principal vantagem de uma transmissão elétrica está na sua rapidez. Isto pode ser observado quando você acende uma lâmpada: o sinal elétrico que sai quando você aperta o interruptor chega tão rápido à lâmpada, que você tem a impressão de que é imediato.

RECEPTORES SENSORIAIS

Uma vez que as informações recebidas do ambiente pelo animal são transmitidas pelo sistema nervoso através de sinais elétricos, os receptores terão de transformar em sinais elétricos as diferentes formas de energia das informações recebidas do meio. Assim, os receptores de tato devem transformar a energia mecânica do contato físico em energia elétrica. Da mesma forma, a energia química que chega às células (na forma de gosto ou cheiro) terá, também, de ser transformada em um sinal elétrico. Esta transformação de energia, de uma modalidade para a outra, é denominada **transdução**.

Os receptores sensoriais podem ser células especializadas para esta função, ou os próprios neurônios que são modificados na sua porção em contato com o meio ambiente. Este tipo de recepção é o que chamamos de terminações nervosas livres. Em vertebrados, são comuns células sensoriais especializadas, enquanto nos demais metazoários, a recepção é efetuada por terminações nervosas livres.

Uma característica das terminações livres e das células sensoriais é que elas, em geral, apresentam uma grande ciliação ou apresentam uma superfície com microvilosidades (**Figura 30.1**). Células com microvilosidades permitem um aumento da superfície sensorial sem que esta ocupe uma área muito grande da superfície corpórea.

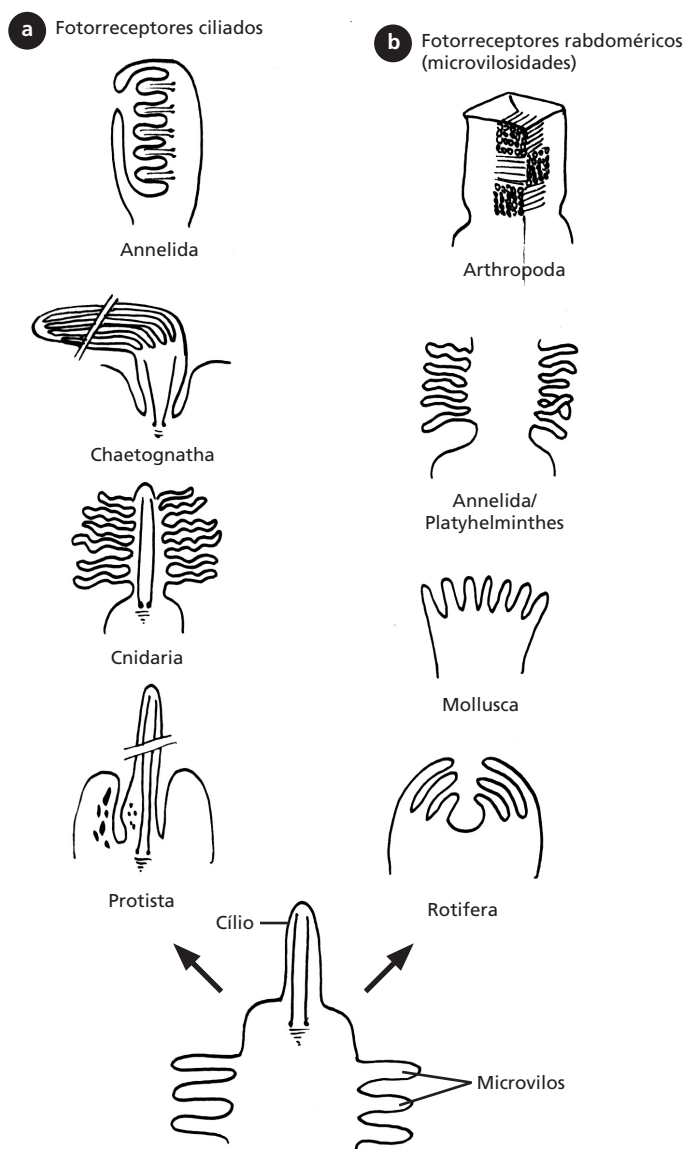


Figura 30.1: Receptores sensoriais: a) ciliados e b) com microvilosidades.

MODALIDADES SENSORIAIS

As diferentes modalidades sensoriais apresentam receptores específicos. Em alguns casos, o mesmo receptor ou célula sensorial pode, eventualmente, ser utilizado para mais de uma modalidade sensorial. Mas, na maioria dos casos, grupos de células sensoriais são específicos para uma determinada modalidade, na qual a informação é transmitida para o centro integrador representado pelo gânglio cerebral ou cérebro.

Se a informação é transmitida para o centro integrador através de sinais elétricos, como o animal sabe que tipo de informação ele recebeu, ou seja, qual a modalidade sensorial envolvida?

Se o receptor for utilizado para mais de uma modalidade, o sinal será interpretado no centro integrador dependendo da intensidade com que a célula sensorial foi excitada.

Quando o receptor é para apenas uma modalidade sensorial, as vias nervosas sensoriais que dele saem atingem uma região específica do centro integrador que interpreta o sinal elétrico como a modalidade sensorial da qual veio o sinal. Assim, após uma célula receptora de tato ser estimulada, um sinal elétrico é transmitido para o cérebro, atingindo uma região que interpreta qualquer sinal elétrico como **TATO**.

A seguir, veremos as modalidades sensoriais mais importantes entre os animais.

Mecanorreceptores

A mecanorrecepção é uma modalidade sensorial simples, em que a deformação de uma célula sensorial fornece ao gânglio cerebral a informação de um contato mecânico, seja este um contato direto, uma transmissão de ondas de vibração ou mesmo o fluxo de água sobre estas células. Esta recepção é muitas vezes facilitada porque, na maioria das células sensoriais, estão presentes cílios ou microvilosidades que servem como alavancas.

Do tato à audição

O tato é o contato físico entre o animal e algo no ambiente, seja o substrato, o tubo ou toca onde vive o animal ou com outros

TATO

Com relação ao tato, um bom exemplo é quando uma pessoa se “queima” de frio. Isto ocorre porque os receptores de calor desta pessoa foram excitados pelo frio ou pelo gelo. A sensação de “queimação” se deve ao fato de que aquele receptor sensorial excitado envia sinais para uma região específica do cérebro, que interpreta tudo que vem daquele receptor como calor. O mesmo ocorre quando você leva um “soco no olho” (ou cai da escada e bate o olho). Neste caso, você “vê estrelas”; na realidade você vê um clarão, porque os receptores que foram excitados mecanicamente enviam sinais elétricos a uma região cerebral que os interpreta como “luz”.

animais. É uma das modalidades sensoriais mais comuns em todo o reino animal, ocorrendo em formas com sistemas nervosos simples, como as esponjas, ou mesmo em formas complexas como vertebrados e artrópodes. Em geral, as células receptoras de tato não são muito distinguíveis das demais células epiteliais, embora estas possam estar mais concentradas em regiões específicas do corpo: nas patas de um vertebrado; ao longo de todo o corpo de um animal que vive em tubos ou galerias, como, por exemplo, a minhoca. Muitos animais apresentam células de tato associadas a cerdas, como ocorre em muitos artrópodes, funcionando como uma alavanca que amplifica o sinal recebido.

No meio aquático, devido à alta densidade da água, o contato entre o meio e as células de tato pode ser utilizado para indicar, por exemplo, a presença de correntes ou indicar ao animal se este se encontra em movimento. Os **ACTINOPTERÍGIOS**, por exemplo, apresentam uma depressão superficial no corpo em forma de uma fina canaleta; esta é denominada **linha lateral** (Figura 30.2) e nela se concentram os receptores de tato, que são deformados pela passagem da água nesta canaleta.

ACTINOPTERÍGEOS

Correspondem a uma das linhagens dos outrora denominados “peixes ósseos”. Como você já percebeu, utilizamos esta denominação para uma das linhagens monofiléticas do táxon parafilético “peixes”.

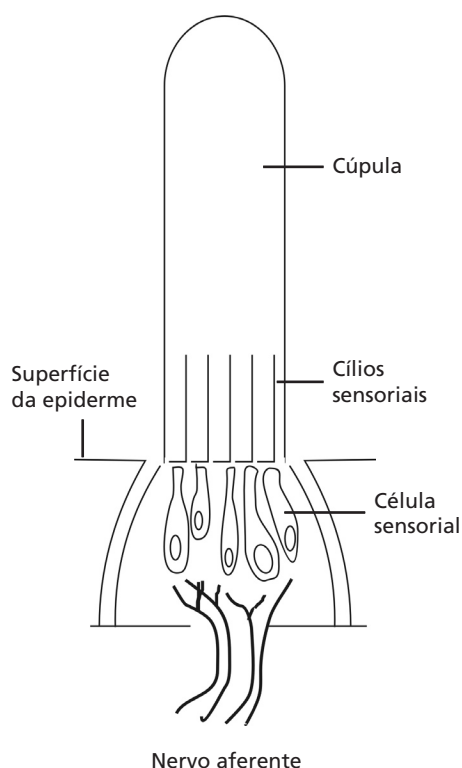


Figura 30.2: Linha lateral de um actinoptérigeo.

A vibração é uma modalidade sensorial extremamente comum no meio aquático, onde muitas vezes o contato físico não é necessário, pois as ondas de vibração se transmitem de forma muito rápida e com grande intensidade neste ambiente. A percepção da aproximação de uma presa ou predador pode muitas vezes ser percebida sem que haja o contato direto (experimente bater na parede de um aquário onde vivem diversos metazoários e observe como muitos deles percebem a vibração transmitida da sua mão para a água).

Em alguns casos, a percepção de vibração pode envolver órgãos extremamente especializados, sendo, neste caso, denominada **audição**, principalmente no meio aéreo, onde a transmissão da vibração não é tão intensa como na água. Um exemplo de órgãos especializados é o ouvido humano, capaz de amplificar as vibrações recebidas por uma membrana delgada (o tímpano), através de um sistema de ossos que funcionam como alavancas (Figura 30.3).

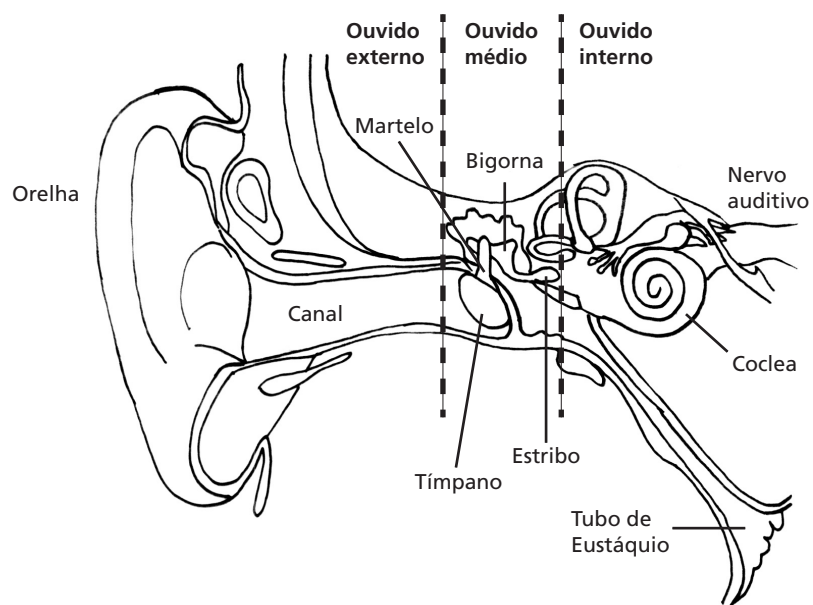


Figura 30.3: Ouvido externo humano.

Alguns animais apresentam ainda a capacidade de emitir vibrações, as quais, após serem refletidas em um objeto qualquer, retornam ao animal sendo recebidas pelos seus mecanorreceptores. Com isto, estes animais podem localizar obstáculos ao longo do seu caminho, tal como ocorre nos morcegos, no ambiente aéreo; e nos golfinhos, no ambiente

aquático, os quais vivem em ambientes onde outras modalidades sensoriais são restritas como a visão. Este é o caso da escuridão da noite para os morcegos e da turbidez das águas para os golfinhos.

Da georrecepção ao equilíbrio

A georrecepção é uma modalidade que derivou, provavelmente, da invaginação de um epitélio mecanorreceptor (tato ou vibração). O processo de invaginação ou evaginação de células sensoriais é comum nos animais, permitindo que estas cubram uma área grande sem comprometer uma grande superfície do animal.

Na **Figura 30.4**, podemos observar a evolução de um epitélio ciliado com células receptoras de tato, que se invaginou de tal forma que perdeu total contato com a superfície.

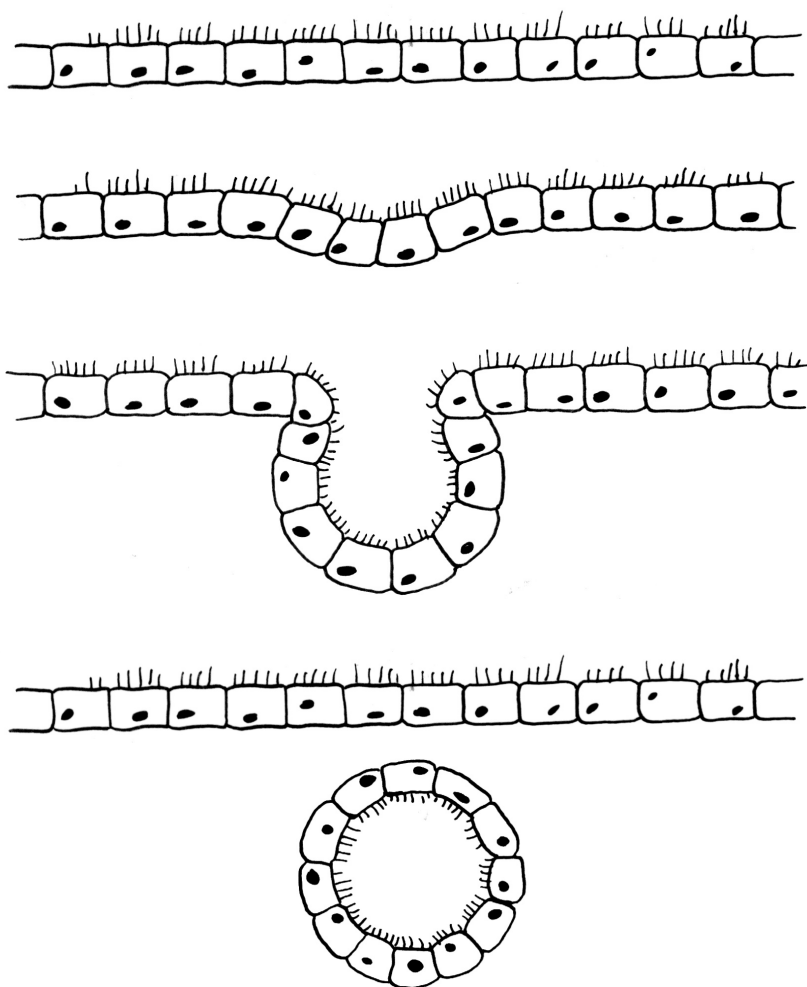


Figura 30.4: Origem de um georreceptor a partir de uma superfície de células mecanorreceptoras.



Um bom exemplo é a baía de Guanabara, onde são comuns grupos de golfinhos, apesar de ser muito poluída e, portanto, com águas muito turvas.

Mas qual seria a vantagem adaptativa de um epitélio sensorial que não tem qualquer contato com o meio externo?

O epitélio ao se fechar forma uma espécie de câmara. No processo de fechamento, uma partícula de areia pode ficar presa, ou o próprio epitélio pode secretar uma partícula de calcário, mais pesada do que a água. Essa partícula tenderá a “cair” excitando uma determinada célula da câmara. Assim, o animal pode receber a informação de contato físico com a “pedra caída” de qualquer uma das células sensoriais. O cérebro interpreta esse sinal da seguinte forma: “a célula excitada” está na direção do centro da Terra (georrecepção).

Não que o animal esteja querendo fazer uma aventura do tipo “viagem ao centro da Terra”, mas em ambientes aquáticos, por exemplo, onde a densidade do corpo do animal é muito próxima da densidade da água, essa informação pode dizer em qual direção está a superfície ou o fundo do mar. A esses órgãos sensoriais denominamos **estatocistos**, e as “pedrinhas” que excitam as células pelo efeito da gravidade chamamos **estatólitos** (Figura 30.5).

Estatocistos são comuns em formas planctônicas de baixa densidade corpórea ou em formas que vivem enterradas na lama dos fundos marinhos, onde a localização de superfície ou fundo através de outra modalidade sensorial, como a visão, é dificultada devido à falta de luz. Ocorrem em grupos muito distintos como cnidários (medusas), urocordados planctônicos, poliquetas tubícolas e pequenos crustáceos (misidáceos) (Figura. 30.6).

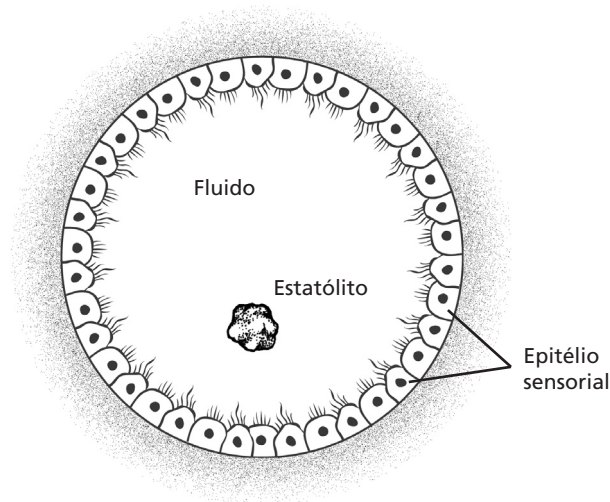


Figura 30.5: Estatocisto com estatólito.

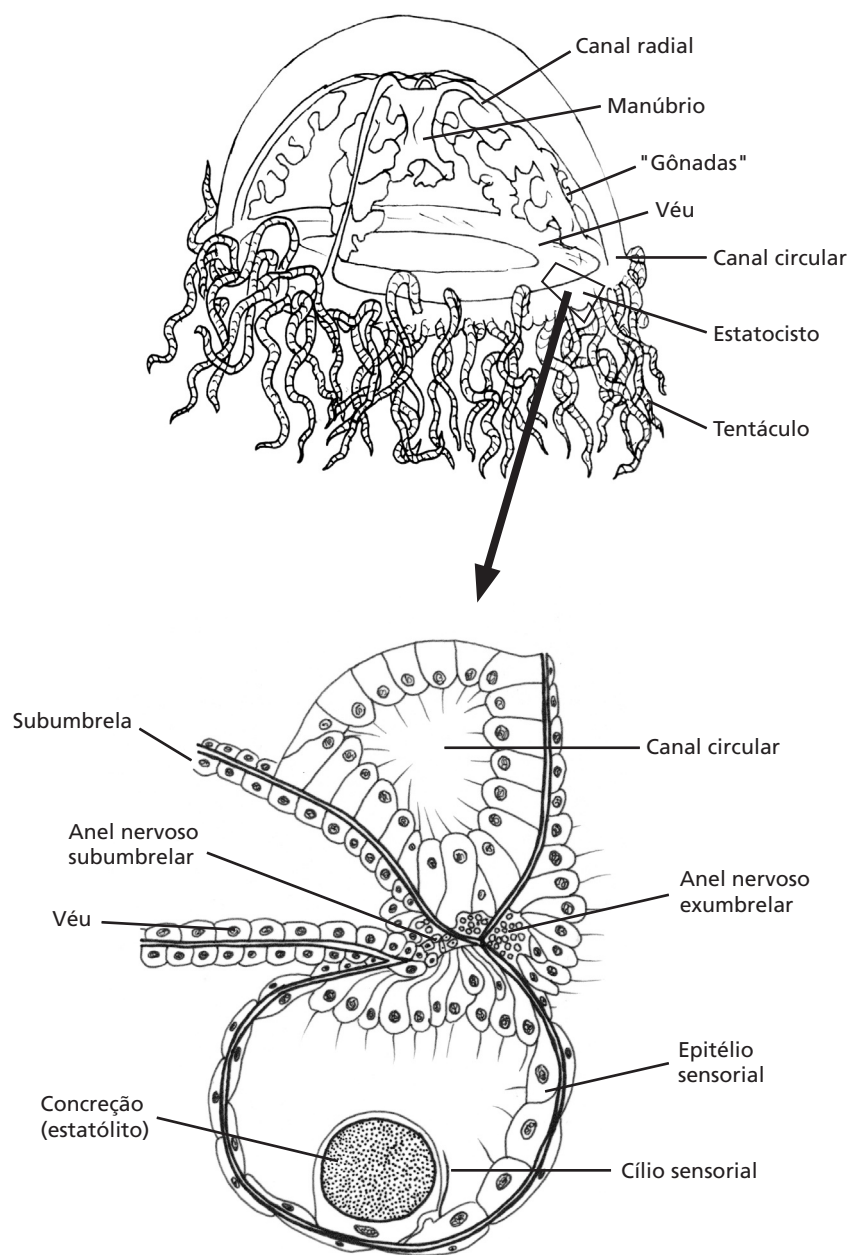


Figura 30.6: Estatocisto de a) medusa e b) misidáceo.

Entretanto, o mesmo epitélio sensorial invaginado que perdeu conexão com o meio externo, pode não reter ou produzir nenhuma partícula densa, ou estatólito.

Neste caso, qual a função do estatocisto?

Nos casos em que isto ocorre, como nos moluscos cefalópodes do gênero *Nautilus*, estes ao se movimentarem farão com que, durante o movimento acelerado, a água, que se localiza internamente, tenda a empurrar o epitélio do lado oposto ao movimento. Esta informação ao chegar ao cérebro será interpretada como direção e aceleração do animal (Figura 30.7).



Você pode fazer a mesma analogia se estiver dentro de um ônibus ou trem. Quando este estiver começando o movimento, isto é, acelerando, seu corpo é jogado para trás. Mesmo que você esteja de olhos fechados, você sabe que um trem ou ônibus está começando a se movimentar e sabe qual o sentido.

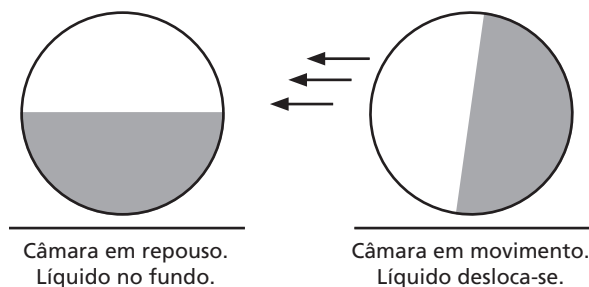


Figura 30.7: Câmara cheia de líquido (“estatocisto sem estatólito”) em movimento. Observe como, no movimento acelerado, a inércia faz com que a água seja comprimida contra a parede da câmara.



Lembre-se daquela brincadeira de criança de girar em volta do próprio eixo do corpo em alta velocidade com os olhos fechados e a sensação de “tontura” ou desequilíbrio que surge quando cessa o movimento. Isto se deve ao fato de, ao girar rapidamente, o líquido dos canais semicirculares se mover. Quando a criança pára, o líquido, por inércia, continua se movendo e excitando as células ciliadas, embora a criança esteja parada.

O mesmo princípio acima pode explicar a origem de sistemas mais complexos como os órgãos de equilíbrio de vertebrados aéreos localizados no ouvido interno. Estes são denominados **canais semicirculares** e consistem em um sistema de tubos (em vez de uma câmara) cheios de líquido e com um epitélio ciliado interno. Cada tubo se orienta em uma das três dimensões do meio. Assim, a aceleração em qualquer direção faz com que o líquido corra pelos tubos e faça os cílios das células mecanorreceptoras se curvarem. Este tipo de informação tridimensional permite, além da percepção de aceleração, também a de posição relativa do corpo no ambiente, ou seja, o equilíbrio.

Propriocepção

A propriocepção é uma modalidade sensorial que fornece informações ao centro integrador (cérebro ou gânglio cerebral) do estado de contração e distensão dos músculos do corpo. Ou seja, não é uma modalidade sensorial que fornece informações sobre o ambiente externo, mas sim sobre o ambiente interno. É muito desenvolvida em artrópodes e vertebrados, animais estes que apresentam uma grande gama de musculaturas e, portanto, uma extensa variedade de possíveis estados ou posições. Fornece não apenas informações de movimento, mas também do estado em que se encontra o animal, mesmo que estático. Por exemplo, se o animal está em pé, sentado, curvado, ereto etc.

Fotorrecepção

Nós, como vertebrados aéreos, temos na visão uma das modalidades sensoriais mais importantes para a nossa vida. Isto se deve à velocidade extremamente rápida da luz, o que permite ao animal receber um sinal, mesmo que distante, de forma quase instantânea.

Entretanto, para atingir o grau de desenvolvimento do olho humano e de outros olhos de vertebrados (alguns melhores que os humanos), os animais passaram por diversos estágios de recepção de luz ao longo da história evolutiva, sendo que muitos se mantiveram em metazoários atuais.

A forma mais simples de recepção de luz ocorre através de células epiteliais que apresentam substâncias que sofrem uma alteração química (isomeria) quando excitadas por um fóton de luz. Na forma de sinal elétrico, esta transformação é enviada ao cérebro que interpreta o sinal em função da posição das células excitadas e da intensidade desta excitação. Estas células funcionam como um filme fotográfico que, ao ser exposto à luz, sofre reações químicas em função da intensidade e, no caso do filme colorido, do comprimento de onda da luz.

Estes fotorreceptores dispersos na superfície encontram-se em quase todos os metazoários, e fornecem informações simples como a presença ou não de luz e sua intensidade. São comuns, principalmente, em formas aquáticas que vivem longe da superfície ou em formas aquáticas e terrestres que vivem enterradas, num ambiente desprovido de luz. Nestes últimos, a presença de luz pode indicar que o animal está saindo de seu habitat, como no caso de uma minhoca ou um animal planctônico de grandes profundezas marinhas.

Essa modalidade simples, entretanto, foi se modificando ao longo da história evolutiva, de forma semelhante ao que ocorreu com os epitélios mecanorreceptores, isto é, a partir de uma invaginação do epitélio fotorreceptor.

Na **Figura 30.8**, podemos observar os possíveis passos evolutivos deste processo.

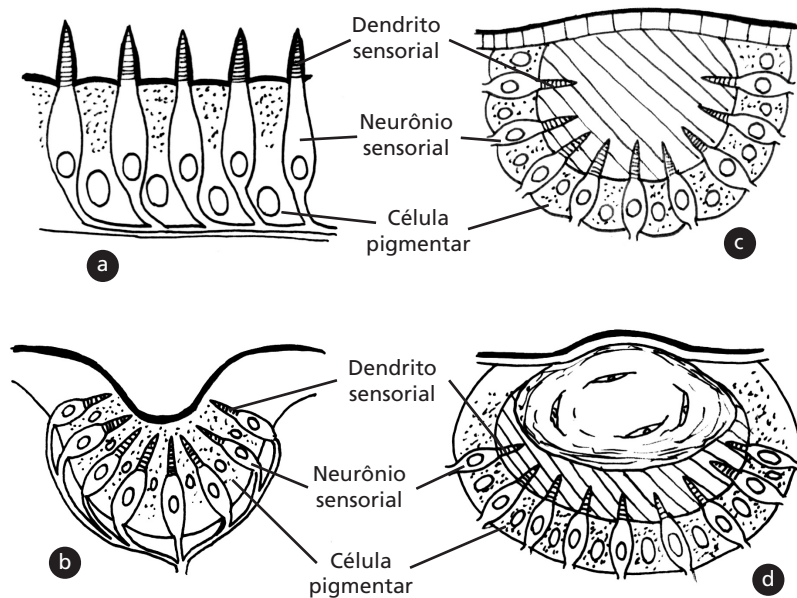


Figura 30.8: Evolução dos epitélios fotorreceptores.

Quando o epitélio é simples (**Figura 30.8.a**), um objeto que se interponha entre ele e a fonte de luz impedirá a incidência direta de luz. Esta informação será então enviada ao centro integrador e interpretada como uma “sombra”.

Com a invaginação (**Figura 30.8.b**), o epitélio pode sombrear algumas células fotorreceptoras e não outras, dependendo da posição do objeto. Neste caso, a excitação de diferentes células permite ao centro integrador interpretar não apenas a informação de que “há uma sombra”, mas também a direção de onde vem esta sombra. Este tipo de receptor invaginado é denominado **mancha ocular** ou **ocelo**.

A invaginação pode ser ainda maior (**Figura 30.8.c**), deixando apenas uma estreita abertura entre o epitélio e o meio externo. Se esta abertura for menor do que o comprimento de onda da luz, ocorrerá o fenômeno físico de difração da luz, que faz com que o objeto em

questão não apenas sobre o epitélio, mas também que se forme uma imagem do objeto. Isto é o que acontece com uma câmara fotográfica, cuja abertura é menor do que o comprimento de onda da luz. Este tipo de receptor fotossensorial, que permite a formação de imagens, é denominado **olho em câmara**. No olho em câmara, a formação de uma imagem só será possível se a distância do objeto para a abertura for a mesma que da abertura para o epitélio sensorial (distância focal). Nesses casos, o animal forma imagens apenas a curtas distâncias; portanto, na maior parte das vezes, o olho fornece apenas informações quanto à presença e direção do objeto, permitindo reconhecê-lo apenas quando muito próximo.

O problema da distância focal muito próxima pode ser resolvido quando a abertura apresenta uma lente (**Figura 30.8.d**) (**olho com lente**), a qual pode ser constituída por um líquido ou uma substância gelatinosa transparente, que refrata (desvia) os raios de luz. Neste caso, a distância focal pode ser maior do que o comprimento do olho e, portanto, o animal consegue formar imagens de objetos mais distantes.

Em alguns casos, houve a evolução de lentes que ou se deformam ou mudam de posição; são os chamados **olhos de acomodação**. Estes permitem que a distância focal seja constantemente alterada, permitindo a formação de imagens a diferentes distâncias.

A evolução dos tipos de fotorreceptores está relacionada à complexidade de comportamentos e ao ambiente onde vive o animal. Assim, ocelos (**Figura 30.9**) e olhos em câmara simples (**Figura 30.10**) são comuns na maioria dos grupos de metazoários, com exceção dos porífera.



Figura 30.9: Ocelos de metazoários a) b) c)

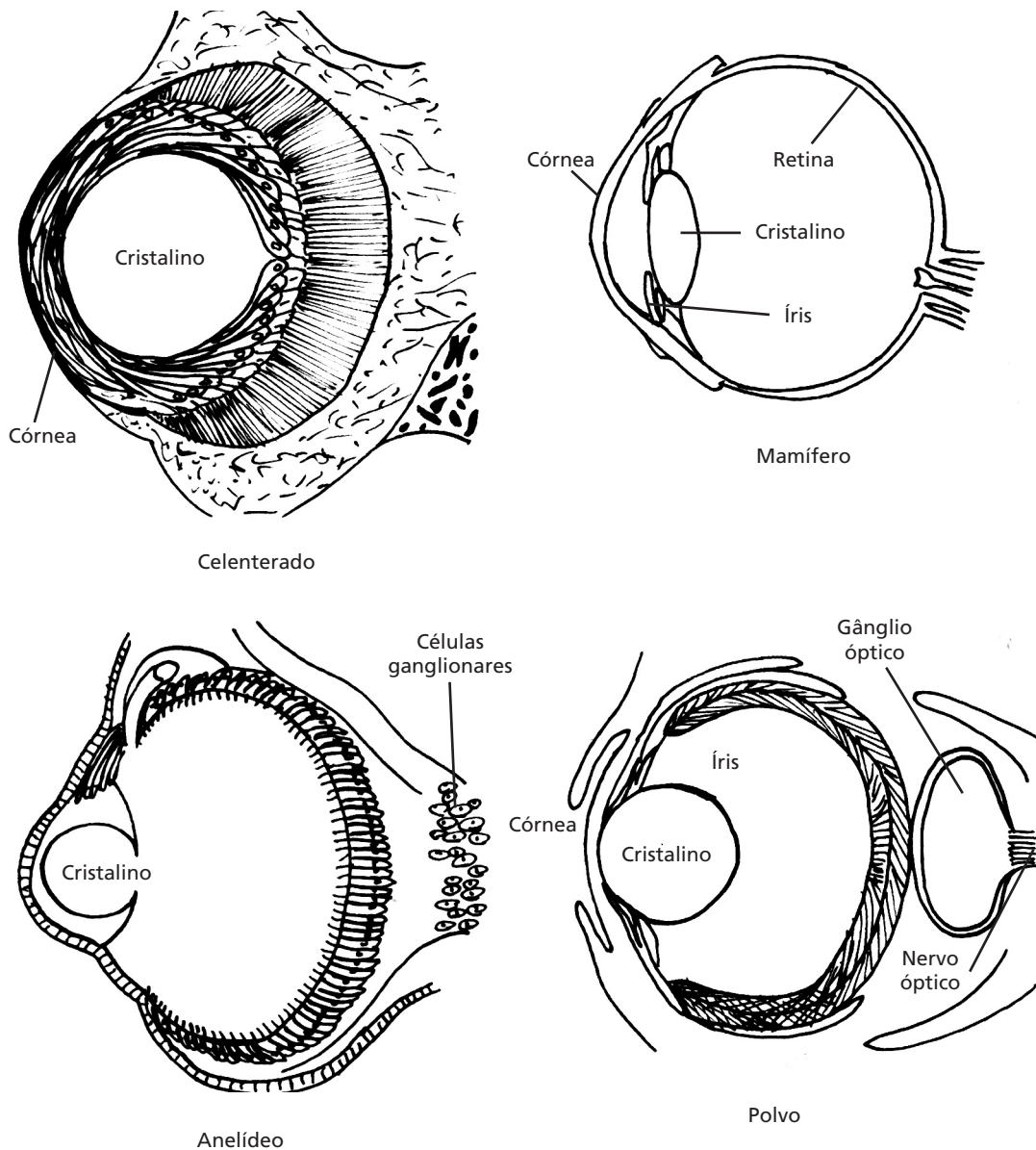


Figura 30.10: Olhos em câmara de metazoários a) b) c)

Os olhos com lentes ocorrem em diversos metazoários aquáticos, como cnidários, anelídeos e moluscos gastrópodes e aéreos como aracnídeos. Ao passo que os olhos com lentes de acomodação são restritos aos vertebrados e aos moluscos cefalópodes. A semelhança entre os olhos de vertebrados e polvos (Figura 30.11) é um dos exemplos clássicos de homoplasia por convergência, ou seja, embora apresentem estruturas muito semelhantes, esses órgãos têm origem diferente e são formados por materiais distintos.

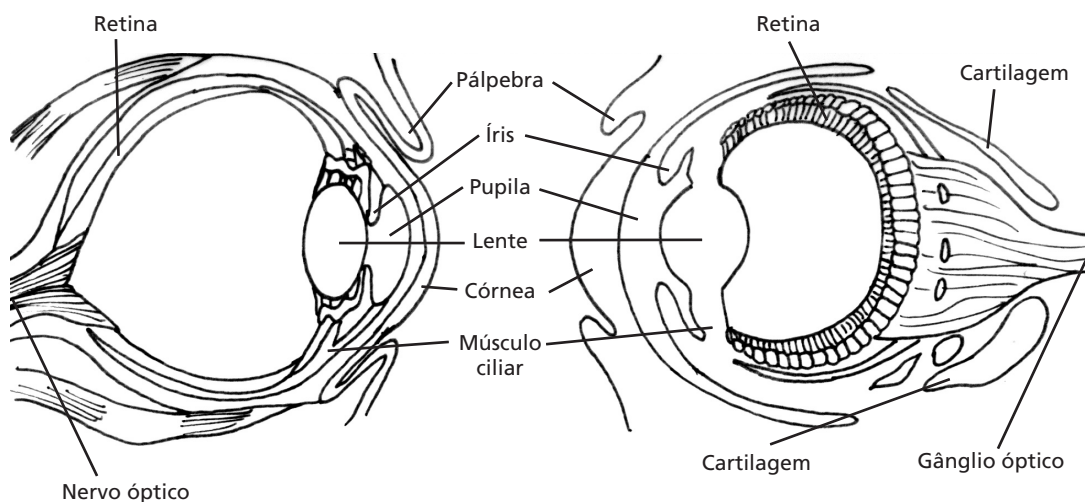


Figura 30.11: Olhos de acomodação de polvo e alguns vertebrados.

Olho composto

Alguns metazoários muito distintos taxonomicamente, como alguns anelídeos, bivalves e equinodermos, apresentam um tipo diferente de olho. Este é o **olho composto**, que apresenta seu maior grau de desenvolvimento em artrópodes como crustáceos e insetos.

O olho composto difere do olho em câmara por apresentar uma série de unidades independentes (pequenos olhos alongados) denominadas **omatídeos** (Figura 30.12). Alguns autores usam a denominação **olho em mosaico**, devido ao fato dele formar, no centro integrador do animal, uma série de imagens do mesmo objeto, semelhante a um mosaico.

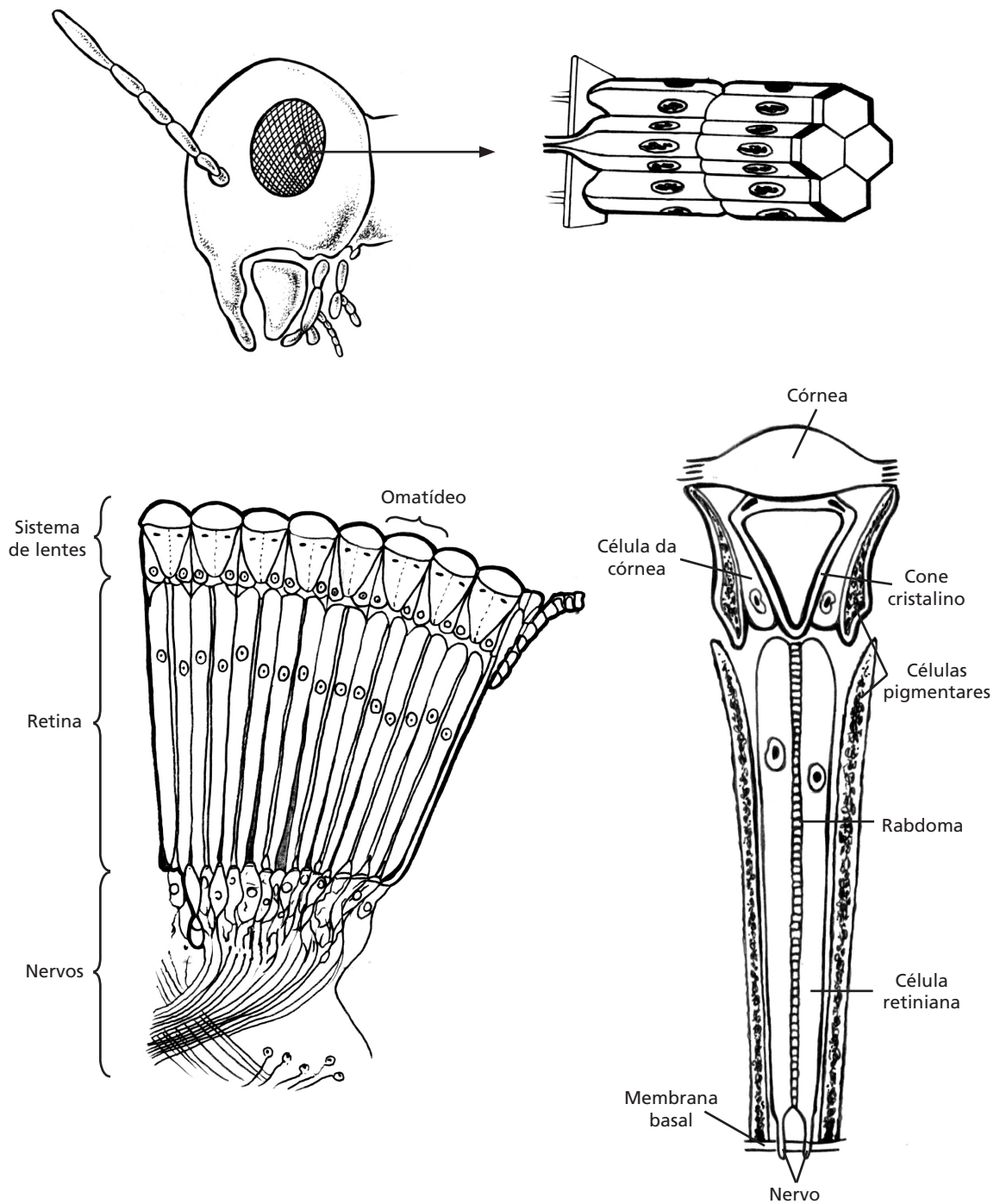


Figura 30.12: Olho composto de inseto e suas unidades funcionais (omatídeos).

Os olhos compostos podem ser formados por algumas dezenas ou milhares de omatídeos. A grande vantagem do omatídeo sobre os olhos em câmara é que, devido ao seu comprimento alongado, a imagem pode ser refletida várias vezes ao longo da parede do olho, até atingir o epitélio sensorial, não requerendo uma distância focal ou uma lente de acomodação. O animal captura imagens de objetos localizados a diferentes distâncias. Entretanto, como a imagem é múltipla, este tipo de olho não tem uma resolução tão boa como a dos olhos com lentes de vertebrados e cefalópodes.

Os olhos compostos, entretanto, permitem uma visão mais ampla (tente matar uma mosca por trás, ela provavelmente escapará). Além disso, a evolução de olhos compostos parece ser associada mais à necessidade de percepção de movimento do que à formação de imagens com boa resolução.

A disposição em mosaico faz com que qualquer movimento, por menor que seja, possa ser percebido pelo animal, pois o deslocamento alterará a posição em pelo menos uma ou algumas das unidades do mosaico de omatídeos.

O olho humano, por exemplo, não é adaptado para perceber movimentos rápidos como o da lagartixa. Nosso olho é capaz de armazenar na memória apenas 24 quadros por segundo. Este é o princípio do cinema; como no filme são passadas imagens estáticas (fotos) a uma velocidade de 35 quadros por minuto, nós não percebemos a mudança das pequenas fotos, e temos a impressão de movimento devido ao armazenamento da imagem anterior no cérebro. Uma abelha, com seu olho composto, é capaz de visualizar até 300 quadros por segundo. Ou seja, não leve sua abelha de estimação ao cinema, ela vai achar muito tedioso aquela sequência de imagens estáticas passando uma após a outra.



Repare que uma lagartixa só consegue pregar pequenos insetos, pois se mantém praticamente imóvel até que eles se aproximem. Como a resolução da visão do olho composto dos insetos não é tão boa como a do olho em câmara dos vertebrados, o inseto não vê a lagartixa se esta estiver imóvel. Ela só consegue se alimentar de insetos devido ao seu movimento extremamente rápido, muitas vezes imperceptível para o nosso olho vertebrado, o qual somente consegue ver a lagartixa imóvel.

Alguns artrópodes aquáticos de hábito noturno, como camarões e lagostas, apresentam uma capacidade de transformar o olho em mosaico em um olho semelhante ao olho em câmara. Desta forma, em situações de baixa luminosidade, eles recolhem os pigmentos que isolam as unidades, fazendo com que apenas uma imagem seja formada a partir de vários omatídeos. Estes permitem uma melhor resolução com uma perda na capacidade de percepção de movimentos. São denominados **olhos de superposição**, enquanto os olhos compostos, nos quais cada omatídeo forma uma imagem de forma independente, são denominados **olhos de aposição**.

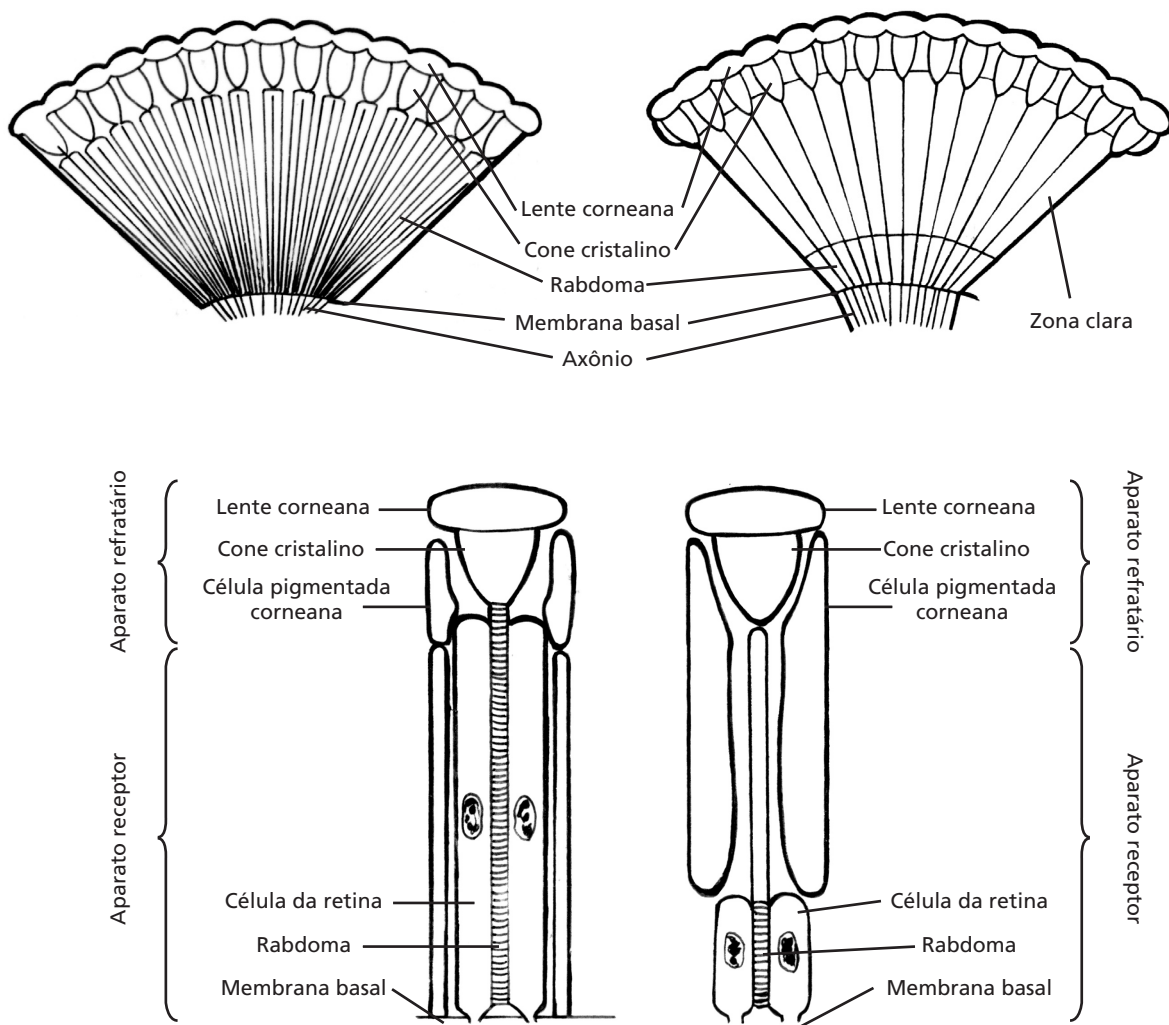


Figura 30.13: Olho composto de superposição. a) Adaptado à baixa intensidade luminosa (escuro) e b) adaptado à alta intensidade de luz.

Quimiorrecepção

A quimiorrecepção é a modalidade sensorial mais difundida entre os metazoários aquáticos, principalmente os marinhos. Isto se deve ao ambiente químico da água do mar, muito semelhante ao conteúdo celular e extracelular dos metazoários. Por estarem em equilíbrio osmótico, estes animais estão constantemente trocando substâncias com o meio.

É comum, entre os metazoários aquáticos, a secreção de pequenas quantidades de aminoácidos. Estes funcionam como uma espécie de “identidade” do animal em um ambiente onde o senso de visão (fotorrecepção) é restrito. Esta “identidade” permite aos animais reconhecer possíveis presas, predadores ou parceiros potenciais para a reprodução.

Primariamente, a quimiorrecepção não requer células sensoriais específicas; o contato de cada uma das células epiteliais com outras substâncias funciona como um mecanismo sensorial, como ocorre em poríferos e cnidários. A concentração de células quimiossensoriais em pequenas fendas e cavidades, cujo fluxo de água é mantido através de uma intensa ciliação, é comum em alguns platelmintos e poliquetos.

Em artrópodes aquáticos, as estruturas quimiossensoriais, geralmente na forma de cerdas ocas, estão mais situadas nas antenas e peças bucais. A percepção sensorial pode ser tão grande que algumas lagostas respondem a concentrações de até 10^{-10} molar (33mg em uma piscina olímpica) de um aminoácido específico. Em vertebrados aquáticos, a capacidade de recepção é também muito grande, embora seus receptores estejam dispersos por todo o corpo, porém com uma concentração maior na região bucal.

Embora a quimiorrecepção seja fundamental para animais aquáticos, esta é uma modalidade sensorial muito lenta, que depende da difusão dos íons e aminoácidos no meio aquático. Isto pode ser muito lento, requerendo, portanto, a utilização de outras modalidades sensoriais mais rápidas, como a mecanorrecepção (vibração) e a fotorrecepção.

Devido às características do ambiente aéreo, a quimiorrecepção não é tão fundamental para os animais aéreos quanto para os animais aquáticos. Neste caso, podemos efetuar ainda uma outra distinção entre a quimiorrecepção. Quando ela é efetuada pela percepção de substâncias em suspensão no meio aéreo, é denominada **olfato**; quando ocorre por dissolução de substâncias em meio líquido, recebe a denominação **gustação**.

Em insetos, por exemplo, a gustação está associada a receptores sensoriais localizados na probóscide, como nas moscas (repare como uma mosca “lambe” o alimento antes de comer). A olfação, por outro lado, está relacionada com receptores sensoriais associados às antenas.

Nos vertebrados, a distinção é ainda mais clara. Como as células quimiossensoriais têm de ter uma membrana delgada para facilitar a absorção de substâncias pelo meio, estas estão normalmente protegidas da dessecação do ambiente aéreo. Assim, a olfação ocorre dentro da cavidade nasal enquanto a gustação está associada a papilas dispersas na cavidade bucal, especialmente na língua.

Outras modalidades sensoriais

Além das modalidades acima citadas, muitos metazoários apresentam capacidade de percepção de temperatura (termorrecepção), pressão (barorrecepção), eletricidade (eletorrecepção) e magnetismo.

Temperatura

A termorrecepção é muito desenvolvida, principalmente em animais homeotérmicos como as aves e os mamíferos. Neles, este controle é fundamental à sua sobrevivência por permitir que eles “saibam” das condições térmicas do meio externo e por possibilitar o equilíbrio da temperatura interna. A termorrecepção ocorre também em hirudíneos que parasitam aves e mamíferos, sendo utilizada como estratégia para localizar o hospedeiro. De forma geral, as células termorreceptoras não são muito diferenciadas, estando dispersas por toda a superfície corpórea.

Pressão

A percepção de variações na pressão é utilizada por diversos metazoários aquáticos, principalmente formas planctônicas como medusas, ctenóforos e crustáceos copépodes. Embora não esteja claro quais células são responsáveis por tal tipo de recepção, essa capacidade está bem comprovada, e, provavelmente, é utilizada para que o animal perceba em que profundidade se encontra, já que a pressão da coluna de água é muito grande (cerca de 1 atmosfera a cada 10 metros de profundidade).

Eletricidade

A eletrorrecepção é comum em alguns vertebrados aquáticos como raias e cações, no meio marinho, e o poraquê (ou peixe-elétrico), na água doce. Esses animais emitem sinais elétricos através de órgãos semelhantes a pilhas, os quais são utilizados como se fossem um radar, permitindo que tais animais não apenas se localizem mas também localizem presas ou obstáculos em ambientes de águas turvas, onde a visão é restrita.

Geomagnetismo

A percepção do campo magnético da Terra permite que o animal literalmente “navegue” utilizando uma bússola interna, que se alinha com o pólo norte magnético. Esta percepção se dá pela presença de placas metálicas magnetizadas, sendo muito desenvolvidas em aves migratórias, embora possa ocorrer também em algumas abelhas. Em aves, tal capacidade permite que o animal possa efetuar sua migração sem que necessite de pontos de referência em terra. É o que ocorre, por exemplo, com os pombos-correio, cuja habilidade de “voltar para casa” se deve à utilização da **PERCEPÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO DA TERRA**.

Algumas dessas modalidades estão sendo ainda estudadas e muitas ainda estão para ser descobertas. A dificuldade se deve ao fato de elas serem, em princípio, “estranhas” para nós, humanos, que não possuímos capacidade de percebê-las. Entretanto, é possível que novos experimentos nos levem a descobrir outras modalidades sensoriais nos animais, ou até concluir que mesmo os seres humanos possam ter modalidades ainda desconhecidas. Quem sabe um sexto sentido?

A PERCEPÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO DA TERRA

Foi descoberta, em bactérias, surpreendentemente, por volta de 1980. Não que estas estejam procurando efetuar grandes migrações como uma ave. De fato, o que ocorre é que estando o pólo magnético dentro da Terra, para elas, a orientação magnética permite que saibam onde é o interior do planeta. Tal característica é comum em bactérias anaeróbicas aquáticas, que ao se dirigir para o interior do sedimento (interior do planeta) evitam a oxidação pela água da superfície dos sedimentos.

RESUMO

O sistema sensorial é o responsável pela recepção de informações do ambiente e sua transdução em um sinal elétrico a ser transmitido pelo sistema nervoso.

As células sensoriais foram, primitivamente, células epiteliais simples que se diferenciaram, ao longo da evolução, em células especializadas – como no caso dos vertebrados – ou em neurônios modificados – como no caso dos demais metazoários. Essas células geralmente são encontradas em grupos e são ciliadas ou com microvilosidades, aumentando a superfície de contato com o meio e funcionando, no caso da mecanorrecepção, como alavancas. Com a especialização, cada tipo de célula é responsável por uma modalidade sensorial específica.

As principais modalidades sensoriais são a **mecanorrecepção**, a **propriocepção**, a **fotorrecepção** e a **quimiorrecepção**. A mecanorrecepção pode se dar na percepção de tato, vibração, audição ou mesmo posição do corpo e equilíbrio em função do tipo de epitélio e de seu grau de invaginação. A propriocepção fornece informações sobre o estado de contração da musculatura, ou seja, informa sobre a posição relativa das diferentes partes do esqueleto animal. A fotorrecepção pode variar desde a percepção ou não de luz até a formação de imagens através de olhos, tornando-se mais complexas quando providas de lentes. A fotorrecepção pode ser efetuada também por olhos compostos, os quais são formados por unidades funcionais, ou omatídeos, que permitem uma melhor percepção de movimentos se comparados a uma visão de boa resolução. Outras modalidades sensoriais também estão presentes nos metazoários, como a percepção de temperatura, pressão, eletricidade e campo magnético.

EXERCÍCIOS

1. Um pesquisador substituiu, através de uma microcirurgia, o estatólito de um crustáceo natante, substituindo-o por um pedaço de limalha de ferro. Após a cirurgia, o mesmo pesquisador colocou um ímã sobre o aquário onde o crustáceo estava nadando. Qual deve ter sido o comportamento do crustáceo e por quê?
2. Qual é a importância relativa da quimiorrecepção e da fotorrecepção para animais aquáticos e aéreos?

INFORMAÇÃO SOBRE A PRÓXIMA AULA

Na próxima aula veremos como os metazoários se perpetuam ao longo do tempo, através da produção seqüencial de novos indivíduos por meio do processo de reprodução.

Reprodução

AULA

31

objetivo

Ao final desta aula, você deverá ser capaz de:

- Entender as principais estratégias dos animais para se perpetuarem ao longo do tempo e ocuparem novos espaços de forma mais efetiva.

INTRODUÇÃO

A capacidade de reprodução de uma espécie ao longo do tempo, ou seja, sua capacidade de perpetuação, é uma das características utilizadas na definição dos animais (metazoários). A reprodução pode ocorrer através da simples produção de réplicas de um animal, como no caso da reprodução assexuada, ou através da junção de material genético proveniente de dois animais da mesma espécie (reprodução sexuada). No caso da reprodução sexuada, ocorre uma divisão reducional, denominada meiose, para que o novo indivíduo mantenha a mesma quantidade de material genético dos indivíduos que o originaram, ou seja, seus “pais”.

A seguir, veremos os principais tipos de reprodução assexuada e sexuada e as principais diferenças desses dois tipos de reprodução em relação à origem evolutiva e às condições ambientais em que ocorrem.

REPRODUÇÃO ASSEXUADA

A reprodução assexuada ocorre em grande variedade de grupos animais, desde formas estruturalmente simples, como as esponjas, até formas bem complexas, como os equinodermos e os artrópodes. Embora seja uma forma de reprodução muito simples, raramente é característica obrigatória dos metazoários. Conforme já visto, uma das sinapomorfias de metazoários é a reprodução sexuada, e a reprodução assexuada representa uma derivação para diferentes grupos animais em função, principalmente, do ambiente e da estratégia de vida deles. Portanto, consideramos a reprodução assexuada como um caráter homoplástico nos metazoários, pois origina-se de forma independente nos diferentes grupos.

Regeneração

Uma condição básica para que haja reprodução assexuada é a existência, no animal, de potencial de regeneração de partes do corpo. O fato de diversos grupos de animais apresentarem potencial regenerativo não significa que todos possam reproduzir-se assexuadamente. A passagem da capacidade de regeneração para a reprodução assexuada não foi necessariamente atingida por todos os grupos. As principais diferenças entre potencial de regeneração e capacidade de reprodução assexuada são:

- Na reprodução assexuada, é necessário que um indivíduo origine, pelo menos, dois indivíduos;

- Para que haja reprodução assexuada, a divisão do corpo ou a produção de novas partes deve ocorrer independentemente de haver lesão ou fragmentação do corpo, causada por algum agente externo.

Assim sendo, um animal não pode se dar ao luxo de apenas reproduzir-se quando sofre algum tipo de lesão, como ocorre na regeneração de partes do corpo. Para que haja reprodução assexuada, o potencial de regenerar partes do corpo deve ser induzido internamente.

A necessidade de um indivíduo originar pelo menos dois é também fundamental, pois, caso contrário, não estaria havendo multiplicação da espécie, mas apenas perpetuação de um único indivíduo, através da substituição de células, o que não configura uma reprodução propriamente dita.

Tipos de reprodução assexuada

A reprodução assexuada pode ocorrer de várias formas, sendo as mais comuns a **fissão ou cissiparidade**, o brotamento e a partenogênese.

- **Fissão ou cissiparidade**

A fissão ou cissiparidade é a forma mais primitiva de reprodução assexuada, muito similar ao que ocorre na divisão celular, sendo que, no caso dos metazoários, o animal (e não apenas uma célula) divide-se em duas partes, através de uma fissão do corpo. Cada parte pode originar novo indivíduo. A fissão ou cissiparidade pode ocorrer por divisão simples, em que um indivíduo parental origina dois indivíduos novos, ou mesmo quando um indivíduo origina centenas ou milhares de indivíduos novos, através de múltiplas divisões.

Esse tipo de reprodução assexuada ocorre em grande variedade de grupos de animais, principalmente naqueles de corpo mole, sendo comum em poríferos, cnidários, anelídeos e **EQUINODERMOS**.

Embora os **EQUINODERMOS** possuam estruturas esqueléticas rígidas, a reprodução assexuada é comum naquelas formas cujos esqueletos são ossículos internos, como no caso das estrelas-do-mar e dos pepinos-do-mar, não ocorrendo em ouriços-do-mar, que possuem carapaças rígidas completas.

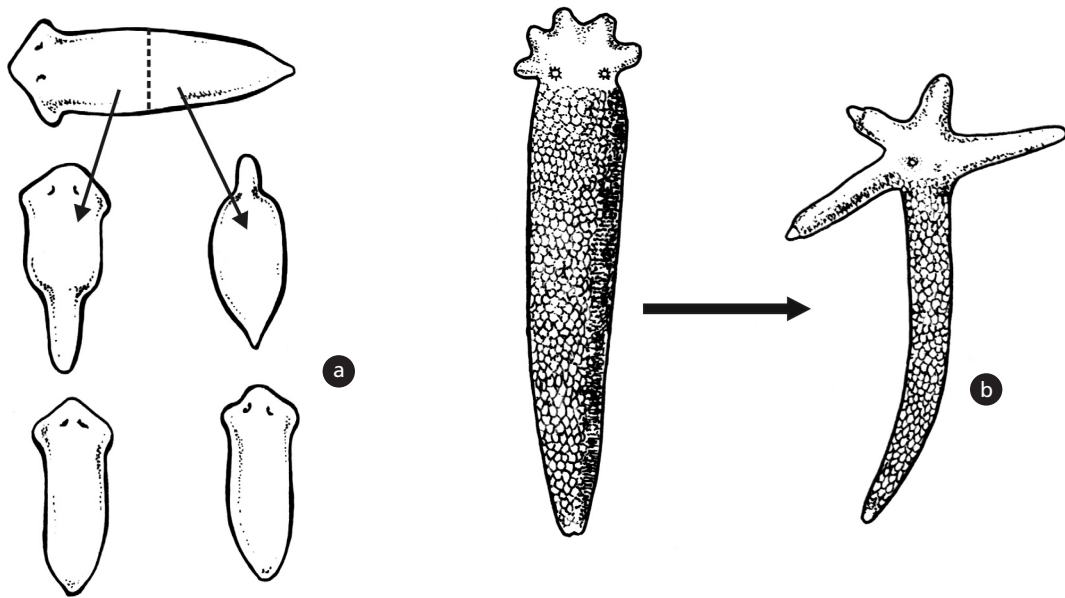


Figura 31.1: Reprodução assexuada por fissão. (a) Planária; (b) estrela-do-mar.

• Brotamento

Ocorre quando um novo indivíduo “brota” (semelhante a um broto de planta) do corpo de um indivíduo parental. É uma forma mais complexa de reprodução assexuada, ocorrendo nos mais diversos grupos de animais, principalmente nos de corpo mole, como em alguns anelídeos, cnidários e esponjas.

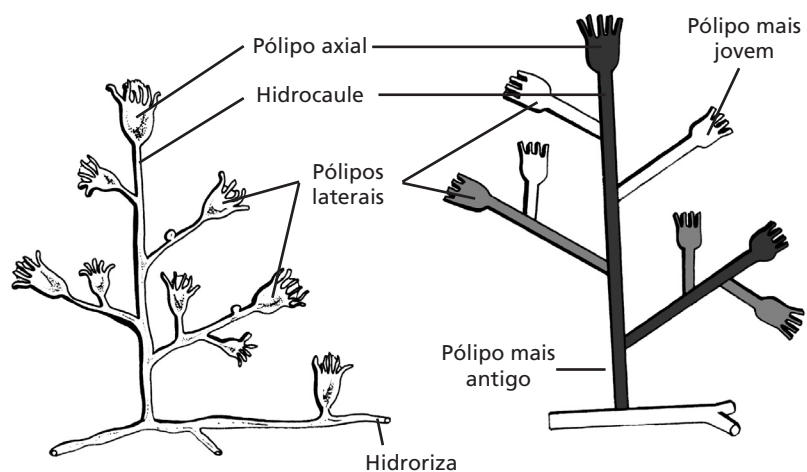


Figura 31.2: Reprodução assexuada por brotamento.

• Partenogênese

É a forma mais complexa de reprodução assexuada, sendo, provavelmente, derivada da reprodução sexuada. Muitas vezes, a partenogênese é considerada indevidamente como uma forma de reprodução sexuada.

Na **PARTENOGENÊSE**, são produzidas células gaméticas femininas (os óvulos), como na reprodução sexuada; entretanto, esses óvulos não são fecundados e esses começam a se dividir, originando um indivíduo novo a partir do material genético de um único indivíduo.

Essa estratégia de reprodução é comum em alguns grupos, como **ROTÍFEROS** e crustáceos de água doce (pulgas d'água). Como se vê, é comum em animais cuja reprodução assexuada por fissão ou brotamento não é possível devida à presença de esqueletos mais rígidos.

Embora em vários grupos a reprodução por partenogênese produza indivíduos sempre iguais, em alguns grupos os ovos não fecundados podem desenvolver-se originando machos, enquanto os ovos fecundados originam fêmeas, evidenciando ainda mais a relação entre reprodução assexuada por partenogênese e reprodução sexuada.

No caso da **PARTENOGENÊSE**, embora se formem “óvulos”, estes são originados por células de um único indivíduo, ou seja, são réplicas desse indivíduo materno (clones), não havendo troca de material genético, daí ser considerada uma forma de reprodução sexuada, apesar de ter se originado como uma modificação da reprodução sexuada através de gametas.

Como você deve lembrar, os **ROTÍFEROS** são pseudocelomados que apresentam uma cutícula muito espessa, semelhante a um esqueleto rígido. Recentemente, muitos pesquisadores têm sugerido que os pseudocelomados sejam, na realidade artrópodes degenerados, já que apresentam o fenômeno de muda (ou ecdise) durante o crescimento, caráter esse compartilhado apenas com artrópodes. Segundo esses pesquisadores, os artrópodes e pseudocelomados formariam um táxon denominado **Ecdysozoa**.

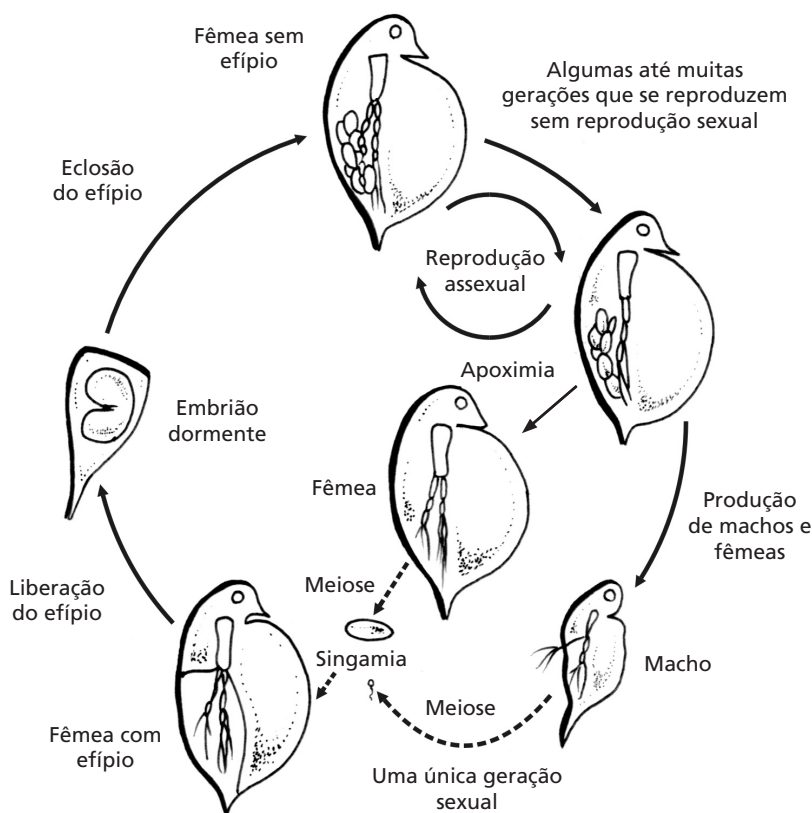


Figura 31.3.a: Reprodução assexuada por partenogênese: cladóceros.

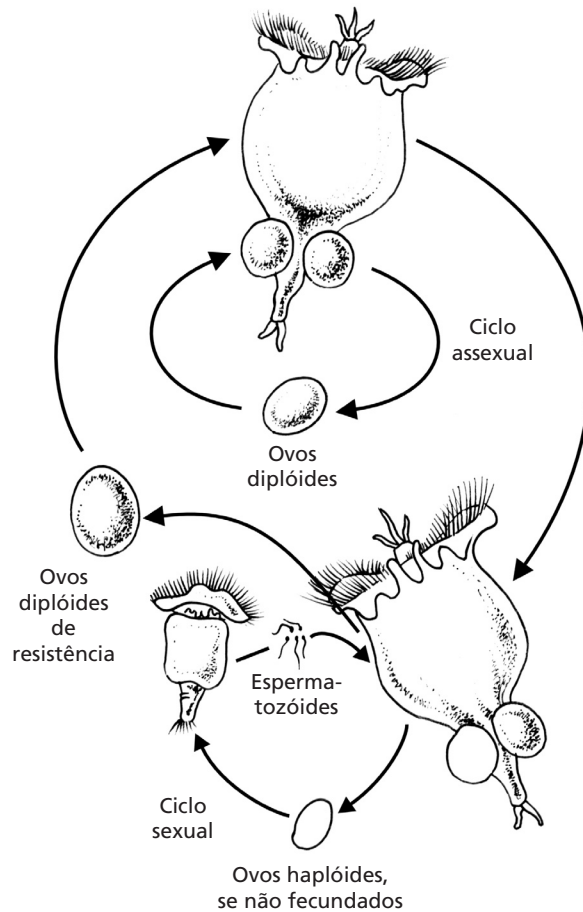


Figura 31.3.b: Reprodução assexuada por partenogênese: Rotíferos.

REPRODUÇÃO SEXUADA

A reprodução sexuada é característica de alguns grupos de protistas, indicando que seu surgimento precede a própria origem dos metazoários. O padrão geral encontrado nos metazoários é o de animal cujas células somáticas, isto é, todos os tecidos do corpo, exceto os gametas, são diplóides ($2n$). Células diplóides produzem os gametas masculinos e femininos, que são haplóides (n), através de uma divisão reducional (meiose). Desta forma, o encontro dos gametas de indivíduos diferentes leva à formação de um zigoto diplóide ($2n$) e, conseqüentemente, a um animal diplóide.

Os gametas são produzidos por tecidos germinativos que podem, em muitos casos, formar estruturas complexas denominadas **gônadas**. As gônadas masculinas são denominadas **testículos** e as femininas, **ovários**.

Os gametas produzidos por estas gônadas são geralmente diferentes (**ANISOGAMIA** ou **ETEROGAMIA**) sendo, os espermatozoides (gametas masculinos) de menor tamanho e com capacidade de natação através de flagelos e os óvulos (gametas femininos) maiores e sem capacidade de locomoção. Esse padrão geral é o mesmo, seja em animais de organização simples do corpo, como os poríferos, seja em um animal mais complexo, como um ser humano. Em alguns grupos, como nos cnidários, pode haver uma alternância de gerações: uma geração haplóide produzida assexuadamente e uma diplóide produzida sexuadamente. No entanto, o padrão de animais diplóides, com células gaméticas haplóides é o mais comumente encontrado.

ANISOGAMIA – do grego *anisio* = desigual + *gamia* = gametas em contraposição à *isogamia* (*iso* = igual).

ETEROGAMIA – do grego *hetero* = diferente + *gamia* = gametas. Os dois termos (anisogamia e eterogamia) são normalmente utilizados como sinônimos.

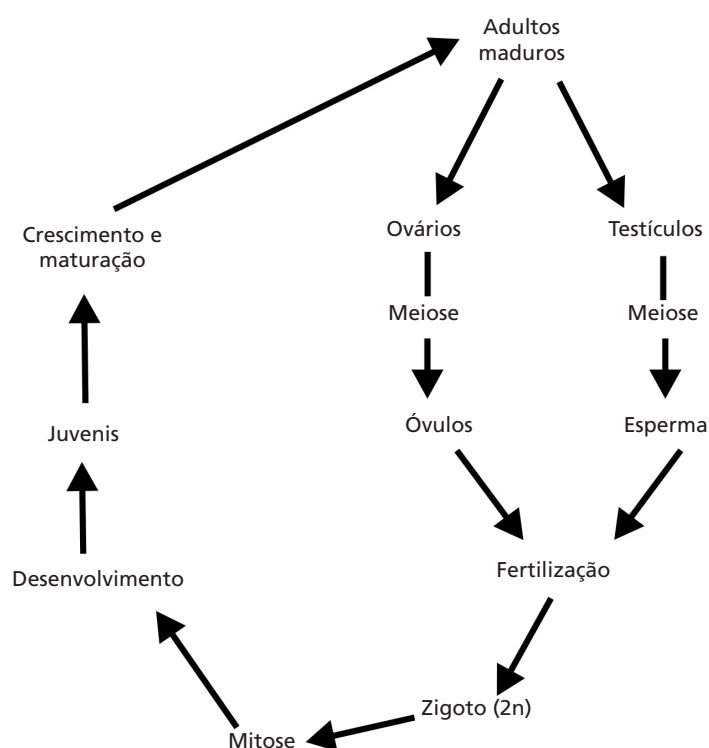


Figura 31.4: Padrão geral da reprodução de metazoários.

Os gametas produzidos pelas gônadas ou por tecido germinativo, como a parede do **CELOMA**, devem ser liberados, para que ocorra a fertilização. Essa liberação pode ocorrer por morte dos organismos paterno e materno, como acontece aos animais que morrem quando se reproduzem (**semélparos**), como é o caso de alguns moluscos, anelídeos, artrópodes

CELOMA

Ver Aula 19 do Módulo 2.

e vertebrados, Nos **itereóparos**, a liberação não necessita da morte do indivíduo parental; assim, esta pode dar-se por dutos especializados que se originam das gônadas (origem mesodérmica).

Em função do ambiente em que vive o animal, os gametas podem ser liberados diretamente no meio (gametas nus), através de cápsulas (espermatóforos), ou podem ser inoculados diretamente no outro indivíduo (a futura mãe), como ocorre nos seres humanos. Em ambientes aquáticos marinhos, onde as condições do meio são bem constantes e sua constituição química é muito semelhante à dos líquidos celulares dos gametas, a liberação no meio com **fecundação externa** é mais comum. E nos ambientes continentais, principalmente nos aéreos, onde o meio é completamente diferente do interno (líquido), é também mais usual a **fecundação interna**, com os gametas não tendo contato com o meio ambiente.

Por que reproduzir-se sexuadamente?

A reprodução sexuada envolve uma série de problemas para o organismo como, por exemplo, a necessidade de produção de gametas e a de os gametas de indivíduos diferentes se encontrarem. Entretanto, sua ocorrência em todos os grupos de metazoários indica que esta deve apresentar algumas vantagens, que no entanto, não são observáveis para os indivíduos: as vantagens da reprodução assexuada só são válidas para a espécie e, portanto, são vantagens do ponto de vista evolutivo.

Entre as principais vantagens da reprodução sexuada temos:

- **Variabilidade genética**

Na formação do zigoto, ocorre encontro de gametas de indivíduos diferentes, apresentando, portanto, material genético diferenciado com uma recombinação gênica. Com essa variabilidade genética maior, a espécie pode se adaptar a condições ambientais diversificadas, o que permite que a espécie sobreviva em ambiente que pode mudar ao longo do tempo, ou mesmo variar quanto ao espaço. Com variabilidade genética maior, a probabilidade de surgir um genoma adequado às condições diferenciadas aumenta.

- **Eliminação de genes deletérios**

Outra consequência da recombinação gênica é que genes deletérios (inviáveis) que eventualmente tenham surgido devido a mutações, durante a formação dos gametas, podem ser eliminados através do complemento gênico do outro indivíduo. Dessa forma, o animal pode manter a composição de seu genoma mais constante ao longo do tempo.

Por que a reprodução assexuada se manteve em diversos grupos animais?

Para entendermos o surgimento da reprodução assexuada em diferentes grupos animais de forma independente, veremos onde vivem estes animais. De maneira geral, a reprodução assexuada é comum em animais aquáticos, sendo que nos marinhos é mais freqüente nas formas coloniais sésseis, como corais, briozoários e ascídeas. Na água doce ela também é muito comum, principalmente em animais que habitam corpos de água temporários, como poças de água e áreas inundadas.

A ocorrência de reprodução assexuada em animais marinhos sésseis está provavelmente associada a uma estratégia de aproveitamento de um recurso escasso, no caso de um substrato adequado como uma rocha em um ambiente entremarés. A colonização inicial de um ambiente novo se dá pelo assentamento de um indivíduo novo originado por reprodução sexuada. Este indivíduo, ao se estabelecer em um ambiente novo, ainda a ser ocupado, é induzido a se reproduzir assexuadamente de forma a ocupar o ambiente novo, o mais eficientemente possível.

No caso dos ambientes aquáticos temporários, é observado que, com o surgimento de um ambiente novo, após uma chuva ou enchente, ovos produzidos sexualmente são eclodidos e os indivíduos que aí se desenvolvem encontram um ambiente novo a ser conquistado. A reprodução sexuada permite rápida colonização deste novo ambiente, pois a produção de gametas e a procura de parceiros levariam muito tempo, quando o recurso novo a ser explorado (no caso o novo ambiente) já não esteja disponível ou já tenha sido explorado por outros animais. Essa estratégia é muito comum em rotíferos, que são os primeiros colonizadores de ambientes aquáticos novos, produzindo sexualmente, ovos de resistência que apenas eclodem quando do alagamento do novo ambiente.

Portanto, a reprodução assexuada surge em diferentes grupos que apresentam como condição plesiomórfica a reprodução sexuada, como estratégia na colonização de novos ambientes.

Gonocorismo e hermafroditismo

No processo padrão de reprodução sexuada discutido anteriormente, os gametas masculinos e femininos são produzidos por indivíduos diferentes. Esses apresentam, portanto, dois sexos (sexos separados): macho e fêmea.

Entretanto, em muitos grupos animais pode acontecer que um mesmo indivíduo produza gametas masculinos e femininos, ao mesmo tempo ou em diferentes fases da vida. Esses animais são denominados **hermafroditas**, enquanto que aqueles que apresentam sexos separados (indivíduos machos ou fêmeas) são denominados **gonocoristas**. Os hermafroditas que possuem gônadas femininas e masculinas, ao mesmo tempo, são denominados **hermafroditas simultâneos**, enquanto que as formas que apresentam sexos diferentes ao longo de sua vida são denominados **hermafroditas seqüenciais**, como ocorre com as populares (e deliciosas) garoupas.

O hermafroditismo é um tipo especial de reprodução sexuada (não confundir com reprodução assexuada) que também surgiu de forma independente em diferentes grupos animais.

Os animais hermafroditas têm um custo energético muito maior que os gonocoristas, pois têm de utilizar recursos para produção tanto de gônadas masculinas quanto femininas. Seu surgimento, de forma homoplástica em diferentes grupos de animais, deve ser avaliado considerando-se seu hábito de vida.

Um dos exemplos mais notáveis é o dos moluscos e anelídeos. Esses dois grupos de animais têm como plesiomorfia o ambiente marinho, isto é, se originaram-se no ambiente marinho, onde ainda são muito comuns, enquanto que algumas formas conquistaram ambientes continentais de água doce, ou mesmo o aéreo. As formas marinhas, de ambos os grupos, são geralmente gonocoristas, enquanto que as formas continentais (água doce ou aéreas) são hermafroditas.

Uma hipótese para explicar essa convergência de hábitos reprodutivos é a de que, no ambiente continental, o encontro de parceiros é dificultado pelas baixas densidades e características do ambiente. Assim, pelo hermafroditismo, qualquer indivíduo da mesma espécie é um parceiro em potencial, enquanto que nas formas gonocoristas, apenas parte dos indivíduos da mesma espécie são parceiros compatíveis (machos ou fêmeas). Assim, o hermafroditismo, apesar do custo energético, apresenta vantagem evolutiva em ambiente diferente daquele de origem desses grupos animais.

Determinação de sexo

• Genética

É a forma mais conhecida de determinação de sexo, já que é a maneira pela qual o sexo é determinado nos seres humanos. Nesse caso, os gametas masculinos produzem complementos cromossômicos diferentes. Por exemplo, em grupos muito distintos, como seres humanos e moscas-de-fruta (*Drosophila*), podem-se formar gametas (haplóides) com um cromossomo X ou um cromossomo Y. Como todos os óvulos possuem cromossomo X, na fecundação formam-se os pares de cromossomos XX ou XY, os quais determinam o sexo feminino (XX) ou masculino (XY). Entretanto, outras formas de determinação genética ocorrem em outros grupos animais. Assim, em algumas abelhas, os gametas podem possuir um cromossomo X ou nenhum cromossomo equivalente (usualmente denominado 0). Neste caso, na fecundação pode-se formar um animal com dois cromossomos X (XX) ou apenas com um (X0), sendo, neste caso, um macho e, no anterior, uma fêmea.

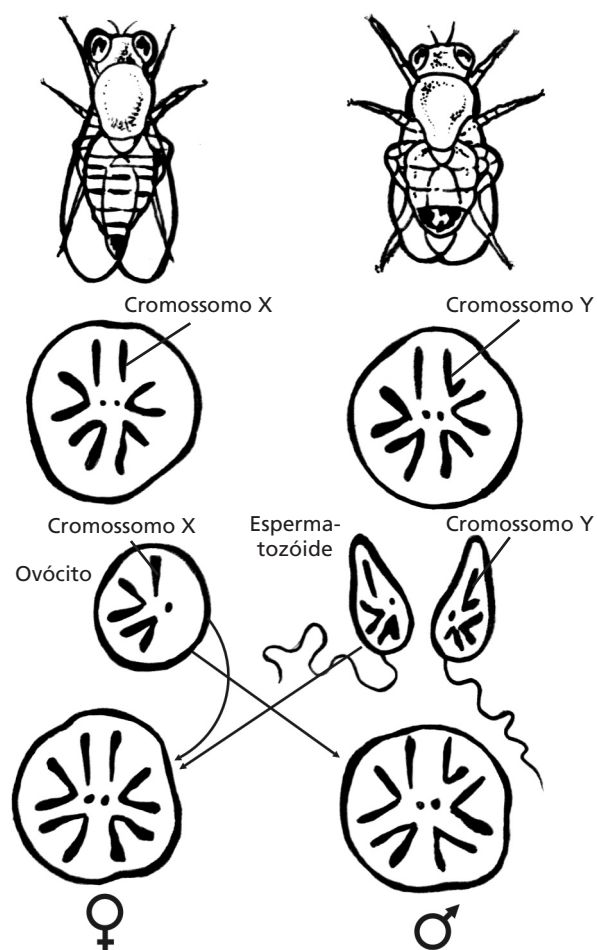


Figura 31.5: Determinação genética de sexo.

• Maternal

Na determinação maternal do sexo, os gametas masculinos e femininos são sempre iguais quanto ao número de cromossomos; entretanto, podem ser encontradas variações quanto ao tamanho dos ovócitos (gametas femininos). Ovócitos de grande tamanho originam fêmeas, enquanto ovócitos pequenos originam machos de pequeno tamanho que maturam muito cedo. Isso leva a uma diferença morfológica entre machos e fêmeas, denominada **DIMORFISMO SEXUAL**.

• Ambiental

Neste caso, como no caso anterior, gametas masculinos e femininos apresentam o mesmo complemento cromossômico. Entretanto, o zigoto formado não tem sexo definido até que entre em contato com o ambiente, o qual vai selecionar o sexo mais adequado para aquele local e momento.

Os caramujos do gênero *Crepidula*, por exemplo, não têm sexo definido, mesmo quando adultos. Estes animais têm o hábito de se amontoarem na época da reprodução. Quando indivíduos adultos se encontram, a posição de um deles, relativamente ao outro, é o que vai determinar o seu sexo; assim, o indivíduo que estiver por cima (**Figura 31.6**) produz gametas masculinos e o que estiver por baixo, femininos. Caso haja mais de dois indivíduos amontoados, aqueles que estiverem entre os demais se tornam hermafroditas e os extremos (em cima e embaixo) serão indivíduos machos ou fêmeas.

O **DIMORFISMO SEXUAL**, em que o macho se desenvolve mais cedo e é muito menor do que a fêmea e é muito comum no reino animal, mesmo em formas cuja determinação do sexo é genética ou ambiental. Nesses casos, o macho tem uma função biológica mais restrita, sendo um mero produtor de espermatozoides para a fêmea. Um bom exemplo deste fenômeno do macho anão será visto a seguir, na determinação ambiental do sexo.

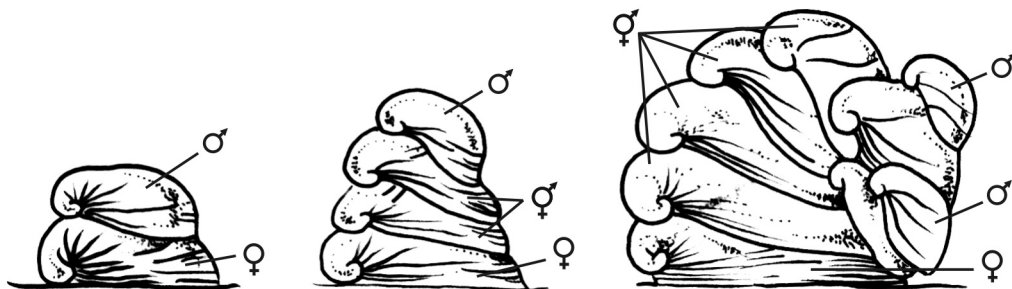


Figura 31.6: Determinação ambiental de sexo no gastrópode *Crepidula*.

Em alguns casos, o ambiente determina o sexo, quando o animal se metamorfoseia de larva para adulto. Isso ocorre no equiúro *Bonellia viridis*. O embrião, assim como a larva que se origina a partir dele, não tem sexo definido. O adulto é o animal que habita o sedimento de grandes profundidades marinhas, sendo todos fêmeas (Figura 31.7). A larva natante, quando atinge a fase em que vai se metamorfosear, isto é, vai sair da coluna d'água e atingir o sedimento (hábito de vida do adulto), pode se tornar macho ou fêmea, dependendo do ambiente. Se essa larva se **assentar** no sedimento, ela se metamorfoseará em uma fêmea, podendo atingir até 2m de comprimento. Caso a larva não se assente sobre o sedimento, mas sobre o corpo, de uma fêmea, ela será ingerida pela fêmea e se metamorfoseará em um macho-anão, que atinge um tamanho não muito maior que alguns milímetros, passando o resto da vida como “parasita” da fêmea.

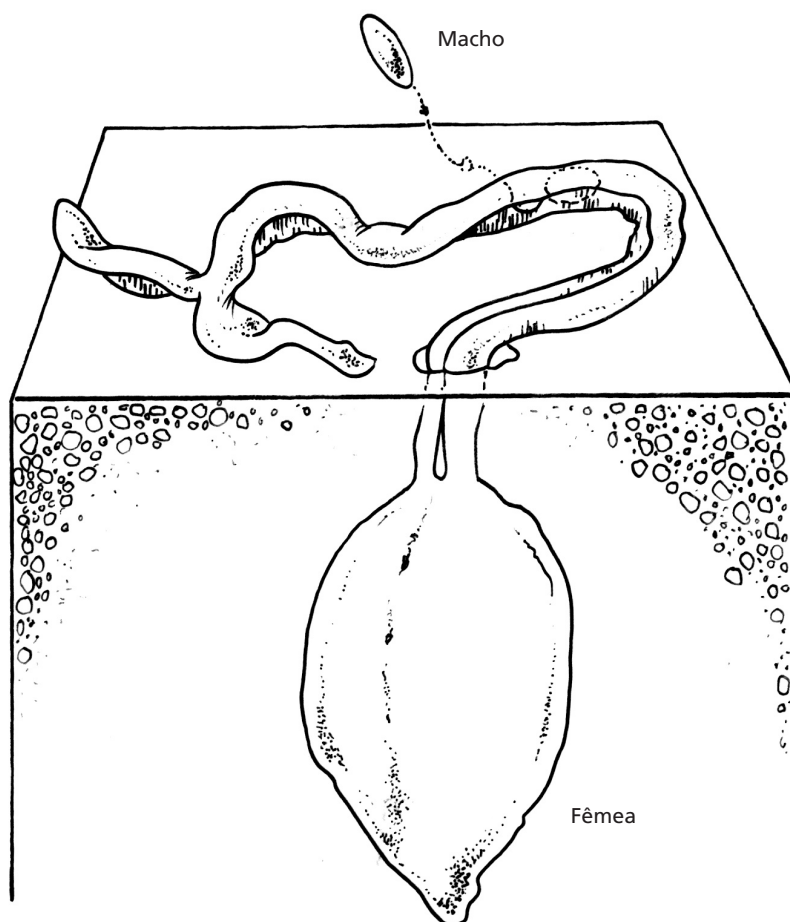


Figura 31.7: Determinação ambiental de sexo no equiúro *Bonellia*. Observe a diferença de tamanho e forma entre macho e fêmea.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Embora os animais apresentem padrão comum de reprodução, esta também está sujeita a uma série de alterações, em função das condições ambientais e populacionais. Dessa forma, homoplasias são muito comuns, como é o caso da reprodução assexuada e do hermafroditismo. Essas homoplasias ocorrem em diferentes grupos animais, cujo padrão reprodutivo plesiomórfico é a reprodução sexuada com sexos separados – condição esta já existente nos primeiros metazoários que surgiram no planeta. Os diferentes padrões de reprodução estão, portanto, muito relacionados com o ambiente onde vivem os animais, embora os mecanismos celulares envolvidos na reprodução sexual sejam praticamente os mesmos em todos os animais.

RESUMO

A capacidade de perpetuação das espécies, ao longo do tempo, é resultado do mecanismo de reprodução. Este pode ocorrer através da produção de simples réplicas ou clones de um indivíduo, como na reprodução **assexuada**, ou através da junção de material genético de dois indivíduos como na **reprodução sexuada**.

A reprodução assexuada pode se dar por **fissão** (ou **cissiparidade**), **brotamento** e **partenogênese** (com produção de ovos não fecundados). A reprodução **sexuada** se dá através da produção de gametas masculinos e femininos por animais de sexos separados, ou por aqueles que representem ambos os papéis sexuais, denominados **hermafroditas**. A reprodução sexuada está associada a uma maior variabilidade genética em ambiente variável e à eliminação de genes deletérios que possam surgir por mutação. A reprodução **assexuada** está associada a organismos sésseis ou a colonizadores de novos ambientes, sendo geralmente alternada com a reprodução **sexuada**. O **hermafroditismo** parece ser uma derivação também associada à conquista de novos ambientes, como na colonização da água doce e da terra, por moluscos e anelídeos. A determinação do sexo do animal nem sempre é **genética**, como no caso dos seres humanos; ela pode ser **maternal**, ou mesmo **ambiental**, quando o zigoto e o embrião não têm sexo definido até que encontrem outro indivíduo da mesma espécie.

EXERCÍCIO

Em alguns filmes de ficção científica que se passam no futuro aparecem seres humanos mutantes que habitam os subterrâneos da terra e que se diferenciam dos demais por serem hermafroditas. Existe alguma base adaptativa para esse exercício de imaginação?

INFORMAÇÃO SOBRE A PRÓXIMA AULA

Na próxima aula, veremos como, após a reprodução, os animais se transformam em adultos e como a mudança do ambiente do embrião para o adulto pode afetar sua morfologia ao longo da vida.

Introdução à Zoologia

Gabarito

1. Ao colocar o ímã sobre o aquário, este deve ter atraído o grão de ferro para cima, excitando as células localizadas na região superior do estatocisto. Isto deve ter levado o animal a nadar de cabeça para baixo, já que o seu gânglio cerebral estará interpretando que o centro da Terra está no topo do aquário.
2. Em animais aéreos, a fotorrecepção ou visão é muito importante, principalmente, nas formas que vivem sobre o substrato (e não enterradas). A fotorrecepção é importante devido à grande velocidade deste tipo de informação. Em ambientes aquáticos, embora a visão possa ser importante, esta se restringe às porções mais superficiais da água, principalmente no ambiente marinho. Neste caso, apesar de ser uma percepção muito lenta, a quimiorrecepção se torna mais importante, principalmente quando se considera que no meio aquático existe uma grande abundância de substâncias dissolvidas, as quais estão sendo constantemente trocadas ou absorvidas pelas células dos metazoários aquáticos.

Aula 31

O hermafroditismo pode ter surgido como adaptação reprodutiva para aumentar a chance de fecundação entre indivíduos da mesma espécie, quando existe dificuldade de encontro, devido ao ambiente em que vivem ou às baixas densidades populacionais. Nesse sentido, o exercício de imaginação tem lógica, já que seres subterrâneos provavelmente teriam grande dificuldade de encontrar parceiros em potencial; assim, qualquer indivíduo da mesma espécie seria parceiro em potencial, por ser hermafrodita.

ISBN 85-89200-81-7



9 788589 200813



UENF
Universidade Estadual
do Norte Fluminense



Universidade Federal Fluminense



Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo
à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro



SECRETARIA DE
CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Ministério
da Educação

