TEJIDO SANGUÍNEO. La sangre está constituida de diversas clases de células que, en conjunto, reciben el nombre de *células sanguíneas* y de una porción no celular en forma de un líquido acuoso llamada *plasma*, el cual contiene gran variedad de moléculas disueltas y en suspensión. La función general de sangre y *linfa* es mantener la estabilidad del medio interno

Las células de la sangre fig. 4-5 son; *a*) *glóbulos rojos*, discos bicóncavos anucleados encargados de transportar el oxígeno a diversos tipos de tejidos; *b*) *glóbulos blancos* células de forma irregular, nucleadas y móviles, de las cuales existen diferentes tipos encargadas de luchar contra las enfermedades; y *c*) las *plaquetas*, pequeños fragmentos de células especializadas de la médula ósea, que juegan un importante papel en la sangre. En algunas clasificaciones de tejidos, se considera el tejido sanguíneo como una variedad del tejido conectivo, puesto que su origen durante el desarrollo embrionario es de células semejantes a las que forman el tejido conectivo.

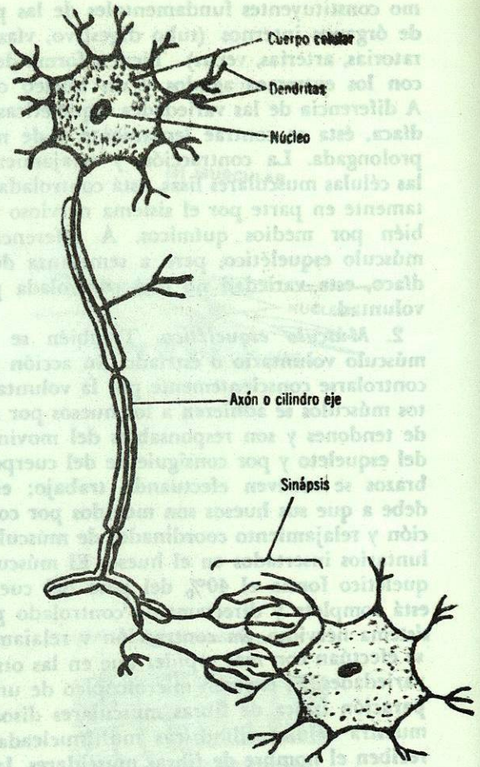


fig. 4-4 Diagrama de una neurona motora.

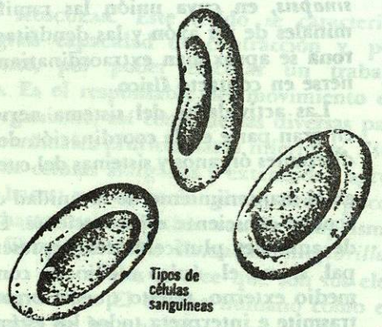
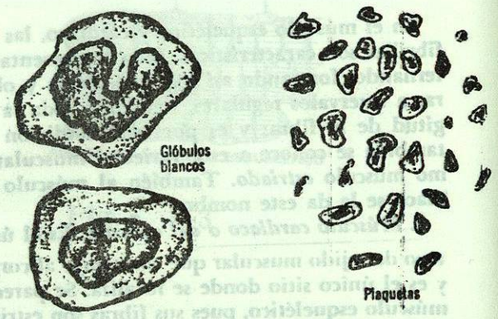


fig. 4-5 Tipos de cél·'ns sanguíneas.



Transporte y Circulación

14-1 MECANISMOS SIMPLES DE TRANSPORTE

En los protistos y en los animales de organización simple no se requiere un sistema especial de transporte. En estos organismos mediante procesos de difusión y corrientes citoplasmáticas es posible llevar a cualquier región del cuerpo cantidades adecuadas de materiales.

Las vacuolas alimenticias de la amiba (Fig. 9-11), son llevadas por la corriente citoplasmática a través de toda la célula al mismo tiempo que se lleva a cabo la digestión de los contenidos alimenticios. Las moléculas alimenticias digeridas pasan al citoplasma mediante difusión o procesos de transporte activo.

Los animales de organización simple, como la esponja o la hidra, transportan los materiales requeridos de modo similar. Por estar las células dispuestas en capas delgadas de tejido ninguna célula se encuentra demasiado lejos del ambiente. El intercambio gaseoso entre el citoplasma y el ambiente y la eliminación de los residuos metabólicos se lleva a cabo mediante difusión simple. El proceso total de digestión en las esponjas y la parte final del mismo proceso en la hidra se llevan a cabo intracelularmente. Partículas pequeñas de alimento son ingeridas mediante fagocitosis y luego se forman vacuolas alimenticias. Los productos finales de la digestión pueden pasar hacia las células adyacentes no fagocíticas mediante difusión o por transporte activo.

A fin de asegurar que todas las células fagocíticas entren en contacto con partículas alimenticias ingeribles, tanto las esponjas como la hidra poseen una especie de sistema circulatorio externo. En ambos casos las células fagocíticas poseen también flagelos que producen una corriente de agua dentro de la cavidad gastrovascular. (Ver nuevamente las figuras 5-2 y 10-3.) En cierta manera este sistema se parece al sistema circulatorio de los animales superiores. El flúido que baña las células individuales se mantiene en movimiento. Sin embargo, el paralelismo no es tan exacto, pues tanto en las esponjas como en la hidra el flúido forma parte del ambiente externo. En cambio, en los animales que poseen un sistema circulatorio, propiamente dicho, el flúido se mantiene dentro de los tejidos del cuerpo del animal y forma parte del ambiente interno.

Las planarias no poseen un sistema circulatorio, sin embargo, poseen cierta cantidad de flúido, el cual baña los órganos internos del gusano. El movimiento que se comunica al flúido proviene de los movimientos de contracción y expansión del cuerpo. Hemos visto (Sección 13-1) que la forma de la planaria hace innecesario un sistema especial de transporte de oxígeno y de bióxido de carbono. La necesidad de transportar a gran distancia los materiales alimenticios digeridos es eliminada debido a la presencia de una cavidad gastrovascular altamente ramificada. La digestión en las planarias es también intracelular, y ninguna región del cuerpo se halla ubicada a gran distancia de las células fagocíticas que tapizan la cavidad vascular, en donde se lleva a cabo la digestión.

14-2 UN SISTEMA «CERRADO»: LA LOMBRIZ DE TIERRA

La lombriz de tierra es de tamaño relativamente grande y de organización compleja. Posee un sistema circulatorio propiamente dicho, para el transporte de materiales, provisto de todas las características esenciales de un sistema circulatorio eficiente. Estas son: (1) un flúido en el cual se encuentran disueltos los materiales que deben transportarse, (2) un sistema de tubos o canales conductores por los cuales fluye el líquido, (3) una bomba que permite mantener en movimiento el fluido y (4) órganos especializados para llevar a cabo intercambios entre el flúido y el medio externo. Entre tales órganos se cuentan aquellos que contribuyen con materiales al flúido (tales como la piel y el intestino), y aquellos (tales como la piel y los órganos excretores) que sustraen materiales del flúido y los devuelven al ambiente exterior.

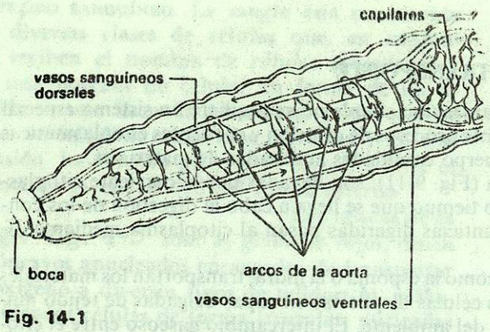


Fig. 14-1

Sistema circulatorio de una lombriz de tierra. La sangre se encuentra permanentemente confinada en el interior de los vasos sanguíneos. La contracción del vaso sanguíneo dorsal y de los cinco pares de arcos de la aorta que mantienen la sangre en movimiento.

En la lombriz de tierra el líquido que circula es la sangre; está compuesto en su mayor parte de agua en la cual se hallan disueltos gases, azúcares, aminoácidos, sales y muchas otras moléculas y iones que intervienen en el metabolismo de la lombriz de tierra. La eficiencia de la sangre de la lombriz de tierra considerada como un medio de transporte de oxígeno, está incrementada por la presencia del pigmento **hemoglobina**, capaz de portar oxígeno. Pero la hemoglobina de la lombriz de tierra no está confinada al interior de los glóbulos rojos sanguíneos, como ocurre en los humanos, sino que está disuelta en la sangre.

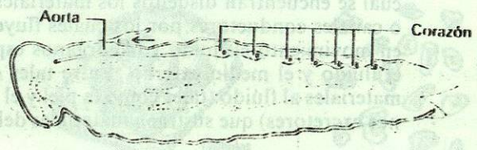
La sangre de la lombriz de tierra es conducida por un sistema de vasos sanguíneos complejo. Sin embargo, el intercambio de materiales entre la sangre y las células individuales únicamente puede llevarse a efecto en los vasos sanguíneos más delgados, denominados **capilares**. Por cuanto la sangre se halla permanentemente en el interior del sistema de vasos sanguíneos, se dice que la lombriz de tierra posee un sistema «cerrado» de circulación. La bomba que impulsa la sangre hacia los capilares consiste de cinco pares de arcos aórticos (Fig. 14-1). Las contracciones musculares de las paredes de tales arcos impelen la sangre hacia los vasos sanguíneos ventrales. Los vasos ventrales llevan la sangre hacia la parte posterior del cuerpo de la lombriz, en donde se distribuye en un sistema de vasos sanguíneos cada vez más finos. Todos estos vasos terminan en capilares y es allí donde tiene lugar el intercambio entre los órganos y la sangre, y entre ésta y los tejidos. Una vez en los capilares, la sangre es conducida a través de un segundo sistema de vasos, los cuales a la vez la conducen al vaso sanguíneo dorsal. Este se contrae rítmicamente e impulsa la sangre hacia los arcos aórticos y hacia el extremo anterior del cuerpo de la lombriz.

14-3 UN SISTEMA «ABIERTO»: EL SALTAMONTES

El sistema circulatorio de los artrópodos difiere del de los anélidos en un aspecto importante. Solamente durante una parte del circuito de recorrido la sangre está confinada dentro de los vasos sanguíneos. El resto del recorrido tiene lugar en el interior de la cavidad del cuerpo. Este tipo de sistema circulatorio se conoce con el nombre de sistema circulatorio «abierto». El volumen de sangre que se requiere para el funcionamiento del sistema es mantenido dentro de un nivel adecuado mediante la reducción considerable del tamaño de la cavidad del cuerpo. La cavidad del cuerpo, de tamaño reducido, de los artrópodos se denomina **hemocele**. La eficiencia del flujo sanguíneo y de su distribución se obtiene mediante los compartimientos del hemocele, denominados senos.

En el saltamontes la porción cerrada del sistema circulatorio se limita al corazón de forma tubular alargada y a la aorta que se extiende a lo largo del lado dorsal del insecto (Fig. 14-2).

Fig. 14-2



El sistema circulatorio del saltamontes es «abierto». La sangre se halla confinada en los vasos solamente en una porción pequeña de su recorrido circulatorio a través del cuerpo.

El corazón bombea la sangre hacia los senos del hemocele en donde tiene lugar el intercambio de materiales. Movimientos coordinados de los músculos del cuerpo lentamente hacen volver la sangre hacia el seno que rodea el corazón, el seno dorsal. Entre dos contracciones sucesivas se abren las válvulas diminutas ubicadas en la pared del corazón y permiten la entrada de la sangre al corazón proveniente del seno dorsal, con lo cual se completa el circuito.

Podría pensarse que el sistema circulatorio abierto del saltamontes resulte demasiado ineficiente comparado con el sistema cerrado de la lombriz de tierra. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que hay una diferencia considerable en las funciones que deben cumplir los dos sistemas. Recuérdese que en el saltamontes el intercambio de oxígeno y de bióxido de carbono se lleva a cabo mediante un sistema traqueal. La sangre no toma parte en este proceso. Por consiguiente, en la sangre del saltamontes no está presente un pigmento portador de oxígeno. Mediante estudios experimentales se ha podido establecer claramente que el transporte de gases es el que impone los requerimientos más exigentes al sistema circulatorio. En ciertos animales, por ejemplo, el saltamontes y otros insectos, en donde el intercambio gaseoso es completamente independiente del sistema circulatorio, los requerimientos de este último son mucho menos severos que en los animales (por ejemplo, la lombriz de tierra) en los cuales las dos funciones se combinan.

En los artrópodos acuáticos, por ejemplo, el cangrejo, el sistema circulatorio sirve también para transportar oxígeno y bióxido de carbono hacia los tejidos y desde ellos. Un pigmento portador de oxígeno (la hemocianina), que se halla disuelta en la sangre, posibilita que un volumen dado de sangre pueda portar mayor cantidad de oxígeno que la que pudiera contener una solución acuosa. Se recordará que son las branquias los órganos de intercambio gaseoso en el cangrejo. Aunque el sistema circulatorio del cangrejo es «abierto» es significativo anotar que la porción «cerrada» del sistema de vasos es mucho más extensa que en el saltamontes.

En seguida la sangre regresa al corazón. Este sistema circulatorio es «cerrado» por cuanto la sangre permanece, a través de todo el circuito, en el interior de los vasos (Fig. 14-4).

Aunque el sistema circulatorio descrito es adecuado para los peces, no es muy eficiente, en términos generales. Como ya se mencionó la presión sanguínea desciende fuertemente cuando la sangre ha flúido a través de una red de capilares. En los peces, una vez que la sangre ha flúido a través de las branquias, deja de ser impulsada vigorosamente por la pulsación del corazón.

tados por un solo vaso sanguíneo principal es considerablemente más grande que el área de la sección transversal de ese vaso sanguíneo. Esto podría compararse con lo que ocurre cuando una corriente estrechamente encajonada se extiende sobre una planicie. La fuerza y velocidad del flujo disminuye rápidamente. Lo mismo ocurre en una red de capilares. Téngase en cuenta, asimismo, que el intercambio gaseoso tiene que ocurrir en dos sitios diferentes: las branquias y los tejidos. En uno y otro sitio los intercambios ocurren exclusivamente mientras la sangre atraviesa los capilares. Por consiguiente, cuando la sangre atraviesa las branquias pierde la presión que hace posible su distribución rápida en los tejidos. Por otra parte, cuando la sangre atraviesa los capilares en los tejidos, pierde la presión que la impulsa rápidamente hacia las branquias. El sistema de dos corazones separados del calamar resuelve el problema de modo excelente.

Vale la pena agregar aquí que un sistema circulatorio cerrado con bombas separadas está presente también en las aves y en los mamíferos, sólo que las dos bombas están situadas una junto a otra. Mientras una mitad del corazón de un ave o de un mamífero impulsa la sangre hacia los pulmones, la otra mitad bombea la sangre hacia los tejidos. Pero el desarrollo evolutivo de bombas separadas en estos animales fue completamente independiente del desarrollo de las mismas en el calamar.

14-5 EL PRINCIPIO DE BOMBA SIMPLE: EL PEZ

En realidad los vertebrados primitivos poseen únicamente una bomba simple. Esta característica persiste aun en los peces recientes. La sangre procedente de las distintas regiones del cuerpo del pez penetra a una cámara de paredes delgadas, denominada aurícula. Mediante relajamiento del corazón, la sangre atraviesa una válvula y penetra en el **ventrículo**, de paredes musculares gruesas. Por medio de una contracción fuerte del ventrículo, la sangre es impulsada hacia la red de capilares de las branquias.

Allí tiene lugar el intercambio gaseoso. De las branquias la sangre pasa hacia las redes capilares numerosas del resto del cuerpo del pez. Allí tienen lugar los intercambios con los tejidos.

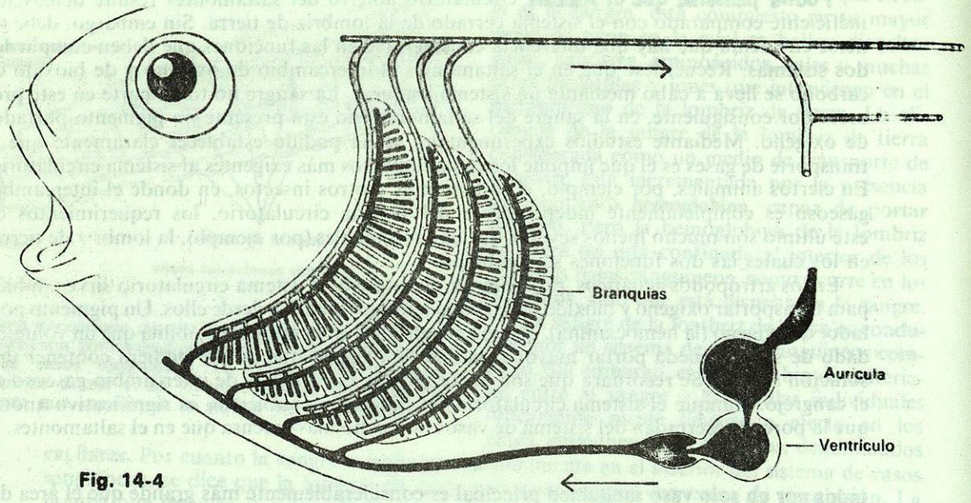


Fig. 14-4

Sistema circulatorio de un pez. La sangre pobre en oxígeno, (negro) es impelida hacia las branquias. Muy poca presión queda para llevar la sangre rica en oxígeno (incoloro) al resto del cuerpo.

14-6 EL SISTEMA DE TRES CAMARAS: LA RANA Y LA LAGARTIJA

El corazón de los anfibios representa un avance en cierta forma con respecto al de los peces. El corazón de la rana consiste en tres cámaras principales, dos aurículas y un ventrículo. La aurícula derecha recibe sangre pobre en oxígeno procedente de los vasos sanguíneos (venas) que drenan los diferentes tejidos y órganos del cuerpo de la rana. La sangre rica en oxígeno procedente de los pulmones es llevada a la aurícula izquierda. La sangre de las dos aurículas pasa hacia un solo ventrículo (Fig. 14-5). Mediante contracción del ventrículo la sangre es impulsada hacia un vaso que se divide cerca del corazón en una rama izquierda y otra derecha. Cada una de estas ramificaciones se vuelve nuevamente a ramificar en tres arterias principales. Las arterias anteriores llevan la sangre a la cabeza y al cerebro de la rana. Los arcos sistémicos, situados en medio, llevan la sangre a los tejidos y órganos interiores del resto del cuerpo. Las arterias posteriores llevan la sangre a la piel y a los pulmones.

A primera vista podría pensarse que se pierde la ventaja de llevar la sangre pobre en oxígeno a una cámara del corazón y la sangre rica en oxígeno a otra cámara, si la sangre se mezcla en un solo ventrículo. De cierta manera esto es cierto. Sin embargo, el ventrículo está dividido parcialmente en dos cámaras estrechas que tienden a disminuir la mezcla de los dos tipos de sangre. Cuando el ventrículo se contrae, la mayor parte de la sangre pobre en oxígeno es impulsada, sin que haya una mezcla cosiderable, hacia las dos arterias que conducen a la piel y a los pulmones. Allí se carga de oxígeno fresco.

La sangre rica en oxígeno, proveniente de la aurícula izquierda, es enviada a las arterias que conducen al encéfalo en forma relativamente pura. Unicamente la sangre que atraviesa los arcos sistémicos que conducen a las regiones restantes del cuerpo de la rana, se mezcla completamente, pero aun así, contiene suficiente oxígeno para abastecer las necesidades de los órganos que irriga.

Nótese que la dificultad ocasionada por el descenso de la presión en los capilares se contrarresta en el sistema circulatorio de la rana. Tanto los órganos de intercambio gaseoso como los tejidos interiores del cuerpo reciben sangre, a presión normal, debido a la contracción del ventrículo.

Los reptiles presentan además otra modificación del corazón. En la lagartija un **tabique** muscular divide parcialmente el ventrículo (Fig. 14-5). Cuando el ventrículo se contrae, una abertura presente en el tabique se cierra y el ventrículo momentáneamente se divide en dos cámaras completamente separadas. Esto impide la mezcla de los dos tipos de sangre. La mitad izquierda del ventrículo bombea sangre rica en oxígeno (proveniente de la aurícula izquierda) hacia el cuerpo. La mitad derecha del ventrículo impulsa la sangre pobre en oxígeno (proveniente de la aurícula derecha) hacia los pulmones.

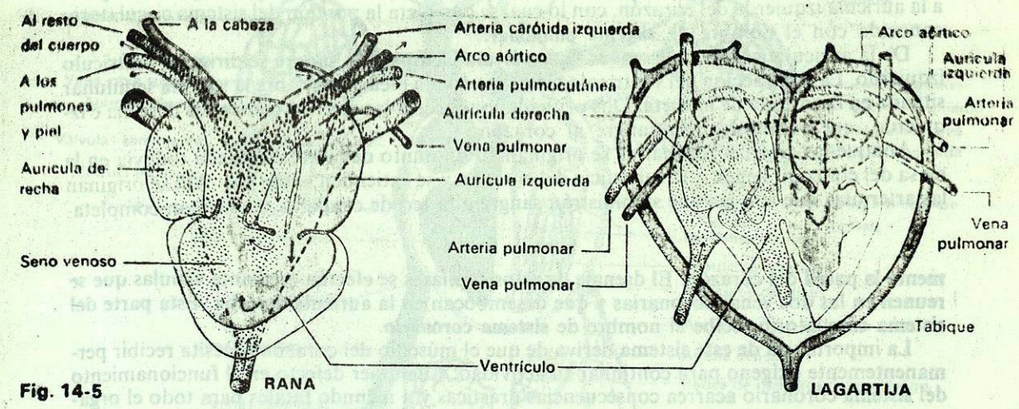


Fig. 14-5

Comparación entre el corazón de un anfibio (izquierda) y el corazón de un reptil (derecha). En el corazón de los reptiles la sangre pobre en oxígeno (punteada) no se mezcla con la sangre rica en oxígeno (gris).

14-7 EL SISTEMA DE CUATRO CAMARAS: AVES Y MAMIFEROS

En el corazón de las aves y los mamíferos el tabique es completo. Esto produce la formación de dos bombas completamente separadas. La aurícula derecha recibe sangre pobre en oxígeno (desoxigenada) proveniente del cuerpo. El ventrículo derecho impele esta sangre hacia los pulmones en donde se libera el bióxido de carbono y la sangre se carga de oxígeno puro. La sangre oxigenada regresa a la aurícula izquierda, sigue hacia el ventrículo izquierdo y desde allí es bombeada hacia todos los órganos y tejidos del cuerpo. Probablemente no sea coincidencia que los únicos grupos de animales de sangre caliente (homeotérmicos) sean las aves y los mamíferos provistos de dos sistemas circulatorios separados. Uno de estos sistemas está encargado del intercambio gaseoso con el ambiente, el otro sirve para el intercambio gaseoso con los tejidos. La eficiencia de estos dos sistemas circulatorios separados asegura una rata elevada de respiración celular, de la cual, a la vez, depende su condición homeotérmica.

EL SISTEMA CIRCULATORIO EN EL HOMBRE

14-8 EL CORAZON

El corazón está situado aproximadamente en el centro de la cavidad torácica. Está rodeado por una membrana protectora, el **pericardio** (Fig. 14-6). La sangre desoxigenada proveniente del cuerpo penetra en la aurícula derecha. Cuando la aurícula se contrae la sangre es impulsada a través de la **válvula tricúspide** y pasa al ventrículo derecho. El nombre tricúspide tiene relación con los tres pliegues de tejido que cierran el orificio que comunica la aurícula derecha y el ventrículo derecho. El cierre de estos pliegues o cúspides se regula por medio de franjas de tejido conjuntivo, los tendones papilares. Estos a su vez son activados por los músculos papilares situados en la pared del ventrículo. Cuando los músculos papilares se contraen, la válvula tricúspide se abre y la sangre pasa de la aurícula al ventrículo; la contracción del ventrículo cierra entonces la válvula tricúspide, simultáneamente, pero la **válvula semilunar** se abre. Esta válvula está situada en el orificio de entrada de la **arteria pulmonar.** La sangre penetra en la arteria pulmonar, la cual cerca del corazón se divide en una rama derecha y otra izquierda que conducen al pulmón derecho e izquierdo respectivamente. Estas arterias una vez en los pulmones se ramifican y vuelven a ramificarse para formar **arteriolas.** Las arte-