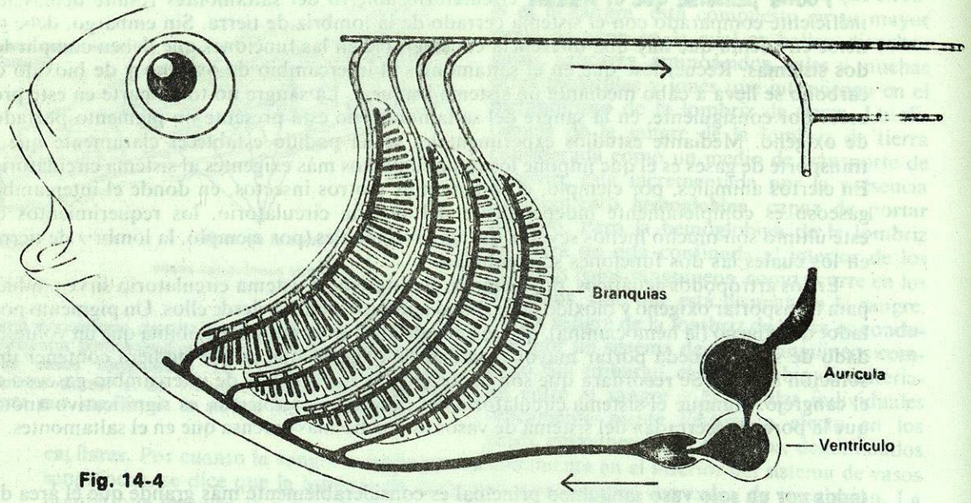

Fig. 14-4

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.

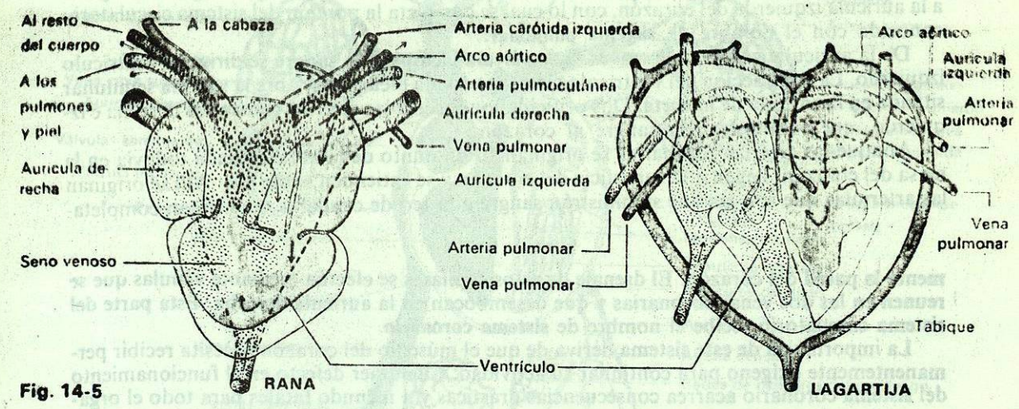

Fig. 14-5

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-

riolas llevan la sangre a las redes capilares de los pulmones. Allí la sangre se deshace del bióxido de carbono y se carga de oxígeno fresco. Las redes de capilares de los pulmones son drenados mediante vasos denominados **vénulas.** Estas a la vez son tributarias de las **venas pulmonares.** Mediante cuatro venas pulmonares (dos de cada pulmón) la sangre oxigenada regresa a la aurícula izquierda del corazón, con lo cual se completa la porción del sistema circulatorio conocida con el nombre de **sistema pulmonar.**

De la aurícula izquierda, a través de la **válvula bicúspide,** la sangre se dirige al ventrículo izquierdo. La contracción del ventrículo cierra la válvula bicúspide y abre la válvula semilunar situada en la entrada de la **aorta.** Dos orificios conducen a las **arterias coronarias** derecha e izquierda, que suministran la sangre al corazón.

Aunque las arterias coronarias se originan en un punto de la aorta situada todavía en la masa del corazón, llegan a la superficie del corazón y se extienden sobre ella. Allí se originan las arteriolas que son las que suministran sangre a la red de capilares que irrigan completamente la pared del corazón. El drenaje de estos capilares se efectúa mediante vénulas que se reunen en las dos venas coronarias y que desembocan en la aurícula derecha. Esta parte del sistema circulatorio recibe el nombre de **sistema coronario.**

La importancia de este sistema deriva de que el músculo del corazón necesita recibir permanentemente oxígeno para continuar su actividad. Cualquier defecto en el funcionamiento del sistema coronario acarrea consecuencias drásticas y a menudo fatales para todo el organismo. Desafortunadamente el sistema cororario es particularmente susceptible de sufrir desperfectos en su funcionamiento. Las arterias coronarias se originan en el punto de mayor presión sanguínea del sistema circulatorio. La alta presión a la cual están sometidas frecuentemente produce desgastes prematuros de las paredes. El desgaste puede manifestarse en una pérdida de elasticidad de las paredes arteriales, lo cual reduce la cantidad de sangre que fluye a través de las arterias coronarias, disminuyendo así la cantidad de oxígeno suministrada al corazón. A menudo se acumulan depósitos de grasas en el interior de la pared de las arterias coronarias que estrechan su diámetro y disminuyen la cantidad de sangre que por ellas puede fluir. En cualquiera de estos casos el oxígeno suministrado al corazón puede resultar inadecuado, sobre todo si el organismo está sometido a esfuerzos. Cuando esto ocurre se presentan los fuertes dolores sintomáticos de la **angina de pecho.**

Los depósitos de grasa en el interior de las arterias coronarias o de las arterias menores pueden también tener por consecuencia la formación de coágulos de sangre. Estas masas sólidas impiden el flujo de la sangre a través del vaso y de la red de capilares. Esto se conoce con el nombre de **oclusión coronaria,** o ataque cardíaco. La región del corazón cuyo suministro de oxígeno se ha suspendido fallece rápidamente debido a la falta de oxígeno. Si el área afectada no es demasiado grande, las regiones restantes del corazón pueden a veces compensar el daño ocasionado; pero, con mucha frecuencia, el área afectada del corazón es tan grande que el corazón deja de funcionar y se produce la muerte. Más del 25 por 100 de los casos de defunción de norteamericanos adultos de sexo masculino se deben a oclusión coronaria.

14-9 LOS VASOS SANGUINEOS SISTEMICOS

El resto del sistema circulatorio del hombre se denomina sistema circulatorio sistémico o corporal. La Fig. 14-7 muestra las ramificaciones principales de este sistema. La sangre de la aorta pasa a diferentes arterias principales, las cuales bañan todas las partes del cuerpo. La sangre se mueve por medio de la presión ejercida por la contracción del ventrículo izquierdo. La oleada de sangre que se produce cada vez que se contrae el ventrículo izquierdo se transmite a través de las paredes musculares elásticas de todo el sistema arterial. Esto se pone en evidencia en el **pulso.** Aun en los períodos de relajamiento del corazón (diástole) subsiste cierta presión en el sistema arterial. Cuando el corazón se contrae (sístole) la presión aumenta.

La medición de la presión sanguínea es una comprobación clínica frecuente. Esta medida se expresa siempre en forma fraccionaria, por ejemplo, 120/80. El numerador de la fracción representa la presión de la sangre arterial durante la sístole. La unidad de medida son milímetros de mercurio; en el ejemplo anterior, la presión medida sería equivalente a la producida por una columna de mercurio de 120 mm de altura. El denominador indica la presión durante la diástole. Aunque la presión arterial de un individuo dado varía considerablemente en diferentes momentos, una presión sanguínea alta puede ser el síntoma de la causa de numerosas dolencias.

Cuando una arteria se rompe, la sangre fluye hacia el exterior a borbotones debido a la presión ejercida por el ventrículo izquierdo. Puede producirse una hemorragia severa. Afortunadamente las arterias yacen en regiones más profundas del cuerpo, con respecto a las venas; por lo tanto, es menos probable que sufran deterioros. Sin embargo, si llegase a ocurrir hemorragia arterial es importante ejercer presión cerca del sitio donde se ha producido la ruptura, pero del lado del corazón.

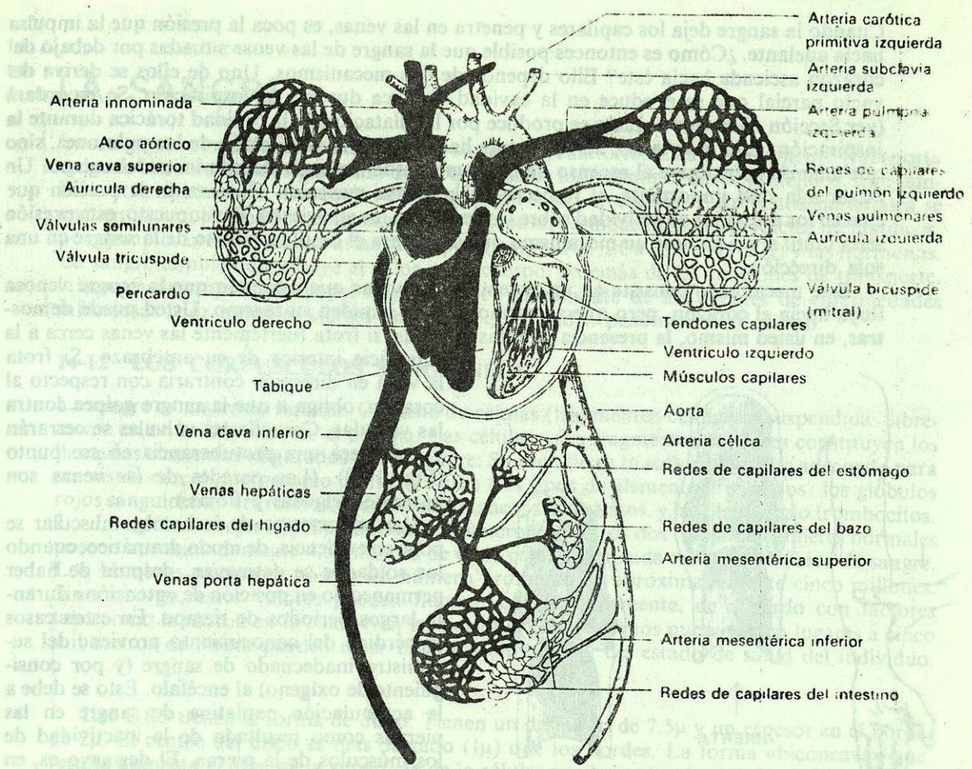

Fig. 14-6

El corazón humano y el esquema del recorrido de la sangre a través de los pulmones y de las vísceras. La sangre oxigenada se representa mediante la sección incolora. La sangre desoxigenada se representa en negro.

14-10 LOS CAPILARES

Como se dijo anteriormente, la presión de la sangre arterial se disipa en gran medida cuando la sangre penetra en los capilares. Los capilares son vasos diminutos cuyo diámetro no es superior al de un glóbulo rojo (8μ) aproximadamente. Por tanto, estos corpúsculos atraviesan el capilar en una sola fila (Fig. 14-13). Pero aunque el diámetro de un solo capilar es bastante pequeño, el número de capilares que se derivan de una sola arteriola es tan elevado que se produce un incremento del área de la sección transversal total disponible para el flujo de la sangre. Se ha estimado que existen 96.000 km de capilares en un humano adulto.

Las paredes de los capilares consisten de una sola capa de células epiteliales. A través de estas paredes tiene lugar el intercambio entre la sangre y los tejidos. Si bien las redes de los capilares no son tan conspicuas como el corazón y los vasos principales, son ellas las que efectúan las funciones de intercambio del sistema circulatorio. En sentido estricto el corazón y los vasos sanguíneos principales son las partes accesorias del sistema circulatorio y no las principales como podría pensarse. Su función consiste simplemente en el suministro de sangre y en el transporte de la sangre de la vasta red de capilares.

Se ha calculado que el área de la superficie disponible para intercambios en las redes de capilares es equivalente, aproximadamente, a 0,40 hectáreas (4.007 m^2). Aparte de la longitud y área impresionantes, las redes de capilares del cuerpo humano tienen también un volumen considerable. En realidad, su volumen total es mayor que el volumen de la sangre (cinco litros). Esto significa que no todos las redes de capilares pueden funcionar simultáneamente y permanecer abiertas. Como habremos de verlo, en el organismo sano operan varios mecanismos que determinan qué redes (en un determinado momento), pueden estar abiertas y cuáles pueden estar cerradas.

14-11 RETORNO DE LA SANGRE AL CORAZON

Cuando la sangre deja los capilares y penetra en las venas, es poca la presión que la impulsa hacia adelante. ¿Cómo es entonces posible que la sangre de las venas situadas por debajo del corazón ascienda hacia éste? Ello depende de dos mecanismos. Uno de ellos se deriva del vacío parcial que se produce en la cavidad torácica durante la inspiración. Se recordará (ver Sección 13-8) que el vacío se produce por la dilatación de la cavidad torácica durante la inspiración. Esta, por tanto, no solamente hace posible la ventilación de los pulmones, sino que además contribuye al ascenso de la sangre desde las regiones inferiores del cuerpo. Un factor aún más importante, al respecto, es la **bomba muscular**. Consiste en la presión que ejercen los músculos en actividad sobre las venas que los atraviesan. Por supuesto, esta presión sería inútil si no hubiese un mecanismo que asegurara el desplazamiento de la sangre en una sola dirección.

Este mecanismo consiste en un sistema de válvulas que permiten que la sangre venosa fluya hacia el corazón, pero que al mismo tiempo impiden su regreso. Usted puede demostrar, en usted mismo, la presencia de estas válvulas, si frota fuertemente las venas cerca a la superficie interior de su antebrazo. Si frota la vena en dirección contraria con respecto al corazón, obliga a que la sangre golpee contra las válvulas. Con ello las válvulas se cerrarán y aparecerá una protuberancia en ese punto (Fig. 14-8). (Las paredes de las venas son bastante delgadas y flojas.)

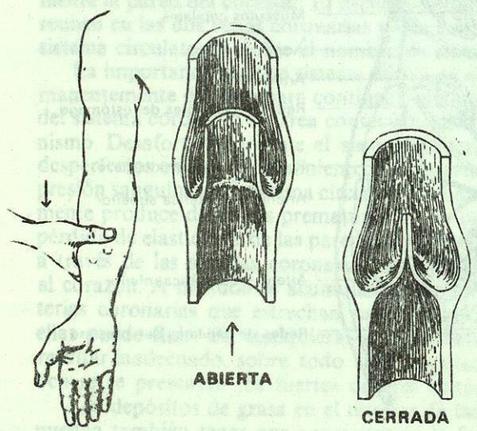

Fig. 14-8

Demostración de la presencia de válvulas en las venas de los brazos. Si se obliga a la sangre a regresar hacia una válvula cerrada, se produce una protuberancia en la vena, en el sitio junto a la válvula.

La importancia de la bomba muscular se pone en evidencia, de modo dramático, cuando los soldados se desmayan, después de haber permanecido en posición de «atención» durante largos períodos de tiempo. En estos casos la pérdida del conocimiento proviene del suministro inadecuado de sangre (y por consiguiente de oxígeno) al encéfalo. Esto se debe a la acumulación paulatina de sangre en las piernas como resultado de la inactividad de los músculos de la pierna. El desmayo es, en cierta forma, un excelente mecanismo de autoprotección en estos casos. Al pasar el cuerpo de la posición vertical a la posición horizontal, el corazón se sitúa al mismo nivel de las piernas, con lo cual la sangre de las piernas ya no necesita recorrer varios pies en contra de la gravedad; de esta manera pronto se restablece la circulación normal. El desmayo es más frecuente en los reclutas que entre los soldados veteranos. Estos últimos saben que flexionando ligeramente las rodillas y moviendo disimuladamente los músculos de la pantorrilla se evita el desmayo. Estas acciones ayudan a mantener el flujo de la sangre venosa en dirección ascendente.

El desarrollo de los aviones de alta velocidad (incluyendo cápsulas espaciales) ha creado un sinnúmero de problemas de fisiología humana a las cuales se exponen los tripulantes. Uno de éstos es la fuerza de gravedad (o «G») que se produce al elevarse de un vacío o en el momento de abandonar o de reincorporarse a la atmósfera terrestre. Estas fuerzas gravitacionales pueden impedir el regreso de la sangre de las partes inferiores del cuerpo al corazón y producir desmayo o «vértigo» en un momento crucial. Este problema ha podido ser resuelto mediante la confección de trajes de antigravedad. Las paredes de estos trajes se inflan con aire comprimido cuando comienza a aumentar la fuerza de gravedad. La presión que se ejerce sobre el cuerpo (y por consiguiente en las venas, las cuales por lo general están situadas cerca a la superficie) obliga el regreso de la sangre al corazón en contra de las fuerzas «G».

Debido a la escasa magnitud de las fuerzas que intervienen en el retorno de la sangre por las venas, el flujo es bastante uniforme. La sangre fluye en las venas en forma de una corriente continua y suave. Por esta razón y debido a que las venas yacen cerca a la superficie, es relativamente fácil controlar una hemorragia. Ello, sin embargo, debe hacerse mediante aplicación de presión al otro lado del corte y no en el lado más cercano al corazón.

Es un error muy frecuente pensar que las arterias son los vasos sanguíneos que llevan sangre oxigenada (rojo brillante) y que las venas son los vasos que portan sangre desoxigenada (rojo oscuro). Si bien este es el caso más frecuente en los humanos, hay una excepción sorprendente. ¿Podría usted pensar de qué se trata? Las arterias, por consiguiente, deben ser definidas como aquellos vasos que portan sangre del corazón hacia afuera. Las venas son aquellos vasos que portan sangre hacia el corazón.

LA SANGRE

La sangre es el medio de transporte del sistema circulatorio. Esta no solamente transporta oxígeno hacia los tejidos y bióxido de carbono hacia los pulmones desde los tejidos, sino también otros materiales, los cuales distribuye por todo el cuerpo. Entre estos materiales se encuentran moléculas alimenticias solubles (glucosa, aminoácidos), desperdicios metabólicos, por ejemplo, urea, iones de varias sales (por ejemplo Na^+, Ca^{++}, Cl^-, HCO_3^-) y las hormonas. La sangre también distribuye el calor en el cuerpo. Además de las funciones de transporte, la sangre desempeña un papel importante en el combate de los agentes de enfermedades infecciosas (por ejemplo, ciertos bacterios) que pueden penetrar en el cuerpo.

14-12 LOS CORPUSCULOS SANGUINEOS

La sangre es un tejido líquido. Consiste de células (fragmentos celulares) suspendidas libremente en un medio acuoso, el plasma. Las células y los fragmentos celulares constituyen los llamados elementos «figurados» de la sangre. Su tamaño es lo suficientemente adecuado para ser vistos con el microscopio de luz. Existen tres tipos de elementos figurados: los glóbulos rojos sanguíneos o eritrocitos, los glóbulos blancos o leucocitos, y las plaquetas o trombocitos.

1. Los **glóbulos rojos** (GRS). Superan en número a los otros dos tipos. Las mujeres normales poseen aproximadamente 4,5 millones de estas células por cada milímetro cúbico de sangre. Los hombres normales poseen un número promedio de aproximadamente cinco millones. Sin embargo, estos valores pueden fluctuar considerablemente, de acuerdo con factores tales como la altitud en la cual viven las personas (los peruanos que viven en lugares a cinco mil metros de altura pueden tener unos 8,3 millones) y del estado de salud del individuo.

Los GRS tienen la forma de disco. Tienen un diámetro de 7,5μ y un espesor en el borde de 2μ. El centro del disco es más delgado (1μ) que los bordes. La forma «bicóncava» que resulta aumenta el área de la superficie de la célula, con la cual se hace más rápido el intercambio de gases entre el GRS y el plasma.

En los adultos los GRS se producen en células especiales (Fig. 14-9) localizadas en la médula de los huesos, particularmente de las costillas, del esternón y de las vértebras. Al principio los GRS poseen un núcleo y pocas cantidades de hemoglobina. Sin embargo, a medida que maduran, la cantidad de hemoglobina presente en la célula aumenta hasta que se alcanza la cifra de 280 millones de moléculas, lo cual representa el 90 por 100 del peso seco de las células. Al final de este proceso de síntesis de hemoglobina el núcleo abandona la célula. Probablemente la ausencia de núcleo determina un límite definido en la vida de estas células. La vida de los GRS dura aproximadamente 120 días.

La muerte de un GRS ocurre cuando la membrana celular se rompe en el momento de escurrirse a través de un capilar. Los fragmentos de la célula rota son ingeridos por células fagocíticas presentes en el hígado en una estructura en forma de saco denominada bazo. La mayor parte del hierro presente en las moléculas de hemoglobina es recuperada; el resto de la molécula se descompone. Algunos de los productos resultantes —los pigmentos biliares— son secretados por el hígado junto con la bilis. Se ha calculado que cada segundo mueren de uno a dos millones de GRS, los cuales son transformados por el hígado y el bazo.

La pérdida continua de GRS normalmente es compensada mediante la acción de la médula de los huesos; en efecto, la médula de los huesos puede producir, si es necesario, glóbulos rojos a una rata cuatro veces, o más, mayor que la rata de destrucción normal. Por ejemplo, después de una hemorragia fuerte (o después de una donación de sangre) la médula de los huesos rápidamente restituye el contenido normal de glóbulos rojos en la sangre.

Bajo ciertas circunstancias la rata de pérdida de GRS es mayor que la rata de formación de GRS. Cuando esto ocurre la concentración de GRS en la sangre disminuye y se dice que ese individuo sufre de **anemia**. Por lo general, las distintas formas de anemia responden satisfactoriamente a tratamiento médico.

2. Los **glóbulos blancos** (GBS) son menos numerosos que los glóbulos rojos. La proporción numérica entre estos dos tipos es aproximadamente de 1 : 700. Existen cinco tipos diferentes