Las dos funciones principales de la sangre son: (1) transporta materiales hacia y desde los tejidos del cuerpo, y (2) defiende el organismo contra las enfermedades infecciosas. La segunda de estas funciones se mencionó cuando se discutió sobre los glóbulos blancos de la sangre y habrá de considerarse nuevamente en el Capítulo 36; ahora trataremos lo concerniente a la primera función. Como ya se mencionó, gracias al gran poder solvente del agua del plasma, la sangre es un medio efectivo de transporte. La glucosa, los aminoácidos, los ácidos grasos de cadena corta, el glicerol, las vitaminas, las hormonas, los desperdicios nitrogenados (ejemplo, urea) y otros muchos iones son transportados disueltos en el plasma sanguíneo. El transporte de gases no puede ser ejecutado únicamente por el plasma. Corresponde a los glóbulos rojos llevar a cabo el transporte del mayor volumen de oxígeno y de bióxido de carbono.

14-14 TRANSPORTE DE OXIGENO

Un 90 por 100 del peso seco de un glóbulo rojo corresponde al pigmento rojo **hemoglobina**. La hemoglobina (Hb) es una proteína que consiste de cuatro cadenas de polipéptidos, a cada una de las cuales está adherido el grupo prostético hematina (Fig. 11-7). En el centro de cada molécula de hematina se halla un átomo de hierro.

La hemoglobina y el oxígeno se combinan fácilmente; una molécula de oxígeno se combina con un grupo hematina. De esta manera, la presencia de Hb en la corriente sanguínea aumenta considerablemente la cantidad de oxígeno que puede ser transportada por la sangre. Sin embargo, la afinidad de la hemoglobina por el oxígeno es solamente uno de los factores implicados en el transporte del oxígeno. Muchas otras sustancias se combinan fácilmente con el oxígeno. Pero lo que hace de la hemoglobina una sustancia adecuada para el transporte de oxígeno es la capacidad de la hemoglobina de liberar nuevamente el oxígeno a los tejidos. En otras palabras, la reacción entre la hemoglobina y el oxígeno es espontáneamente reversible (Fig. 14-11). Bajo las condiciones de temperatura, pH, y presión incrementada de oxígeno presentes en los capilares de los pulmones, la reacción se efectúa hacia la dereoha. De esta manera la hemoglobina, de color violeta rojizo de la sangre venosa, se convierte en la oxihemoglobina, de color rojo brillante de la sangre arterial. Bajo las condiciones de temperatura, pH y presión reducida de oxígeno presentes en los capilares de los tejidos, se lleva a cabo la reacción inversa en los tejidos. 100 ml de sangre arterial llevan aproximadamente 20 ml de oxígeno (de éstas únicamente 0,3 ml son transportadas disueltas en el plasma; el remanente es transportado completamente en los GRS). En el hombre en estado de reposo solamente un cuarto aproximadamente de esta cantidad de oxígeno (5,3 ml) es liberado hacia los tejidos. Alrededor de 5.000 ml de sangre son bombeadas cada minuto por un humano en estado de reposo y, por consiguiente, son transportadas 275 ml de oxígeno de los pulmones hacia los tejidos en esa unidad de tiempo.

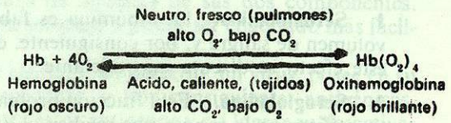

Fig. 14-11

Reacción reversible entre el oxígeno y la hemoglobina.

Durante los períodos de ejercicio intenso, 3/4 de la oxihemoglobina presente en los tejidos entrega su oxígeno. Además el corazón de un atleta, debidamente entrenado, puede bombear de siete a ocho veces más sangre durante un período de ejercicio que durante un período de reposo. De esta manera la cantidad de oxígeno entregada a los tejidos puede incrementarse a 5.775 ml por minuto o veinte veces la cantidad entregada a los tejidos durante el período de reposo.

Este rendimiento sería imposible sin la presencia de los glóbulos rojos. Cien ml de plasma pueden portar solamente 0,3 ml de oxígeno. Aproximadamente 0,18 ml de este oxígeno disuelto es liberado en los tejidos. Mediante un cálculo sencillo se puede demostrar que un humano que dependa solamente del plasma en cuanto al transporte de oxígeno, tendría que bombear treinta veces oxígeno, cada minuto, aun en estado de reposo, para satisfacer los requerimientos de los tejidos.

El envenenamiento con monóxido de carbono ilustra dramáticamente la importancia del enlace suelto y reversible entre la hemoglobina y el oxígeno. El monóxido de carbono, como el oxígeno, se combina espontáneamente con la hemoglobina, pero simultáneamente impide que la hemoglobina se combine con el oxígeno. Sin embargo, la hemoglobina no libera fácilmente el monóxido de carbono. De suerte que un individuo expuesto a los gases de monóxido de carbono (por ejemplo, en un garaje cerrado y con el motor de un automóvil encendido) pronto su hemoglobina se tornará inactiva para el transporte de oxígeno. La hemoglobina se combina con el monóxido de carbono 230 veces más fácilmente que con el oxígeno. Por consiguiente, en una atmósfera que contenga oxígeno y monóxido de carbono en una proporción 1/230, el monóxido de carbono competirá en iguales condiciones con el oxígeno. La mitad de la hemoglobina presente en la corriente sanguínea se inactivará para el transporte de oxígeno. La piel de una víctima de envenenamiento con monóxido de carbono, se torna de color rojo cereza, debido a que éste es precisamente el color que adopta la hemoglobina cuando se combina con el monóxido de carbono. Si se aleja la víctima del aire contaminado y se le aplica oxígeno puede salvársele la vida.

14-15 TRANSPORTE DEL BIOXIDO DE CARBONO

El bióxido de carbono es mucho más soluble en el agua que el oxígeno. Una de las razones para que esto ocurra es que el bióxido de carbono se combina químicamente con el agua y forma ácido carbónico.

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$$

Este se disocia en iones de hidrógeno (H^+) y en un ion bicarbonato

$$H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-$$

Si el bióxido de carbono que circula en nuestra sangre fuese transportado simplemente disuelto en el plasma en esta forma, el pH de la sangre descendería de su nivel normal, pH 7,41 a pH 4,5, lo cual implicaría la muerte instantánea del organismo. Pero sucede que solamente de 5 a 10 por 100 del bióxido de carbono producido en los tejidos es transportado de esta misma manera. Los glóbulos rojos llevan a cabo el transporte de la cantidad restante. Del 40 al 45 por 100 del bióxido de carbono se combina con la hemoglobina de los glóbulos rojos, con la cual forma carbominohemoglobina. Probablemente la molécula de bióxido de carbono no se una a la hemoglobina en el mismo punto en el que ésta se une a la molécula de oxígeno: lo cierto es que cuando la molécula de hemoglobina desprende oxígeno se incrementa en alguna manera su capacidad de transportar bióxido de carbono. Lo mismo ocurre en los pulmones, en donde el enlace del oxígeno con la hemoglobina promueve el desprendimiento de bióxido de carbono, a partir de la misma hemoglobina.

Los glóbulos rojos contribuyen al transporte del bióxido de carbono también de otra manera. Cuando el bióxido de carbono penetra en los glóbulos rojos, parte de éste se combina con el agua presente en el interior de las células, con lo cual se forma ácido carbónico. Esta reacción es acelerada fuertemente por una enzima, la anhidrasa carbónica, que se halla dentro de los glóbulos rojos (afortunadamente este enzima no está presente en el plasma de modo que, como ya lo hemos visto, el plasma no lleva mayores cantidades de ácido carbónico). Los iones de hidrógeno liberados por el ácido carbónico se combinan con la porción proteica de la hemoglobina. De este modo los iones de hidrógeno no producen un descenso del pH. La mayor parte de los iones bicarbonato remanentes se difunden hacia el plasma. Cuando los GRS llegan a los pulmones se operan estas mismas reacciones en el sentido inverso, por lo cual el bióxido de carbono se desprende hacia el aire contenido en los alvéolos. El 50 por 100 del bióxido de carbono de la sangre es transportado de esta manera. Gracias a estos dos importantes mecanismos de transporte, los glóbulos rojos sanguíneos están en capacidad de transportar el bióxido de carbono en forma rápida y segura de los tejidos a los pulmones.

14-17 EL SISTEMA LINFATICO

De uno a dos tercios del plasma que penetra a un capilar pasa al espacio tisular. La mayor parte del plasma regresa al capilar por su extremo venoso, pero una parte no retorna.

La pequeña cantidad de linfa que permanece fuera del capilar, es particularmente rica en seroglobulinas filtradas a través de las paredes del capilar, durante el proceso de formación de la linfa. Estas proteínas no regresan por difusión al capilar. Afortunadamente, la sangre no se deshace de este flúido y de estas proteínas por mucho tiempo. Los excesos de linfa en los espacios tisulares son recogidos por vasos diminutos, denominados capilares linfáticos. Estos están provistos de numerosos poros y fácilmente recogen las proteínas presentes en la linfa (en el Capítulo 10 se estudiaron los capilares linfáticos presentes en las vellosidades del intestino, los lacteales). Los capilares linfáticos conducen hacia vasos aún más grandes, los cuales forman el sistema linfático. El flujo de la linfa a través de los vasos del sistema linfático es muy lento. Se lleva a efecto por medio de un mecanismo similar al que impulsa la sangre venosa. La actividad muscular comprime los vasos linfáticos y per-

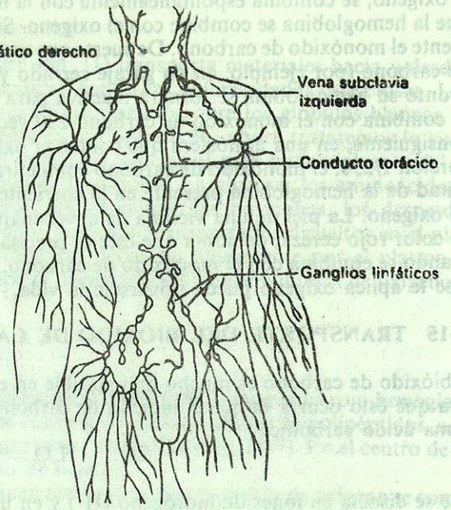

Fig. 14-14

El sistema linfático del hombre. La linfa devuelve proteínas plásmicas valiosas para la sangre y contribuye a la defensa del organismo de infecciones.

mite el escurrimiento de la linfa. La linfa puede fluir solamente en una sola dirección debido a las numerosas válvulas presentes.

Toda la linfa colectada en el lado izquierdo del cuerpo, más la linfa colectada en el canal digestivo y la proveniente de la parte inferior del lado derecho del cuerpo fluye por un vaso linfático principal, denominado el **conducto torácico.** Este conducto lleva aproximadamente 100 ml de linfa cada hora a la vena subclavia izquierda (Fig. 14-14). La linfa que se produce en el lado derecho de la cabeza, el cuello, y en el pecho, es recogida por el conducto linfático derecho, el cual desemboca en la vena subclavia derecha. De esta manera, la linfa con su contenido de proteínas regresa a la corriente sanguínea.

Muchos factores intervienen en la producción del flujo normal de la linfa. Un aumento en la presión sanguínea en los capilares o una disminución de las proteínas del plasma (como puede ocurrir durante períodos prolongados de nutrición deficiente) pueden producir cantidades excesivas de linfa (¿por qué?). El sistema linfático es incapaz de movilizar la producción excesiva de linfa y esta comienza a acumularse en los tejidos, los cuales se tornan laxos. Esta condición se conoce con el nombre de **edema.** También puede causar edema el bloqueo de los vasos linfáticos. En los trópicos esta situación puede producirse debido a la infección de un gusano parásito, la lombriz filaria. Debido al edema las porciones infectadas del cuerpo tales como las piernas, o los brazos, aumentan enormemente de volumen, afección que recibe el nombre de elefantiasis (Fig. 14-15).

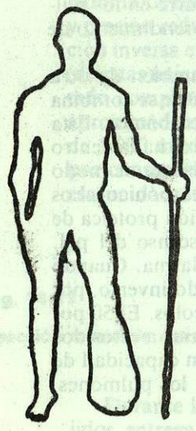

Fig. 14-15

Elefantíasis. La infección severa producida por el nemátodo filaria, ha deteriorado de tal manera los vasos linfáticos de la pierna, que el drenaje de la linfa ya no puede ocurrir. El edema crónico y el engrosamiento de la piel resultante causan una deformidad cada vez mayor. Los gusanos son transmitidos de una a otra persona por medio de mosquitos.

Dispersos en varios sitios del sistema linfático (especialmente en la ingle, en las axilas de los brazos, en el abdomen y en el cuello) se encuentran varios cientos de ganglios linfáticos (Fig. 14-14). Estos contienen cavidades o senos hacia los cuales fluye la linfa. Las paredes de los senos están tapizadas por células fagocíticas que engloban cualquier partícula extraña que pueda estar presente en la linfa. Este mecanismo protege la corriente sanguínea de invasiones de bacterios. Es una de las defensas más importantes del cuerpo contra las enfermedades infecciosas. Cuando deben combatir una infección aguda, los ganglios linfáticos pueden llegar a dilatarse, lo cual produce la «inflamación glandular». Los ganglios linfáticos fabrican también linfocitos y monocitos, los cuales penetran en la corriente sanguínea a través de las venas subclavias.

14-22 COAGULACION DE LA SANGRE

Otro mecanismo protectivo del sistema circulatorio consiste en la coagulación de la sangre. Cuando los vasos sanguíneos experimentan un corte o se rompen, es crucial que la pérdida de sangre del sistema se suspenda antes de que sobrevenga un colapso o la muerte. La solidificación o coagulación de la sangre hace esto posible, aunque no en los vasos sanguíneos principales. A medida que la sangre fluye de un vaso roto, las plaquetas se adhieren a la superficie interior de la pared del vaso. Tanto las plaquetas como las células que han sufrido daño, desprenden un material grasoso, el cual es activado por proteínas de la sangre para formar un complejo de sustancias conocido con el nombre de «tromboplastina». Parece que se requieren unos seis o diez de estos «factores» de la coagulación para formar tromboplastina activa. Algunos de ellos actúan catalíticamente, mientras otros en efecto se consumen durante el proceso. En presencia de iones de calcio (Ca^{++}) la tromboplastina cataliza la transformación de protrombina (una seroglobulina fabricada permanentemente por el hígado) en **trombina.** La trombina es una enzima que cataliza la conversión de la proteína fibrinógena, soluble en el plasma, en la proteína insoluble **fibrina.** La fibrina forma paulatinamente una malla en la cual son encerrados los glóbulos sanguíneos. Pronto se forma una barrera (el coágulo), la cual impide la salida de la sangre del vaso afectado.

Los distintos pasos que intervienen en el proceso de coagulación no han sido todavía completamente comprendidos. La Fig. 14-18, no da sino una visión panorámica del proceso.

La ausencia de cualquiera de los componentes que intervienen en el proceso, por ejemplo,

(1) Plaquetas células deterioradas + factores de coagulación sanguínea (utilizados) + otros factores de coagulación sanguínea (enzimas) → tromboplastina

(2) Protrombina —(tromboplastina, Ca)→ trombina

(3) Fibrinógeno —(trombina)→ fibrina

Fig. 14-18

El mecanismo de la coagulación de la sangre.

las plaquetas, un factor de coagulación plásmico, o la protrombina, puede conducir a una hemorragia severa externa o interna, aun por leves heridas como sería una ligera cortadura o la ruptura de pequeños vasos sanguíneos por un cepillo