



# *Biología*

OCTAVA EDICIÓN

LA VIDA EN LA TIERRA



AUDESIRK

AUDESIRK

BYERS



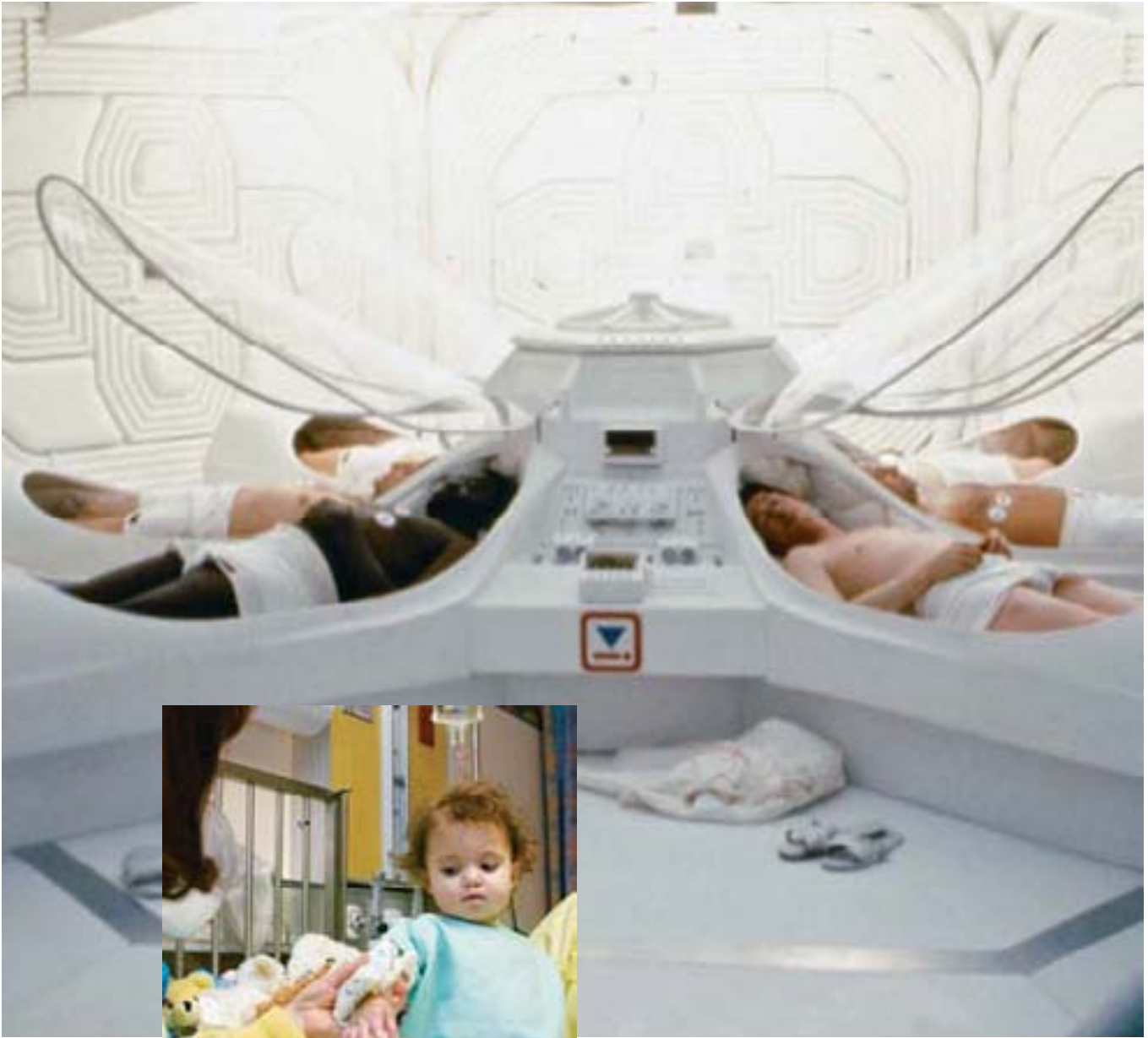
# Anatomía y fisiología de los animales

# 5



El cuerpo animal es una exquisita expresión de la elegancia con la que la evolución ha vinculado la forma con la función. Todos los sistemas del cuerpo animal operan en concierto para mantener la vida.

# 31 Homeostasis y organización del cuerpo animal



En esta escena de película, los viajeros espaciales se preparan para salir de sus cápsulas donde estuvieron en estado de animación suspendida durante todo el tiempo que duró el vuelo espacial. (Imagen en recuadro) El personal médico de un hospital en Alberta, Canadá, cuida los dedos congelados de Erika Nordby.

## DE UN VISTAZO

### ESTUDIO DE CASO: ¿La vida suspendida?

#### 31.1 Homeostasis: ¿Cómo regulan los animales su ambiente interno?

El ambiente interno se mantiene en un estado de continuidad dinámica

Los animales se clasifican por la forma en que regulan su temperatura corporal

#### Enlaces con la vida: ¿Calor o humedad?

Los sistemas de retroalimentación regulan las condiciones internas

Los sistemas internos del cuerpo actúan de manera coordinada

#### 31.2 ¿Cómo está organizado el cuerpo animal?

Los tejidos animales se componen de células similares que desempeñan una función específica

Los órganos incluyen dos o más tipos de tejidos que interactúan

Los sistemas de órganos consisten en dos o más órganos que interactúan

### OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿La vida suspendida?



## ESTUDIO DE CASO ¿LA VIDA SUSPENDIDA?

DESPUÉS DE PASAR DÉCADAS EN EL ESPACIO, los sensores de la nave detectan un planeta parecido a la Tierra. Las señales eléctricas activan las cápsulas de hibernación en las que descansan los jóvenes congelados e inmóviles. A medida que las cápsulas se van descongelando en forma gradual, los monitores cardíacos registran una actividad inicialmente lenta que luego va en aumento: el tórax comienza a subir y bajar, y los párpados se abren y se cierran. Estos viajeros del espacio, y del tiempo, observan a su alrededor y se encuentran momentáneamente aturdidos, hasta que poco a poco van recordando el momento en que se cerró la cubierta de la cápsula de hibernación cuando se inició su viaje espacial. Sonríen y se levantan un poco entumidos para comenzar su nueva vida.

Esta imagen de animación suspendida cautiva la imaginación y, por el momento, es mera fantasía. Pero más cerca de la realidad, el hecho de suspender la vida durante cierto periodo tiene urgentes implicaciones prácticas. Cada año, mientras miles de personas mueren esperando el trasplante de un órgano, cientos de órganos donados tienen que ser rechazados porque no logran sobrevivir el tiempo suficiente para trasplantarse. Por otra parte, decenas de miles de perso-

nas mueren por la falta de oxígeno causada por la pérdida de sangre, por un ataque al corazón o por un accidente cerebrovascular antes de que puedan recibir tratamiento médico. ¿Será posible que muchas de estas víctimas, así como los órganos donados, puedan someterse a un estado de animación suspendida en el cual las células casi no requieren oxígeno mientras se les transporta?

Durante mucho tiempo los biólogos se han sentido fascinados por la capacidad de hibernación de los mamíferos, que es casi la suspensión de la vida. Por ejemplo, la temperatura corporal de las ardillas en estado de hibernación se acerca a la del punto de congelamiento, mientras que sus tasas respiratorias y el ritmo de sus latidos cardíacos, así como el consumo de oxígeno, disminuyen casi en un 97 por ciento. ¿La vida de una persona también podría ponerse en estado de hibernación por medio del congelamiento? Algunos accidentes indican que sí es posible. En una noche fría poco antes del amanecer, con una temperatura bajo cero, en Alberta, Canadá, una madre desesperada seguía las pequeñas huellas que había dejado su hijita de 13 meses de edad, hasta que la encontró rígida, con su cara hacia abajo sobre la nieve. Erika Nordby no respiraba, su corazón no latía y su temperatura

corporal era tan sólo de 16°C (hay que recordar que la temperatura normal es de 37°C). Los paramédicos le practicaron la resucitación cardiopulmonar y la cobijaron con una frazada caliente. Entonces el corazón de Erika comenzó a latir por sí solo. Al día siguiente, estaba vivaracha y tomando leche de su biberón (véase la imagen en el recuadro al inicio de este capítulo). Por otra parte, una esquiadora cayó a través de la capa de hielo en un lago noruego; a sus compañeros les llevó 80 minutos sacarla a la superficie. Su temperatura corporal era de 14°C, no respiraba y su corazón había dejado de latir. Después de 9 horas de labor de resucitación, el corazón de Anna Bagenholm comenzó a latir por sí solo; posteriormente su recuperación fue excelente.

¿Qué fue lo que sucedió a los cuerpos de Erika y de Anna cuando perdieron la batalla para conservarse calientes? ¿Por qué, si estuvieron clínicamente muertas durante cierto tiempo, ahora viven y están saludables? ¿El estado de animación suspendida inducido por congelamiento podría ser la clave para conservar vivos los órganos donados, así como a las personas que han estado privadas de oxígeno por haber sufrido un trauma o un accidente cerebrovascular?

### 31.1 HOMEOSTASIS: ¿CÓMO REGULAN LOS ANIMALES SU AMBIENTE INTERNO?

Ya sea que nos zambullamos en una alberca, caminemos por el desierto o nademos en el mar, nuestras células permanecen aisladas de las condiciones exteriores. Todas ellas están bañadas en líquido extracelular que contiene una compleja y muy específica mezcla de sustancias disueltas que debe mantenerse pese a las condiciones externas. Muchos animales han desarrollado complejos mecanismos fisiológicos que les permiten mantener condiciones internas precisas, a pesar de vivir todo el tiempo en ambientes hostiles. Por ejemplo, los habitantes del desierto, como la rata canguro, tienen riñones que les permiten conservar el agua, mientras que los animales de agua dulce, como la trucha o la rana, excretan abundantes cantidades de agua. Los peces oceánicos secretan el exceso de sal por las agallas. Puesto que las células del cuerpo animal no pueden sobrevivir si las condiciones del ambiente interno se salen de un intervalo estrecho de estados aceptables, las células dedican una porción considerable de su energía a acciones que buscan mantener la estabilidad del ambiente celular.

El primero en reconocer esta “constancia del medio interno” fue el fisiólogo francés Claude Bernard a mediados del siglo XIX. Posteriormente, en la década de 1920, Walter B. Cannon acuñó el término **homeostasis** para describir el proceso mediante el cual un organismo mantiene su ambiente interno dentro de un estrecho intervalo de condiciones necesarias para el óptimo funcionamiento de las células. Aunque la palabra *homeostasis* (que deriva del griego y significa “seguir igual”) implica un estado estático, sin cambios, en realidad el ambiente interno bulle de actividad mientras el cuerpo se ajusta continuamente a cambios internos y externos.

#### El ambiente interno se mantiene en un estado de continuidad dinámica

El estado interno de un cuerpo animal puede describirse como un *equilibrio dinámico*. Ocurren muchos cambios físicos y químicos (el aspecto dinámico), pero el resultado neto de toda esta actividad es que los parámetros físicos y químicos se mantienen dentro del estrecho intervalo que las células requieren para funcionar (el aspecto constante). Ejemplos de las condiciones dentro del líquido que rodea a las células y que se regulan por mecanismos homeostáticos incluyen:

- temperatura
- niveles de agua y sal
- niveles de glucosa
- pH
- niveles de oxígeno y dióxido de carbono

¿Por qué las células son tan delicadas en relación con su ambiente? Como aprenderás en los siguientes capítulos de esta unidad, se requieren los niveles adecuados de varios tipos de sal para los procesos que sostienen la vida, como la actividad neuronal y la contracción muscular. Los requerimientos de energía y la dependencia de la compleja estructura tridimensional de las proteínas para regular las actividades metabólicas también restringen su ambiente.

En condiciones normales, las células animales generan y usan constantemente grandes cantidades de ATP para mante-

ner los procesos vitales (véase el capítulo 8). Las reacciones que producen ATP (glucólisis seguida de la respiración celular) requieren de un abastecimiento continuo de moléculas de alta energía (principalmente glucosa) y también de oxígeno para completar la serie de reacciones que generan la mayor parte del ATP de la célula. Así, la producción de energía ayuda a explicar la importancia de los niveles de glucosa y oxígeno.

Cada una de las muchas reacciones que se requieren para generar ATP es catalizada por una proteína específica cuya capacidad de funcionamiento depende de manera fundamental de su estructura tridimensional, en parte mantenida mediante los puentes de hidrógeno. Estos puentes cruciales pero vulnerables sufren alteraciones en un ambiente demasiado caliente, demasiado salado, o bien, muy ácido o muy alcalino (véase el capítulo 3). La necesidad de mantener estos puentes y la función proteínica que depende de ellos ayuda a explicar la necesidad de un intervalo estrecho de temperatura, de pH y sal.

Como las temperaturas crecientes aceleran las reacciones químicas, las temperaturas elevadas aumentan la demanda de ATP, así como la velocidad a las que las células lo generan, lo que incrementa la necesidad de la célula de disponer de oxígeno y de glucosa. Cuando Anna cayó a través del hielo, se interrumpió su dotación de oxígeno. Por fortuna, la temperatura tan baja del agua redujo en forma drástica los requerimientos de oxígeno celulares, lo cual la mantuvo viva.

#### Los animales se clasifican por la forma en que regulan su temperatura corporal

Probablemente ya estás familiarizado con las descripciones de los mamíferos y las aves como animales “de sangre caliente”, y de los reptiles, anfibios, peces e invertebrados como “de sangre fría”. Sin embargo, el cuerpo del pez llamado perrito del desierto puede alcanzar más de 37.8°C cuando los estanques del desierto se calientan bajo el sol de verano, mientras que el cuerpo de los colibríes se enfría hasta alcanzar 12.8°C durante la noche para ahorrar energía (**FIGURA 31-1a, b**). Para evitar confusiones, los científicos a menudo clasifican a los animales de acuerdo con la fuente principal para su calentamiento corporal. Así, los animales son **endotérmicos** (del griego “calor interior”) si producen la mayor parte de su calor por medio de reacciones metabólicas; las aves y mamíferos son endotérmicos. Unos cuantos peces, como el atún y algunos tiburones grandes, al igual que algunas mariposas y abejas también pueden calentar su cuerpo considerablemente por medio de su calor metabólico. Los animales son **ectotérmicos** (del griego “calor exterior”) si obtienen la mayor parte de su calor del medio, por ejemplo, asoleándose (**FIGURA 31-1c**). Los reptiles, anfibios y la mayoría de los peces e invertebrados son ectotérmicos. En general, los endotérmicos tienen tasas metabólicas más elevadas que los ectotérmicos, lo que les permite mantener su cuerpo a temperaturas cálidas constantes. Debido a que sus cuerpos generan tanto calor, los endotérmicos, incluidos los seres humanos, se ven amenazados por condiciones en las cuales no pueden escapar del calor o enfriarse ellos mismos (véase la sección “Enlaces con la vida: ¿Calor o humedad?”). Los ectotérmicos por lo general tienen temperaturas corporales más bajas y más variables que los endotérmicos, porque dependen más del calor ambiental. Sin embargo, a través del comportamiento o por habitar en un ambiente muy constante, la temperatura corporal de los ectotérmicos tam-



**FIGURA 31-1** ¿De sangre caliente o fría?

a) Puesto que los peces “de sangre fría” como este pez perrito del desierto pueden estar calientes, y b) los animales “de sangre caliente” como este colibrí pueden llegar a enfriarse bastante, los científicos prefieren clasificar a los animales como endotérmicos y ectotérmicos dependiendo de la fuente de calor corporal. c) Este lagarto que se asolea ilustra un mecanismo de comportamiento que utilizan los reptiles, que son ectotérmicos, para regular la temperatura corporal.

bién puede permanecer bastante estable. Por ejemplo, el pez perrito del desierto antes mencionado es capaz de tolerar temperaturas del agua de 2.2 a 45°C, pero puede procrear sólo dentro de un intervalo estrecho de temperaturas. Durante la estación de apareamiento, este perrito del desierto puede regular su temperatura con bastante precisión al nadar en diferentes áreas del estanque o en aguas termales según cambie la temperatura. En aguas profundas del mar, la temperatura es tan constante (alrededor de 3°C) que los peces ectotérmicos casi no experimentan ninguna variación en su temperatura corporal.

Puesto que las temperaturas más calientes aumentan la rapidez de las reacciones metabólicas, hay costos y beneficios al mantenerse caliente. Si el cuerpo se enfría (como sucede durante la noche), las mariposas y abejas no pueden volar, mientras que, en esas condiciones, los lagartos son demasiado lentos para cazar o para huir de los depredadores de manera

eficiente. Estos animales ectotérmicos, y muchos otros, se calientan ellos mismos durante el día de manera que puedan realizar sus actividades normales. Las abejas se estremecen y las mariposas baten sus alas para generar calor metabólico, mientras que los lagartos buscan alguna piedra caliente por el sol. Después, al descansar en sitios resguardados durante la noche, sus cuerpos se enfrían y conservan la energía. La temperatura corporal diurna del colibrí de aproximadamente 41°C contribuye a su capacidad de batir las alas con la increíble rapidez de 80 veces por segundo, lo cual, a la vez, le permite revolotear precisamente donde puede extraer el néctar de las flores (figura 31-1b). Sin embargo, si estos endotérmicos trataran de mantener esta alta temperatura corporal durante una noche muy fría, agotarían sus reservas de energía y morirían de hambre. Así que cuando las noches son frías, un colibrí puede reducir su temperatura corporal y mantenerla 10°C más fría que durante el día.

## ENLACES CON LA VIDA

### ¿Calor o humedad?

¡No es el calor, es la humedad! En realidad, la incomodidad que sientes en un día caluroso y sofocante es el resultado de estos dos factores. Los meteorólogos han desarrollado una fórmula, el índice calorífico, que permite obtener una “temperatura aparente” al tomar en cuenta la humedad. Por ejemplo, una temperatura de 32.2°C (90°F) tiene un índice calorífico de 37.8°C (100°F) a una humedad del 60 por ciento, pero se siente tan sólo como de 29.4°C (85°F) a una humedad del 10 por ciento. La temperatura del aire cercana a la temperatura corporal evita que el cuerpo irradie el exceso de calor que genera, mientras que la humedad elevada mina la capacidad del cuerpo para enfriarse por medio del sudor. El calor y la humedad juntos alteran los intentos del cuerpo para mantener el intervalo estrecho de la temperatura que activa la homeostasis.

En casos extremos, el calor excesivo puede causar una condición mortal llamada *hipertermia* o insolación. Aunque cual-

quiera puede sucumbir a ésta, los ancianos y los niños son los más susceptibles porque su capacidad para regular la temperatura corporal es menos eficiente. Durante la insolación, se alteran los mecanismos homeostáticos del cuerpo, pues la temperatura corporal se eleva a 41.1°C (105°F) o más, se produce deshidratación, cesa la sudoración y se pierde la percepción de sed. En Estados Unidos docenas de niños mueren cada verano al quedarse encerrados en automóviles bajo los rayos del sol, donde la temperatura alcanza niveles mortales en el breve lapso de 15 minutos.

Cuando te quejes por el calor y la humedad en el próximo verano, recuerda que tu malestar se ha desarrollado como un sistema de alerta que te indica que la homeostasis está amenazada. Así que date un baño, busca una sombra donde resguardarte o un sitio con aire acondicionado y bebe un vaso grande de agua fresca.

## Los sistemas de retroalimentación regulan las condiciones internas

El ambiente interno de un organismo se mantiene por un sinnúmero de mecanismos que, en conjunto, se denominan *sistemas de retroalimentación*. Los *sistemas de retroalimentación negativa* contrarrestan los efectos de cambios en el ambiente interno y son los responsables de mantener la homeostasis. Los *sistemas de retroalimentación positiva* también ocurren en los organismos e impulsan cambios rápidos y autolimitantes, parecidos a los que ocurren cuando una madre da a luz.

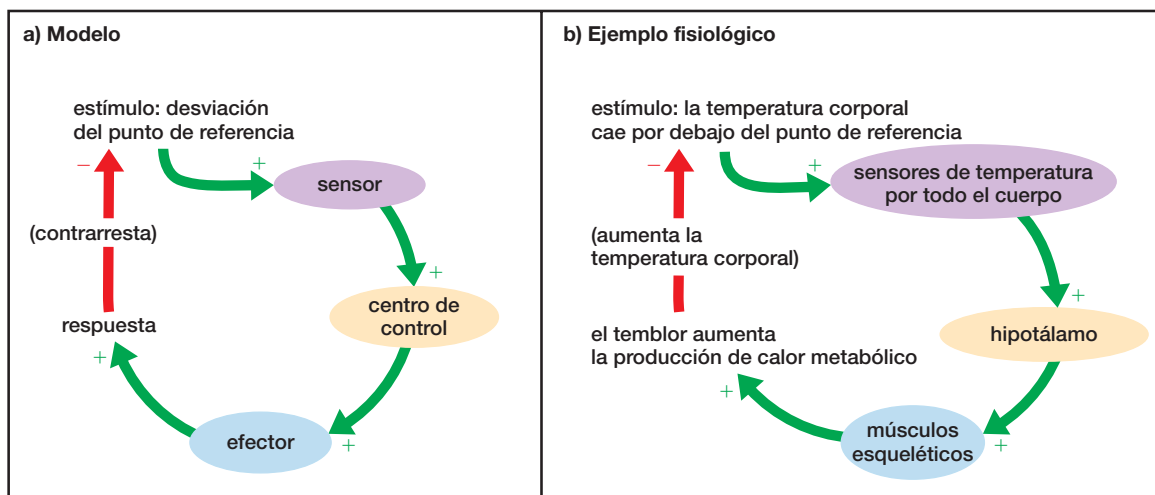
### La retroalimentación negativa revierte los efectos de los cambios

El mecanismo más importante que rige la homeostasis es la **retroalimentación negativa**, en la cual un cambio en el ambiente provoca una respuesta que “retroalimenta” y contrarresta ese cambio. El resultado general de la retroalimentación negativa es el de hacer que el sistema regrese a su condición original contrarrestando el cambio inicial (**FIGURA 31-2**).

Un ejemplo muy conocido de retroalimentación negativa es el termostato de una casa. En un termostato, un termómetro detecta un estímulo (descenso de la temperatura por debajo de un *valor establecido* o *punto de referencia*, es decir, el ajuste del termostato) y envía una señal a un dispositivo de control que enciende un calefactor. Éste restaura la temperatura al valor establecido y el calefactor se apaga. La continua repetición de los ciclos de encendido y apagado mantiene la temperatura de la casa cerca del valor establecido. Observa que el ascenso y descenso de la temperatura alrededor del valor establecido produce un equilibrio dinámico parecido al del cuerpo de los animales, en vez de una temperatura absoluta constante. El mecanismo de retroalimentación negativa del termostato requiere de un *centro de control* con un valor establecido, un *sensor* (el termómetro) y un *efector* (la caldera) que realiza el cambio.

### La retroalimentación negativa mantiene la temperatura corporal

¿Cómo mantienen las personas y otros animales endotérmicos su temperatura interna, a pesar de las fluctuaciones extremas de la temperatura a su alrededor, como las que experimentó Erika en medio de la nieve durante una noche de invierno en Canadá? El punto de referencia en el sistema de control de la temperatura, que varía en menos de 1°C en el ser humano sano, se establece en un centro de control del *hipotálamo*, una región del cerebro que controla muchas respuestas homeostáticas. Las terminaciones nerviosas del hipotálamo, el abdomen, la médula espinal, la piel y las venas grandes actúan como sensores de temperatura y transmiten la información al hipotálamo. Cuando baja la temperatura del cuerpo, el hipotálamo activa diversos mecanismos efectores que elevan esa temperatura. Cuando se restablece la temperatura normal del cuerpo, los sensores avisan al hipotálamo que desactive esos mecanismos de control de la temperatura. Por ejemplo, sin duda Erika comenzó a temblar tan pronto como salió de su casa y comenzó a caminar en medio de la nieve. Este estremecimiento tiene su origen en contracciones rápidas de los músculos esqueléticos para quemar el combustible almacenado en ellos y generar calor (figura 31-2b). Los vasos sanguíneos que alimentan las áreas no vitales del cuerpo (como cara, manos, pies y piel) experimentaron una constricción en el caso de Erika, lo que redujo la pérdida de calor y desvió la sangre caliente a las regiones vitales internas (cerebro, corazón y otros órganos internos). Entonces, su hipotálamo inició una serie de señales químicas que elevaron la tasa metabólica, generando más calor para mantener las funciones vitales. Pero con reservas energéticas limitadas y un cuerpo pequeño con una extensa área superficial, la temperatura de la niña descendió rápidamente. Por debajo de los 29°C, la actividad del hipotálamo se redujo hasta el punto en que ya no fue capaz de controlar la temperatura corporal.



**FIGURA 31-2** La retroalimentación negativa mantiene la homeostasis

La retroalimentación negativa mantiene el valor establecido o punto de referencia empleando un sensor para detectar una desviación respecto del mismo (es decir, un estímulo). El receptor envía una señal al centro de control, el cual activa un mecanismo efector para contrarrestar el estímulo. **PREGUNTA:** ¿Qué sucedería si un mamífero cuyo cuerpo está frío y tembloroso ingiriera un veneno que destruyera todas las terminales nerviosas del cuerpo que detectan el calor?



Hay muchos mecanismos de retroalimentación negativa en los sistemas fisiológicos. En los siguientes capítulos presentaremos muchos ejemplos de control homeostático que operan por retroalimentación negativa, como los sistemas que regulan el contenido de oxígeno en la sangre, el equilibrio del agua, los niveles de azúcar en la sangre y muchos otros componentes del “medio interno”.

### **La retroalimentación positiva impulsa ciertos sucesos fisiológicos a corto plazo**

A primera vista, la retroalimentación positiva es un concepto un tanto pavoroso, pues un cambio en un sistema de **retroalimentación positiva** produce una respuesta que intensifica el cambio original. La retroalimentación positiva, obviamente, tiende a crear reacciones en cadena. Por ejemplo, en la fisión nuclear, cada partícula que se separa de un átomo provoca la división de otro átomo, cuyos fragmentos causan la división de otros átomos, y así sucesivamente. Si se deja deliberadamente sin control, la energía liberada por esta reacción en cadena es responsable de la devastación que produce una bomba atómica. Un ejemplo biológico conocido de retroalimentación positiva tiene lugar cuando los miembros de una población tienen, en promedio, más hijos de los que se necesitan para remplazar a los progenitores, lo que provoca que la población crezca exponencialmente. El ecólogo Paul Ehrlich acuñó la acertada expresión de “bomba demográfica” para describir el crecimiento no controlado de una población. La retroalimentación negativa, finalmente, termina con los procesos impulsados por la retroalimentación positiva. Con el tiempo, la bomba atómica se quedará sin átomos para continuar la división, y las poblaciones en aumento se quedarán sin alimento o sin espacio dónde vivir.

### **La retroalimentación positiva produce el trabajo de parto y el alumbramiento**

En los sistemas fisiológicos, los sucesos regidos por mecanismos de retroalimentación positiva suelen ser autolimitantes y relativamente poco comunes. Hay retroalimentación positiva, por ejemplo, durante el parto. Las primeras contracciones del parto comienzan a empujar la cabeza del bebé contra el cuello de la matriz, situado en la base del útero; esta presión hace que el cuello se dilate (se abra). Neuronas receptoras de estiramiento en el cuello de la matriz responden a esta expansión enviando una señal al hipotálamo, el cual responde activando la liberación de una hormona (oxitocina) que estimula contracciones uterinas cada vez más numerosas y fuertes. Estas contracciones crean mayor presión contra el cuello de la matriz, lo que, a la vez, propicia la liberación de más hormonas. El nacimiento del bebé pone fin a la presión sobre el cuello de la matriz, dando una retroalimentación negativa que detiene el ciclo de retroalimentación positiva.

### **Los sistemas internos del cuerpo actúan de manera coordinada**

Por fortuna, la evolución se ha asegurado de que los diversos sistemas colaboren. Por ejemplo, los sistemas que introducen sustancias al cuerpo actúan en coordinación con los sistemas encargados de transportar sustancias dentro del cuerpo y de eliminarlas. Cada célula del cuerpo está conectada de forma indirecta con todas las demás mediante una compleja red de vasos sanguíneos y nervios que pueden llevar moléculas y mensajes a los sitios apropiados. Para mantener la homeostasis, las señales químicas actúan sólo sobre las células blanco que se especializan en recibir y responder a señales específicas. Con frecuencia hay muchos otros eslabones en esta cadena de comunicación. La exposición al frío, por ejemplo, hace que el hipotálamo libere señales químicas que viajan por el torrente sanguíneo hacia una glándula cercana (la hipófisis o pituitaria). La glándula hipófisis entonces libera una hormona que hace que trabaje la glándula tiroidea y libere una hormona diferente. Esta hormona actúa para aumentar la tasa metabólica del cuerpo, lo que genera más calor. El hipotálamo detiene la liberación de la señal química cuando sus receptores de la temperatura sanguínea indican que la temperatura corporal ha regresado a su estado normal. Así, al usar una variedad de rutas y mecanismos, los mensajes son transportados desde los sensores a los efectores y de regreso otra vez, lo que permite a los mecanismos de retroalimentación negativa mantener la homeostasis.

## **31.2 ¿CÓMO ESTÁ ORGANIZADO EL CUERPO ANIMAL?**

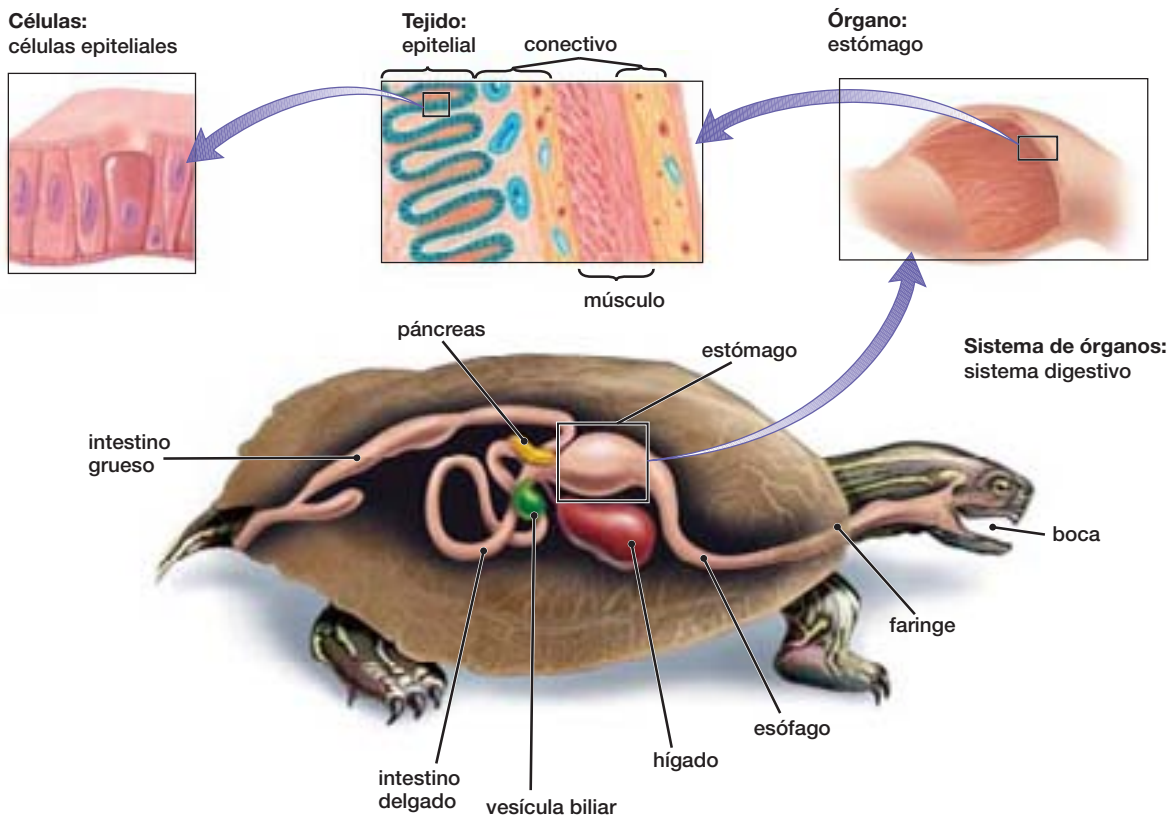
A partir de las células simples que viven libremente, el cambio evolutivo ha producido asombrosos sistemas complejos que consisten en billones de células especializadas que llevan a cabo cientos de funciones de manera simultánea. Todas las partes embonan unas con otras con tal grado de precisión e integración que en la actualidad los ingenieros todavía sueñan con imitarlas. Esta complejidad se basa en una jerarquía organizacional simple:

células → tejidos → órganos → sistemas de órganos

Un ejemplo de esta jerarquía se ilustra en la **FIGURA 31.3**. Como aprendiste en el capítulo 1, las células son los bloques de construcción de toda forma de vida. El cuerpo de un animal incorpora células para formar **tejidos**, cada uno de los cuales se compone de docenas a miles de millones de células estructuralmente similares que actúan de manera coordinada para llevar a cabo una función específica. Los tejidos son los bloques de construcción de los **órganos**, las estructuras discretas que desempeñan funciones complejas. Ejemplos de órganos incluyen el estómago, el intestino delgado, los riñones y la vejiga urinaria. A la vez, los órganos están organizados en **sistemas**, que son grupos de órganos que funcionan de forma coordinada. Por ejemplo, el sistema digestivo incluye el estómago, el intestino delgado, el intestino grueso y otros órganos que trabajan en conjunto para permitirnos digerir los alimentos y absorber los nutrimentos contenidos en ellos. Los grandes sistemas de órganos de los vertebrados se ilustran en la tabla 31-1.

### **Los tejidos animales se componen de células similares que desempeñan una función específica**

Un tejido se compone de células con estructura similar, diseñadas para desempeñar una función especializada. Los tejidos



**FIGURA 31-3** Células, tejidos, órganos y sistemas de órganos

El cuerpo animal está compuesto de células, que forman tejidos, los cuales se combinan para constituir órganos que trabajan en perfecta armonía como sistemas de órganos.

también pueden incluir componentes extracelulares producidos por esas células, como en el caso del cartílago y el hueso. Aquí presentaremos un breve panorama de las cuatro categorías principales de tejidos animales y de los cuatro tipos principales de células que componen esos tejidos: tejido epitelial, tejido conectivo, tejido muscular y tejido nervioso.

#### **El tejido epitelial cubre al cuerpo, reviste sus cavidades y forma glándulas**

El **tejido epitelial** consiste en una o más capas de células epiteliales densamente apretadas, soportadas por una capa extracelular, la *lámina basal*, compuesta de colágeno y otras proteínas fibrosas (**FIGURA 31-4**). Existe una variedad de tipos de tejido epitelial, cada uno adaptado a una función particular. El tejido epitelial cubre toda la parte externa del cuerpo y reviste todas sus cavidades internas, incluidos los tractos digestivo y respiratorio, el corazón y los vasos sanguíneos, los órganos reproductores y los órganos del sistema urinario.

El tejido epitelial a menudo se clasifica por sus capas celulares: el *epitelio simple* tiene el espesor de una sola célula y recubre al tracto respiratorio, buena parte del tracto digestivo y del sistema circulatorio. El *epitelio estratificado*, cuyo espesor es de varias células, puede soportar desgastes y desgarres considerables; se encuentra en la boca y en la piel. Dentro de cada una de estas categorías encontramos especializaciones adicionales. Por ejemplo, el epitelio simple que recubre los pulmones consiste en una sola capa de células delgadas y planas cuya forma las hace ideales para permitir la difusión rápida de los gases (figura 31-4a). El epitelio simple que recubre la tráquea es en realidad bastante complejo, consiste tanto en

células cortas como alargadas con cilios, entremezcladas con *células caliciformes* glandulares que secretan mucosidad (figura 31-4b). La mucosa atrapa las impurezas inhaladas y los cilios las arrojan fuera de la tráquea. El epitelio estratificado de la piel está cubierto por muchas capas de células muertas. Éstas y las células epiteliales subyacentes están fuertemente enlazadas por medio de una proteína resistente y elástica (la *queratina*) que hace que la piel sea flexible, impermeable y relativamente resistente (figura 31-4c).

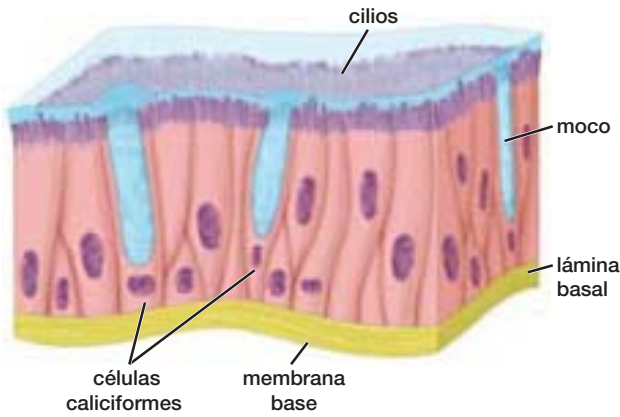
Una propiedad importante de las células epiteliales es que continuamente se pierden y se reponen por división celular mitótica. Por ejemplo, consideremos el desgaste que sufre el epitelio que reviste la boca. El epitelio, quemado por café caliente y raspado por las rosetas de maíz, quedaría destruido en cuestión de días si no se estuviera reponiendo continuamente. El revestimiento del estómago, raspado por los alimentos y atacado por ácidos y enzimas que digieren proteínas, se repone por completo cada dos o tres días. La membrana exterior de la piel, la epidermis (figura 31-4c), se renueva unas dos veces al mes.

Las **glándulas** son células o grupos de células que se especializan en secretar (liberar) grandes cantidades de sustancias fuera de la célula. Todas las glándulas se componen de células epiteliales especializadas. Algunas glándulas son células únicas, como las que secretan la mucosidad del epitelio traqueal (véase la figura 31-4b). La mayor parte de las glándulas son multicelulares, incluidas las que secretan saliva, sudor, leche u hormonas. Las glándulas se clasifican en dos amplias categorías: *glándulas exocrinas* y *glándulas endocrinas*. Las **glándulas exocrinas** secretan sustancias en una cavidad corporal o sobre

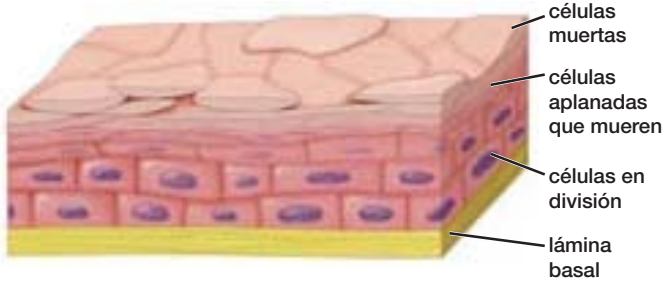
a) Revestimiento pulmonar (simple)



b) Revestimiento de la tráquea (simple)



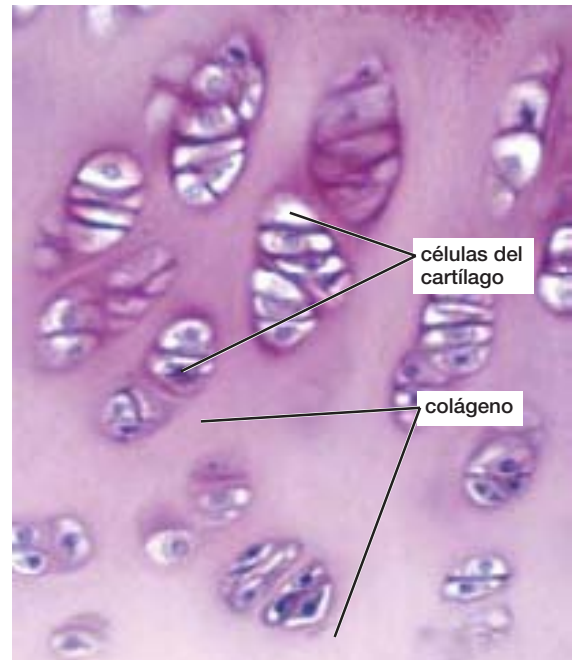
c) Epidermis (estratificada)



**FIGURA 31-4 Ejemplos de tejido epitelial**

a) Células delgadas y aplanadas en una capa única forman el tejido epitelial que reviste los pulmones, donde es esencial el intercambio de gases por difusión. b) Células epiteliales alargadas y ciliadas se intercalan con células caliciformes que secretan mucosidad y que revisten la tráquea. c) La epidermis consiste en múltiples capas de tejido epitelial estratificado cubierto por una capa protectora de células muertas. Todo el tejido epitelial incluye una capa delgada de proteína fibrosa, llamada lámina basal, situada debajo de las células epiteliales.

la superficie del cuerpo, a menudo a través de un tubo angosto o *ducto*. Como ejemplos podemos citar las glándulas sudoríparas y *sebáceas* (secretoras de aceites); ambos tipos se encuentran en la piel y se derivan del epitelio (véase la figura 31-11). Las *glándulas salivales* secretan saliva a la boca; otras glándulas exocrinas vierten enzimas digestivas en el estómago y en el intestino delgado. Las **glándulas endocrinas** carecen de ductos; secretan *hormonas* que se difunden en los capilares cercanos. Las **hormonas** son sustancias químicas producidas en pequeñas cantidades y que se transportan por medio del torrente sanguíneo para regular la actividad de las células



**FIGURA 31-5 Cartilago**

Las células del cartilago, teñidas de color púrpura oscuro, se encuentran rodeadas de espacios transparentes. El material homogéneo teñido de color púrpura pálido es la matriz del colágeno secretado por las células cartilaginosas.

(a menudo distantes). Las glándulas endocrinas y sus hormonas se explican con más detalle en el capítulo 37.

**Los tejidos conectivos tienen diversas estructuras y funciones**

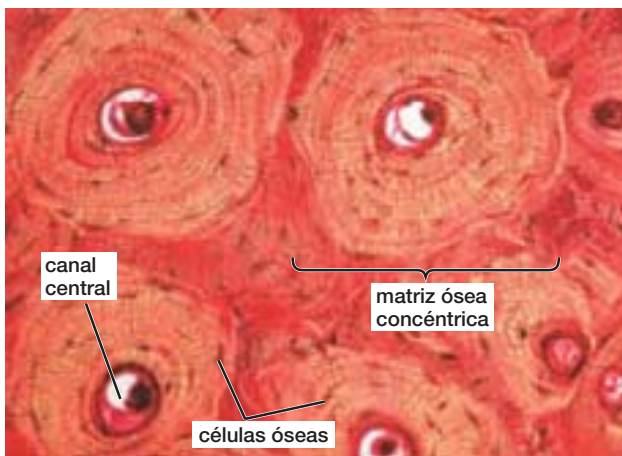
Los **tejidos conectivos** sirven principalmente para sostener y unir otros tejidos. La mayor parte de los tejidos conectivos consisten en células incrustadas en una *matriz* de sustancias extracelulares. Esta matriz no celular de tejido conectivo comúnmente incluye líquido y varios tipos de fibras proteínicas flexibles, la más abundante de las cuales es el **colágeno**. Estas proteínas por lo común son secretadas por las células del tejido conectivo. Los tejidos conectivos se agrupan en tres categorías principales.

**Tejido conectivo laxo**

Ésta es la forma más abundante y consiste en un líquido espeso que contiene células dispersas que secretan fibras proteínicas y colágeno. Este tejido flexible conecta, sostiene y rodea otros tipos de tejidos y forma un marco de sostén interno para órganos como el hígado. El tejido conectivo laxo se combina con el tejido epitelial para formar *membranas*. Por ejemplo, la *piel* (tejido epitelial estratificado soportado por tejido conectivo laxo) es una membrana que cubre la totalidad de la superficie corporal externa, y las *membranas mucosas* (tejido epitelial simple ciliado soportado por tejido conectivo laxo) recubren las cavidades internas del sistema digestivo, reproductor, respiratorio y urinario.

**Tejido conectivo fibroso**

Este grupo incluye los **tendones** (que conectan los músculos con los huesos) y **ligamentos** (que conectan unos huesos con otros). El tejido conectivo fibroso contiene fibras de colágeno, las cuales forman un empaque denso en un arreglo orde-



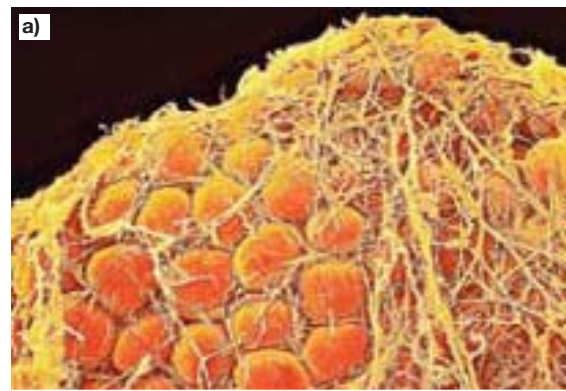
**FIGURA 31-6 Hueso**

En esta micrografía se observan con claridad los círculos concéntricos de hueso (un tejido conectivo especializado), depositados alrededor de un canal central que contiene un vaso sanguíneo. Las células óseas individuales aparecen como manchas oscuras atrapadas en pequeñas cámaras dentro de la matriz dura que las mismas células depositan.

nadamente paralelo, un diseño que imparte flexibilidad y una gran fuerza a los tendones y ligamentos.

### Tejidos conectivos especializados

Este grupo diverso incluye *cartílagos*, *huesos*, *grasa*, *sangre* y *linfa*. El **cartílago** es flexible y resistente; consiste en células ampliamente espaciadas rodeadas de una matriz gruesa e inerte. Esta matriz está compuesta por el colágeno secretado de las células cartilaginosas (**FIGURA 31-5**). El cartílago cubre los extremos de los huesos en las articulaciones, constituye el armazón de sostén de las vías respiratorias, brinda soporte a las orejas y la nariz, y forma cojincillos amortiguadores entre las vértebras. El **hueso** (**FIGURA 31-6**) se parece al cartílago, pero su matriz se ha endurecido por depósitos de fosfato de calcio. El hueso se forma en círculos concéntricos alrededor de un canal central, que contiene un vaso sanguíneo. (Estudiaremos a fondo los cartílagos y los huesos en el capítulo 39). Las células grasas, llamadas colectivamente **tejido adiposo** (**FIGURA 31-7a**), están modificadas para el almacenamiento de energía a largo plazo. El tejido adiposo tiene especial importancia en la fisiología de los animales adaptados a entornos fríos, pues, además de almacenar energía, también sirve como aislante (**FIGURA 31-7b**). La **sangre** y la **linfa**, aunque son líquidos, se consideran tejidos conectivos especializados porque se componen principalmente de líquidos extracelulares en los que las células individuales están suspendidas. La porción celular de la sangre (**FIGURA 31-8**) consiste en glóbulos rojos o eritrocitos (que transportan el oxígeno), glóbulos blancos o leucocitos (que combaten las infecciones) y fragmentos de células llamados *plaquetas* (que participan en el proceso de coagulación de la sangre). Todos ellos están embebidos en un líquido extracelular llamado *plasma*. La linfa consiste principalmente en líquido que se filtra de los capilares de la sangre (los vasos sanguíneos más pequeños) y regresa al sistema circulatorio por medio de vasos linfáticos. Aprenderás más acerca de la sangre y la linfa en el capítulo 32.

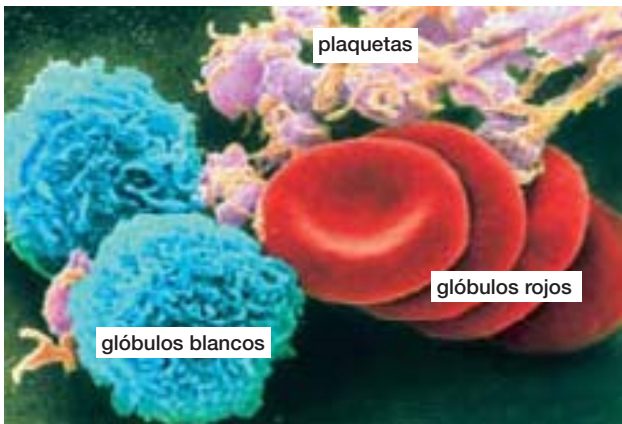


**FIGURA 31-7 Tejido adiposo**

**a)** El tejido adiposo del abdomen del cuerpo humano, que se muestra aquí, es tejido conectivo especializado compuesto casi exclusivamente de células grasas. Una gotita de aceite ocupa casi la mayor parte del volumen de la célula. El tejido conectivo fibroso amarillo cubre las células. **b)** Una foca de capucha a los cuatro días de nacida ya ha duplicado su peso tomando la leche de la madre que contiene 61 por ciento de grasa, obtenida de la provisión de grasa que la madre almacena. Con un peso de 45 kilos, la cría está demasiado gorda para moverse. La grasa la alimentará y aislará cuando los témpanos de hielo se desintegren y se zambulla en las heladas aguas para cazar y alimentarse por su cuenta. **PREGUNTA:** ¿Por qué los mamíferos jóvenes a menudo son más gordos que los adultos?

### El tejido muscular puede contraerse

Las largas y delgadas células del tejido muscular se contraen (es decir, se acortan) cuando reciben un estímulo y luego se relajan pasivamente. Hay tres tipos de tejido muscular: esquelético, cardíaco y liso. El **músculo esquelético** (**FIGURA 31-9**) generalmente está bajo control voluntario o *consciente*. Como su nombre implica, su principal función es mover el esqueleto, como cuando caminamos o damos vuelta a las páginas de este texto. El **músculo cardíaco** se localiza únicamente en el corazón. A diferencia de los músculos esqueléticos, actúa espontánea e involuntariamente, ya que no está bajo control consciente. Las células musculares cardíacas están conectadas mediante uniones abiertas a través de las cuales las señales eléctricas se difunden rápidamente por el corazón; de esta forma, las células musculares cardíacas se estimulan y se contraen de manera coordinada. El **músculo liso**, llamado así porque no tiene la disposición ordenada de filamentos gruesos y delgados que se observa en los músculos esqueléticos y del



**FIGURA 31-8** Glóbulos de la sangre

La sangre contiene tres tipos de componentes celulares, que se muestran en esta micrografía electrónica realizada a color. Las células se encuentran suspendidas en plasma, que también es un componente de este tejido conectivo especializado. **PREGUNTA:** ¿Por qué se considera a la sangre como una forma de tejido conectivo?

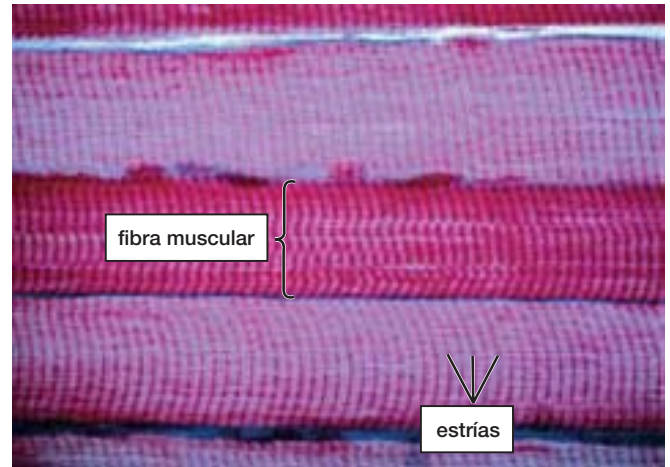
corazón, está embebido en las paredes del tracto digestivo, el útero, la vejiga y los vasos sanguíneos grandes. Los músculos lisos producen contracciones lentas y sostenidas que normalmente son involuntarias. Nos ocuparemos de los músculos y su mecanismo de contracción en el capítulo 39.

#### **El tejido nervioso se especializa en transmitir señales eléctricas**

Podemos percibir y responder al mundo gracias al **tejido nervioso** que compone el cerebro, la médula espinal y los nervios que salen de ellos hacia todo el cuerpo. El tejido nervioso se compone de dos tipos de células: células nerviosas, también llamadas **neuronas** y células gliales. Las neuronas se especializan en la generación de señales eléctricas y en conducir éstas a otras neuronas, o bien, a los músculos o las glándulas (**FIGURA 31-10**). Las **células gliales** rodean, sostienen, aíslan eléctricamente y protegen a las neuronas. También regulan la composición del líquido intersticial del sistema nervioso, lo que permite a las neuronas funcionar de forma óptima. Explicaremos el tejido nervioso en el capítulo 38.

#### **Los órganos incluyen dos o más tipos de tejidos que interactúan**

Los órganos están formados de cuando menos dos tipos de tejido que funcionan juntos. Si un órgano es hueco, como la vejiga



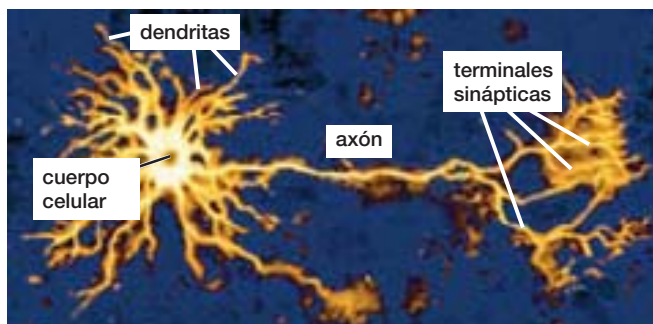
**FIGURA 31-9** El tejido muscular consiste en células contráctiles llamadas fibras musculares

La disposición regular de proteínas fibrosas dentro de las células musculares (llamadas fibras musculares) del músculo esquelético hace que este tejido, visto al microscopio, presente franjas o "estriás".

o los vasos sanguíneos, su interior está revestido de una membrana que consiste en tejido epitelial sostenido por tejido conectivo. Los distintos órganos tienen tipos y proporciones diferentes de tejidos conectivo, glandular, muscular y nervioso. La mayor parte de los órganos funcionan como parte de los sistemas de órganos, los cuales se explicarán en otros capítulos de esta unidad. En el siguiente apartado describiremos la piel (la cual no es parte de un sistema de órganos) como órgano representativo que incluye los cuatro tipos de tejidos.

#### **La piel ilustra las propiedades de un órgano**

En un sentido general, la estructura de la piel es representativa de muchos órganos. La capa exterior del tejido epitelial descansa sobre tejido conectivo que contiene un suministro de sangre, nervios, en algunos casos músculos y estructuras glandulares derivadas del epitelio. Aunque en ocasiones pasamos por alto la importancia de nuestra piel, ésta es de tal manera esencial como barrera contra infecciones y contra la pérdida de agua, que una destrucción a gran escala de la piel, por ejemplo, por quemaduras extensas, a menudo es mortal. La piel también ayuda a mantener la homeostasis al disipar o conservar el calor corporal, y servir como barrera contra los organismos patógenos.

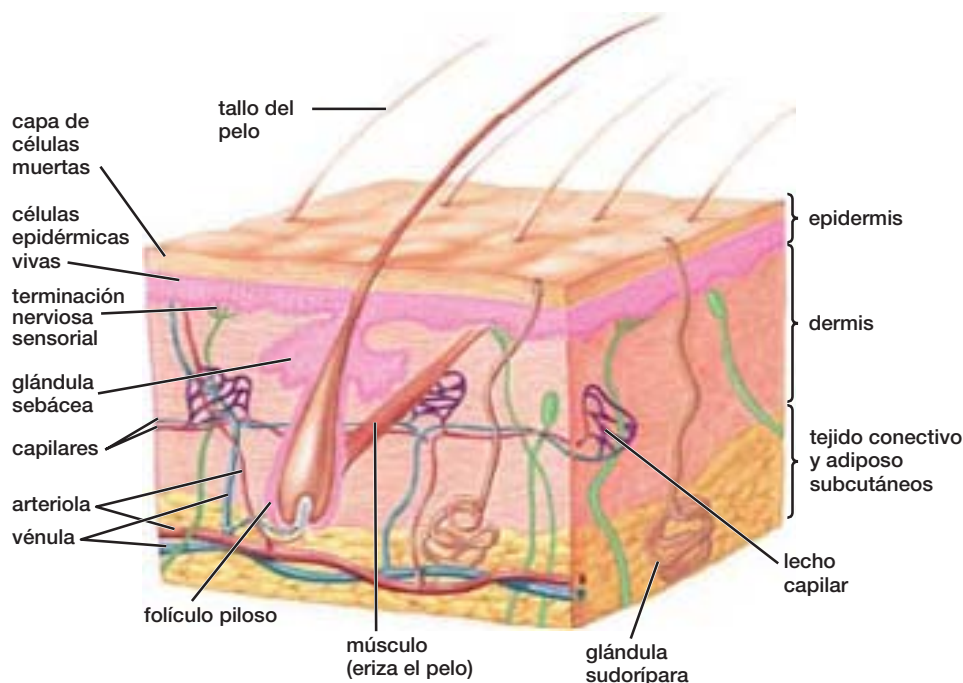


**FIGURA 31-10** Tejido nervioso

Las células nerviosas se especializan en recibir y transmitir señales. Esta micrografía muestra una neurona humana que estimula la contracción de las células musculares. Las dendritas se especializan en recibir las señales de otras neuronas, el axón porta la señal de salida de la neurona al músculo, y las terminales sinápticas transmiten la señal a las células musculares.

**FIGURA 31-11 La piel es un órgano**

Corte transversal de la piel de un mamífero, como órgano representativo. La piel es una membrana que contiene glándulas, músculos y células nerviosas. **PREGUNTA: ¿Por qué la piel se considera como un órgano y la sangre como un tejido?**



La **epidermis**, o capa externa de la piel, es un conjunto especializado de capas de tejido epitelial (estratificado) (FIGURA 31-11). Está recubierta por una capa protectora de células muertas producidas por las células vivas epidérmicas subyacentes. Estas células muertas forman un paquete con queratina proteínica, lo cual ayuda a que la piel sea elástica, resistente y relativamente impermeable.

Inmediatamente debajo de la epidermis hay una capa de tejido conectivo laxo, la **dermis**. Las células poco apretadas de la dermis son penetradas por *arteriolas* (pequeñas arterias), las cuales se alimentan de sangre bombeada desde el corazón a una densa malla de capilares que nutren el tejido tanto dérmico como epidérmico y desembocan en una red de *vénulas* (pequeñas venas) en la dermis. La pérdida de calor a través de la piel se regula con gran precisión mediante neuronas que controlan el grado de dilatación (expansión) de las arteriolas. Cuando se requiere enfriamiento, las arteriolas se dilatan e inundan los lechos capilares con sangre, lo que libera el exceso de calor. Cuando es preciso conservar el calor, las arteriolas que abastecen a los capilares de la piel se constriñen; por eso, los médicos que atendieron a Erika, observaron que ciertas partes de la piel de las manos de la niña se habían “quemado” por el frío. Los vasos linfáticos recogen y desechan el líquido extracelular que está dentro de la dermis. Varias terminaciones nerviosas sensoriales, que responden a la temperatura, el tacto, la presión, la vibración y el dolor, están diseminadas por toda la dermis y epidermis, con el fin de dar información al sistema nervioso.






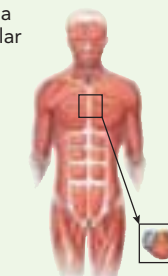




La dermis también incluye glándulas derivadas del tejido epitelial. Las glándulas llamadas **folículos pilosos** producen pelo a partir de secreciones proteínicas. Las glándulas sudoríparas producen secreciones acuosas que enfrían la piel y excretan sustancias como sal y urea. Las *glándulas sebáceas* secretan una sustancia aceitosa (el *sebo*) que lubrica el epitelio.

Además de los tejidos epitelial, conectivo y nervioso ya mencionados, la piel contiene también tejido muscular. Diminutos músculos sujetos a los folículos pilosos pueden hacer que los vellos de la piel “se ericen”, respondiendo a señales de neuronas motrices. Casi todos los mamíferos pueden aumentar el espesor de su pelaje aislante erizando pelos individuales cuando hace frío, pero esta reacción resulta inútil para retener el calor en los seres humanos, quienes simplemente experimentan la “carne de gallina” cuando estos pequeños músculos se contraen.

### Los sistemas de órganos consisten en dos o más órganos que interactúan

Los sistemas de órganos consisten en dos o más órganos individuales (a veces situados en diferentes regiones del cuerpo) que colaboran en el desempeño de una función común. Un ejemplo es el sistema digestivo, en el que la boca, el esófago, el estómago, los intestinos y otros órganos (como el hígado y el páncreas) que aportan secreciones digestivas colaboran para convertir los alimentos en moléculas de nutrientes (véase la figura 31-3). Los principales sistemas de órganos del cuerpo de los vertebrados y sus órganos representativos y funciones se presentan en la **tabla 31-1**.

**Tabla 31-1 Principales sistemas de órganos de los vertebrados**

Sistema de órganos	Principales estructuras	Papel fisiológico	Sistema de órganos	Principales estructuras	Papel fisiológico
<p>Sistema circulatorio</p> 	Corazón, vasos sanguíneos, sangre	Transporta nutrimentos, gases, hormonas, desechos metabólicos; también ayuda a controlar la temperatura	<p>Sistema endocrino</p>  <p>Masculino Femenino</p>	Diversas glándulas y órganos que secretan hormonas como el hipotálamo, la hipófisis o pituitaria, la tiroides, el páncreas, las suprarrenales, los ovarios y los testículos	Controla procesos fisiológicos, por lo regular junto con el sistema nervioso
<p>Sistema linfático/inmunitario</p> 	Linfa, nodos y vasos linfáticos, glóbulos blancos	Lleva grasa y líquidos en exceso a la sangre; destruye microbios invasores	<p>Sistema nervioso</p> 	Cerebro, médula espinal, nervios periféricos	Controla procesos fisiológicos junto con el sistema endocrino; detecta el medio y dirige el comportamiento
<p>Sistema digestivo</p> 	Boca, esófago, estómago, intestinos delgado y grueso, glándulas que producen secreciones digestivas	Abastece al cuerpo de nutrimentos que proporcionan energía y materiales para el crecimiento y el mantenimiento	<p>Sistema muscular</p>  <p>Músculo esquelético Músculo liso Músculo cardíaco</p>	Músculo esquelético Músculo liso Músculo cardíaco	Mueve el esqueleto  Controla el movimiento de sustancias a través de órganos huecos (tracto digestivo, grandes vasos sanguíneos) Inicia y efectúa las contracciones cardíacas
<p>Sistema urinario</p> 	Riñones, uréteres, vejiga, uretra	Mantiene condiciones homeostáticas dentro del torrente sanguíneo; filtra desechos celulares, ciertas toxinas y el exceso de agua y nutrimentos	<p>Sistema esquelético</p> 	Huesos, cartílago, tendones, ligamentos	Brinda sostén al cuerpo, sitios de sujeción para los músculos y protección para los órganos internos
<p>Sistema respiratorio</p> 	Nariz, tráquea, pulmones (mamíferos, aves, reptiles, anfibios), agallas (peces y algunos anfibios)	Proporciona un área para el intercambio de gases entre la sangre y el medio; permite la obtención de oxígeno y la eliminación de dióxido de carbono	<p>Sistema reproductor</p>  <p>Femenino Masculino</p>	Macho: testículos, vesículas seminales, próstata, pene  Hembra: ovarios, oviductos, útero, vagina, glándulas mamarias	Macho: produce espermatozoides, fecunda a la hembra  Hembra: produce óvulos, nutre al embrión en desarrollo

## OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿LA VIDA SUSPENDIDA?



Los animales, para mantenerse vivos, requieren de una dotación constante de ATP, lo que a su vez necesita un suministro constante de oxígeno. El frío retarda todas las reacciones bioquímicas; las tasas metabólicas (es decir, la rapidez con la que las células producen y utilizan la energía) tanto de Erika como de Anna y, por consiguiente, su necesidad de oxígeno, se redujeron radicalmente por las bajas temperaturas corporales. Mientras que el cerebro sufre un daño permanente después de cerca de cinco minutos sin oxígeno a una temperatura corporal normal, los cerebros de Erika y Anna no sufrieron ningún daño porque sobrevivieron más tiempo en un frío extremo. Los médicos, de forma rutinaria, aprovechan este hecho durante una cirugía de corazón abierto, al bajar la temperatura corporal del paciente de su lectura normal de 37°C a cerca de 18°C durante unos 45 minutos en que deja de latir el corazón. Los estudios realizados en anima-

les sugieren que aun un enfriamiento más intenso (como el que experimentaron Erika y Anna) prolonga el tiempo en que una persona puede permanecer sin peligro en un estado de animación suspendida.

En el Hospital General de Massachusetts el cirujano traumatólogo Hasan Alam realiza experimentos con cerdos; les extrae toda la sangre y la reemplaza con una disolución fría que contiene nutrientes. En este estado, con sus cuerpos enfriados a 10°C, los cerdos no tienen latidos cardíacos, no respiran y el cerebro no presenta actividad eléctrica. Tan pronto como se bombea la sangre caliente al cuerpo del animal, aun después de dos horas y media en tales condiciones, su corazón vuelve a latir y el animal revive. Las pruebas de comportamiento realizadas sugieren que los cerdos no experimentan un daño duradero. Es posible que en un futuro cercano se realicen ensayos clínicos utilizando este procedimiento en las víctimas de traumas que se encuentren a punto de morir a causa de una intensa pérdida de sangre. Al rem-

plazar la sangre que queda en la víctima con una disolución de nutrientes cerca del punto de congelamiento, los médicos tienen la esperanza de que entonces podrán disponer de un tiempo valioso para operar y reparar el daño antes de reanimar al paciente con sangre caliente.

**Piensa en esto** Los pacientes que están a punto de morir como resultado de intensas hemorragias no están en condiciones de dar su consentimiento para que les apliquen un procedimiento experimental. Por esta razón, el doctor Alam está trabajando para informar a toda la comunidad que atiende su hospital acerca del reemplazo experimental de sangre, y por ello está animando a quienes no desean participar a que lleven un brazalete que indique su decisión. Describe algunas de las ventajas y problemas potenciales de esta forma de obtener “voluntarios” para las pruebas clínicas.

## REPASO DEL CAPÍTULO

### RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

#### 31.1 Homeostasis: ¿Cómo regulan los animales su ambiente interno?

La homeostasis se refiere al equilibrio dinámico dentro del cuerpo animal por medio del cual las condiciones fisiológicas, que incluyen los niveles de temperatura, sal, oxígeno, glucosa, pH y agua, se mantienen dentro de un intervalo en el que las proteínas pueden funcionar y se dispone de energía. Los animales difieren en cuanto a la regulación de la temperatura. Los ectotérmicos obtienen la mayor parte de su calor corporal del medio y tienden a tolerar temperaturas corporales extremas. Los endotérmicos obtienen la mayor parte de su calor de las actividades metabólicas y tienden a regular su temperatura corporal dentro de un intervalo estrecho.

Las condiciones homeostáticas se mantienen a través de la retroalimentación negativa, en la cual un cambio activa una respuesta que lo contrarresta y restaura las condiciones del punto de referencia. Hay pocos casos de retroalimentación positiva, en los cuales un cambio inicia sucesos que lo intensifican (como las contracciones uterinas que conducen al nacimiento de un bebé), pero estas situaciones son todas autolimitantes a través de la retroalimentación negativa. Dentro del cuerpo animal, los mecanismos de retroalimentación múltiple trabajan al unísono.

#### Web tutorial 31.1 Homeostasis

#### 31.2 ¿Cómo está organizado el cuerpo animal?

El cuerpo animal se compone de sistemas que constan de dos o más órganos; éstos, a la vez, se componen de tejidos. Un tejido

es un conjunto de células y de material extracelular que forman una unidad estructural y funcional y se especializan para realizar una tarea específica. Los tejidos animales incluyen los epiteliales, conectivos, musculares y nerviosos.

El tejido epitelial forma cubiertas membranosas para las superficies externas e internas del cuerpo y también da origen a las glándulas. El tejido conectivo normalmente contiene una buena cantidad de material extracelular, llamada matriz, e incluye dermis, huesos, tendones, ligamentos, cartílagos, tejido adiposo y sangre. El tejido muscular se especializa en producir movimiento mediante contracciones. Hay tres tipos de tejido muscular: esquelético, cardíaco y liso. El tejido nervioso, que incluye neuronas y células gliales, se especializa en generar y conducir señales eléctricas.

Los órganos incluyen al menos dos tipos de tejidos que operan juntos. La piel de los mamíferos es un órgano representativo. La epidermis, un tejido epitelial, cubre la dermis; esta última contiene vasos sanguíneos y linfáticos, glándulas sudoríparas y sebáceas, así como diminutos músculos erectores del pelo. Entre los sistemas de órganos de los animales están el sistema digestivo, urinario, inmunario, respiratorio, circulatorio/linfático, nervioso, muscular, esquelético, endocrino y reproductor, que se resumen en la tabla 31-1.



## TÉRMINOS CLAVE

cartilago *pág. 642*  
 célula glial *pág. 643*  
 colágeno *pág. 641*  
 dermis *pág. 644*  
 ectotérmico *pág. 636*  
 endotérmico *pág. 636*  
 epidermis *pág. 644*  
 folículo piloso *pág. 644*  
 glándula *pág. 640*

glándula endocrina *pág. 641*  
 glándula exocrina *pág. 640*  
 homeostasis *pág. 636*  
 hormona *pág. 641*  
 hueso *pág. 642*  
 ligamento *pág. 641*  
 linfa *pág. 642*  
 músculo cardíaco *pág. 642*

músculo esquelético *pág. 642*  
 músculo liso *pág. 642*  
 neurona *pág. 643*  
 órgano *pág. 639*  
 retroalimentación negativa *pág. 638*  
 retroalimentación positiva *pág. 639*

sangre *pág. 642*  
 sistema *pág. 639*  
 tejido *pág. 639*  
 tejido adiposo *pág. 642*  
 tejido conectivo *pág. 641*  
 tejido epitelial *pág. 639*  
 tejido nervioso *pág. 643*  
 tendón *pág. 641*

## RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. Define y compara a los animales *ectotérmicos* y *endotérmicos*. Da un ejemplo de cada uno. ¿Los términos “de sangre fría” y “de sangre caliente” son formas precisas de describirlos? Explica por qué.
2. Define *homeostasis* y explica cómo la retroalimentación negativa ayuda a mantenerla. Explica un ejemplo de homeostasis en el cuerpo humano.
3. Explica la retroalimentación positiva y da un ejemplo fisiológico. Explica por qué este tipo de retroalimentación es relativamente raro en los procesos fisiológicos.
4. Explica lo que sucede en tu organismo para restablecer la temperatura de homeostasis cuando te sobrecalientas al hacer ejercicio en un día caluroso y húmedo.
5. Describe la estructura y las funciones del tejido epitelial.
6. ¿Qué propiedad distingue el tejido conectivo de otros tipos de tejido? Lista tres tipos generales de tejido conectivo y describe brevemente la función de cada uno.
7. Describe la piel, como un órgano representativo. Incluye los diversos tejidos que la componen y describe brevemente el papel que desempeña cada tejido.

## APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. ¿Por qué la vida terrestre presenta más dificultades para mantener la homeostasis que la acuática?
2. En respuesta al frío, explica cómo el comportamiento y los mecanismos inconscientes trabajan juntos para mantener la homeostasis térmica.
3. Las quemaduras de tercer grado suelen ser indoloras. La piel sólo se regenera a partir de los bordes de estas quemaduras. Las quemaduras de segundo grado se regeneran a partir de células situadas en los bordes de la quemadura, en los folículos pilosos y en las glándulas sudoríparas. Las quemaduras de primer grado son dolorosas, pero sanan rápidamente a partir de las células epidérmicas no dañadas. A partir de esta información, indica la profundidad de las quemaduras de primero, segundo y tercer grados en la figura 31-11.
4. Imagina que eres un profesional médico que imparte un curso prenatal para padres. Describe una analogía del mundo real con sensores, corrientes eléctricas, motores y demás para ilustrar las relaciones de retroalimentación que intervienen en la iniciación del parto, en términos comprensibles para una persona ordinaria.

## PARA MAYOR INFORMACIÓN

Bruemmer, F. “Five Days with Fat Hoods”. *International Wildlife*, enero-febrero de 1999. El crecimiento tan rápido y la prodigiosa capacidad para almacenar grasa de la foca de capucha le permiten adaptarse con el fin de mantener la homeostasis en las condiciones extremas de las regiones cercanas al Polo Norte.

Nuland, S. *The Wisdom of the Body*. Nueva York: Alfred A. Knopf, 1997. La fisiología humana vista a través de los ojos de un cirujano. Un relato de primera mano de la belleza y fuerza de los mecanismos del organismo para mantener la homeostasis.

Roth, M. B. y Nystul, T. “Buying Time in Suspended Animation”. *Scientific American*, junio de 2005. Este artículo escrito en forma atractiva ex-

plica cómo los estudios en animales sugieren que el estado de animación suspendida puede ayudar en el futuro a ganar tiempo para los órganos que han sido donados o para las víctimas de traumas.

Storey, K. B. y Storey, J. M. “Frozen and Alive”. *Scientific American*, diciembre de 1990. Algunos animales tienen adaptaciones especiales que les permiten soportar el congelamiento.

Trivedi, Bijal. “Life on Hold”. *New Scientist*, 21 de enero de 2006. Revisa la evidencia de los estudios en animales que sugiere que, por medio del frío o de sustancias químicas, los órganos o los cuerpos humanos dañados pueden ganar un tiempo valiosísimo al ser sometidos a un estado de animación suspendida.



Los compañeros de equipo de Darryl Kile lo observan lanzar la bola en un memorable servicio. (Imagen en recuadro) Una placa en esta arteria coronaria (una arteria que suministra sangre al corazón) estimuló la formación de un coágulo sanguíneo que obstruye por completo el conducto y evita que la sangre llegue a una parte del músculo cardíaco. Esta obstrucción provocará un ataque al corazón.

## DE UN VISTAZO

### ESTUDIO DE CASO: Muerte súbita

#### 32.1 ¿Qué características y funciones principales tienen los sistemas circulatorios?

Los animales tienen dos tipos de sistemas circulatorios  
El sistema circulatorio de los vertebrados tiene muy diversas funciones

#### 32.2 ¿Cómo funciona el corazón de los vertebrados?

Durante la evolución de los vertebrados han surgido corazones cada vez más complejos y eficientes  
El corazón de los vertebrados consta de dos cavidades musculares que forman dos bombas individuales

Guardián de la salud: Al rescate de los corazones enfermos

#### 32.3 ¿Qué es la sangre?

El plasma es primordialmente agua en la que se disuelven proteínas, sales, nutrimentos y desechos  
Los glóbulos rojos llevan oxígeno de los pulmones a los tejidos  
Los glóbulos blancos ayudan a defender al cuerpo contra las enfermedades  
Las plaquetas son fragmentos celulares que ayudan a coagular la sangre

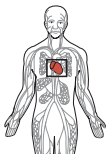
#### 32.4 ¿Qué tipos de vasos sanguíneos hay y qué funciones tienen?

Las arterias y arteriolas son vasos de paredes gruesas que transportan sangre desde el corazón  
Los capilares son vasos microscópicos que permiten el intercambio de nutrimentos y desechos entre la sangre y las células del cuerpo  
Las venas y vénulas llevan sangre de regreso al corazón  
Las arteriolas controlan la distribución del flujo sanguíneo

#### 32.5 ¿Cómo colabora el sistema linfático con el circulatorio?

Los vasos linfáticos se parecen a las venas y capilares del sistema circulatorio  
El sistema linfático devuelve líquidos a la sangre  
El sistema linfático transporta grasas del intestino delgado a la sangre  
El sistema linfático ayuda a defender al cuerpo contra las enfermedades

### OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Muerte súbita



## ESTUDIO DE CASO MUERTE SÚBITA

EL 22 DE JUNIO DE 2002 los Cardenales de San Luis se preparaban para el partido contra los Cachorros de Chicago. Conforme se aproximaba la hora del juego, todos ellos se sintieron intrigados, y luego preocupados, ante la inexplicable ausencia del pitcher, Darryl Kile. Su preocupación se convirtió en conmoción y aflicción cuando Kile, de 33 años, fue hallado muerto en la habitación de su hotel; al parecer, falleció durante el sueño. Reconocido como uno de los mejores pitchers del país y notable por sus excepcionales lanzamientos curvos, Kile era un deportista en la cúspide de su carrera. Pero la autopsia reveló que dos de sus tres arterias coronarias (las cuales suministran sangre al músculo cardíaco) estaban obstruidas entre

el 80 y 90 por ciento por aterosclerosis, una afección en la que el calibre de las arterias se reduce por la acumulación de depósitos de grasa que se conocen como placa (véase la imagen en el recuadro de la página anterior). El corazón de Kile también mostraba un tamaño mayor de lo normal, un resultado de sus heroicos intentos por forzar la circulación de la sangre por las arterias parcialmente obstruidas. Algunos rasgos genéticos heredados favorecen la formación de placa y pueden provocar niveles de acumulación de colesterol que pongan la vida de una persona en peligro a una edad mucho menor en comparación con quienes no presentan factores de riesgo. El hecho de que el padre de Kile muriera de un ataque al corazón a la

edad de 44 años sugiere que Darryl Kile se encontraba en este grupo de riesgo.

La aterosclerosis a menudo comienza en la niñez. Millones de niños en Estados Unidos presentan elevados niveles de colesterol, como consecuencia de dietas altas en grasas y falta de ejercicio; pero por lo general transcurren décadas antes de que la enfermedad se manifieste. ¿Cómo funciona el corazón? ¿Cómo se ve amenazado por la aterosclerosis y la hipertensión? ¿Qué tratamientos habrían podido beneficiar a Darryl Kile si él hubiera estado consciente de su condición?

### 32.1 ¿QUÉ CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONES PRINCIPALES TIENEN LOS SISTEMAS CIRCULATORIOS?

Hace miles de millones de años, el mar en el que evolucionaron las primeras células se encargaba de nutrirlas. El agua aportaba nutrimentos, los cuales se difundían en el interior de las células; el agua también se llevaba los desechos de estas últimas, que salían por difusión. En la actualidad, los microorganismos y algunos animales multicelulares simples siguen dependiendo casi exclusivamente de la difusión para intercambiar nutrimentos y desechos con el ambiente. Las esponjas, por ejemplo, hacen circular agua de mar a través de los poros de su cuerpo para acercar el entorno a cada célula. A medida que evolucionaron animales más grandes y complejos, sus células individuales fueron quedando cada vez más lejos del mundo exterior. Sin embargo, las continuas exigencias celulares requieren que las distancias de difusión sean cortas para que lleguen suficientes nutrimentos a las células y éstas no se envenenen con sus propios desechos. Con la evolución del sistema circulatorio, se creó una especie de “mar interno”, cuya función es la misma que desempeñaba el mar con las primeras células. Este mar interno transporta alimento y oxígeno a cada célula y se lleva los desechos que ésta produce.

Todos los sistemas circulatorios tienen tres partes principales:

- La **sangre**, un líquido que actúa como medio de transporte.
- Un sistema de canales, o **vasos sanguíneos**, que conducen la sangre por todo el cuerpo.

- Una bomba, el **corazón**, que mantiene a la sangre en circulación.

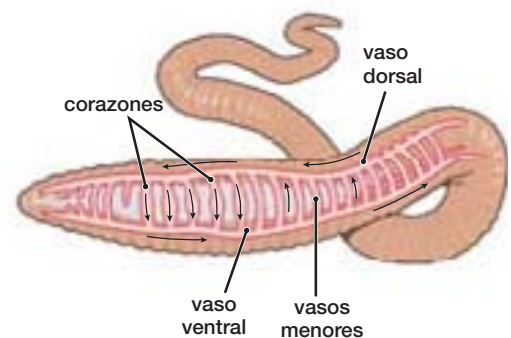
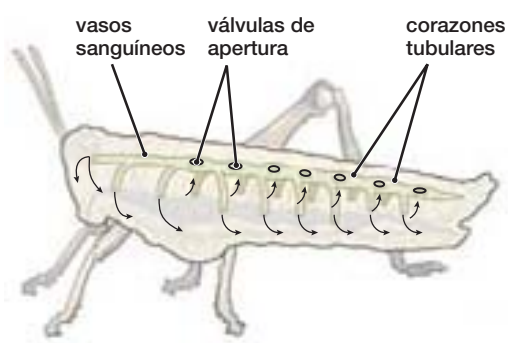
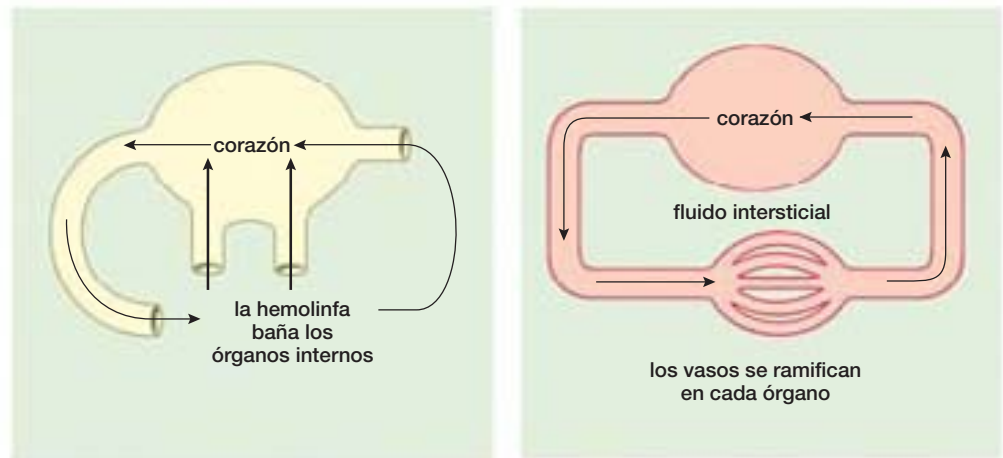
#### Los animales tienen dos tipos de sistemas circulatorios

Los animales tienen uno de dos tipos principales de sistema circulatorio: abierto o cerrado. Los **sistemas circulatorios abiertos** se encuentran en muchos invertebrados, entre ellos los artrópodos —que incluyen a los crustáceos, las arañas y los insectos— y los moluscos, como los caracoles y las almejas. Estos animales tienen uno o más “corazones” simples, una red de vasos sanguíneos y un espacio abierto grande dentro del cuerpo llamado **hemocele** (FIGURA 32-1a). Dentro del hemocele (que podría ocupar del 20 al 40 por ciento del volumen corporal), la sangre baña directamente los tejidos y órganos internos. En los insectos el corazón es una porción modificada del vaso sanguíneo dorsal, que consiste en una serie de cavidades que se contraen. Cuando esto último sucede, las válvulas en el corazón se cierran, lo que obliga a la sangre a salir por los vasos hacia el hemocele. Cuando las cavidades del corazón se relajan, la sangre vuelve a entrar en ellos proveniente del hemocele.

Los **sistemas circulatorios cerrados** también se encuentran en invertebrados como la lombriz de tierra (FIGURA 32-1b) y moluscos muy activos, como los calamares y pulpos, pero son característicos de todos los vertebrados, incluido el ser humano. En los sistemas circulatorios cerrados, la sangre (cuyo volumen representa sólo entre el 5 y 10 por ciento del volumen del cuerpo) está confinada al corazón y a una serie continua de vasos sanguíneos. Estos sistemas permiten un flujo más rápido.

**FIGURA 32-1** Sistemas circulatorios abierto y cerrado

(arriba) En el sistema circulatorio abierto de los artrópodos, un corazón bombea sangre a través de vasos hacia el hemocele, donde baña directamente a los demás órganos. (abajo) El saltamontes es un buen ejemplo de un sistema circulatorio abierto (la sangre del insecto carece de hemoglobina y es de una tonalidad verde pálido o casi transparente). **b)** (arriba) En un sistema circulatorio cerrado, la sangre queda confinada al corazón (o corazones) y a los vasos sanguíneos. (abajo) En la lombriz de tierra, cinco vasos contráctiles actúan como corazones y bombean sangre a través de vasos ventrales y dorsales principales de los que salen vasos más pequeños. La sangre de la lombriz de tierra, al igual que la nuestra, contiene hemoglobina roja.



do de la sangre, un transporte más eficiente de los desechos y nutrientes, así como una presión sanguínea más alta que en los sistemas abiertos. En la lombriz de tierra, por ejemplo, cinco vasos contráctiles actúan como corazones: bombean sangre a través de vasos principales de los que salen vasos más pequeños.

### El sistema circulatorio de los vertebrados tiene muy diversas funciones

El sistema circulatorio apoya a todos los demás sistemas de órganos del cuerpo. Los sistemas circulatorios de los seres humanos y otros vertebrados desempeñan las siguientes funciones:

- Transportan oxígeno de los pulmones o las branquias a los tejidos y transportan dióxido de carbono de los tejidos a los pulmones o las branquias.
- Distribuyen nutrientes del aparato digestivo a todas las células del cuerpo.
- Transportan productos de desecho y sustancias tóxicas al hígado (donde se elimina la toxicidad de muchas de ellas) y al riñón para ser excretados.
- Distribuyen hormonas de las glándulas y los órganos que las producen a los tejidos en los que actúan.
- Regulan la temperatura del cuerpo, lo cual se logra en parte ajustando el flujo sanguíneo.
- Evitan la pérdida de sangre mediante el mecanismo de coagulación.
- Protegen al cuerpo contra bacterias y virus gracias a los anticuerpos y glóbulos blancos que circulan en la sangre.

En los siguientes apartados examinaremos las tres partes del sistema circulatorio: el corazón, la sangre y los vasos, haciendo hincapié en el sistema circulatorio de los seres humanos. Por último, describiremos el sistema linfático, que colabora íntimamente con el sistema circulatorio.

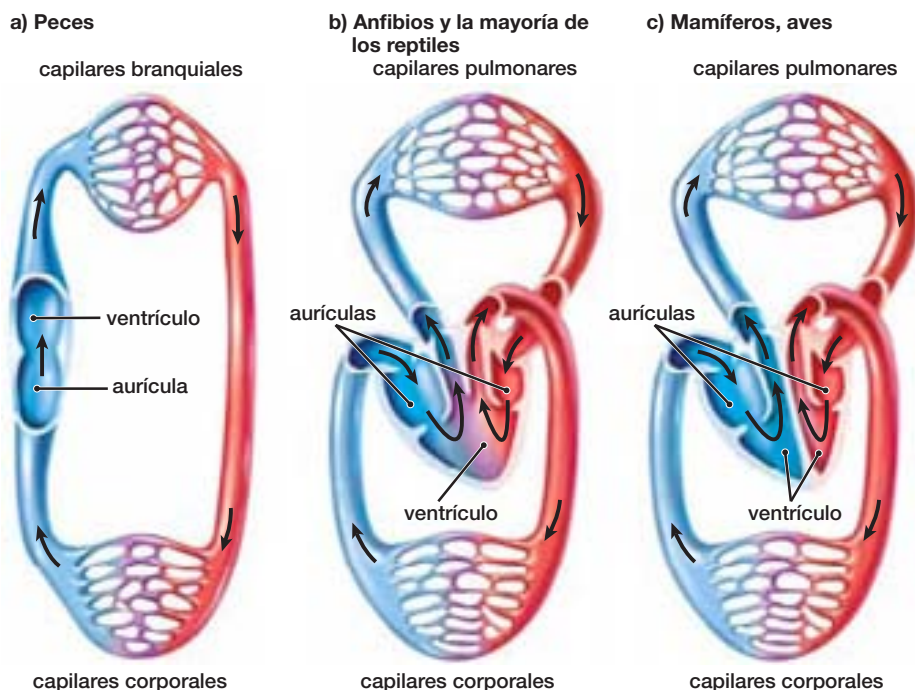
## 32.2 ¿CÓMO FUNCIONA EL CORAZÓN DE LOS VERTEBRADOS?

**Durante la evolución de los vertebrados han surgido corazones cada vez más complejos y eficientes**

Un sistema circulatorio no podría funcionar adecuadamente sin una bomba confiable. Es preciso desplazar sangre por todo el cuerpo de forma continua durante toda la vida del animal. El corazón de los vertebrados consta de cavidades musculares que pueden contraerse con fuerza. Las cavidades llamadas **aurículas** captan sangre; sus contracciones envían sangre a los **ventrículos**, que son cavidades cuyas contracciones hacen circular la sangre por el cuerpo. A lo largo de la evolución de los vertebrados, el corazón se ha vuelto cada vez más complejo, con más separación entre la sangre oxigenada (que captó oxígeno en los pulmones o las branquias) y la sangre desoxigenada (la cual, al pasar por los tejidos del cuerpo, perdió oxígeno).

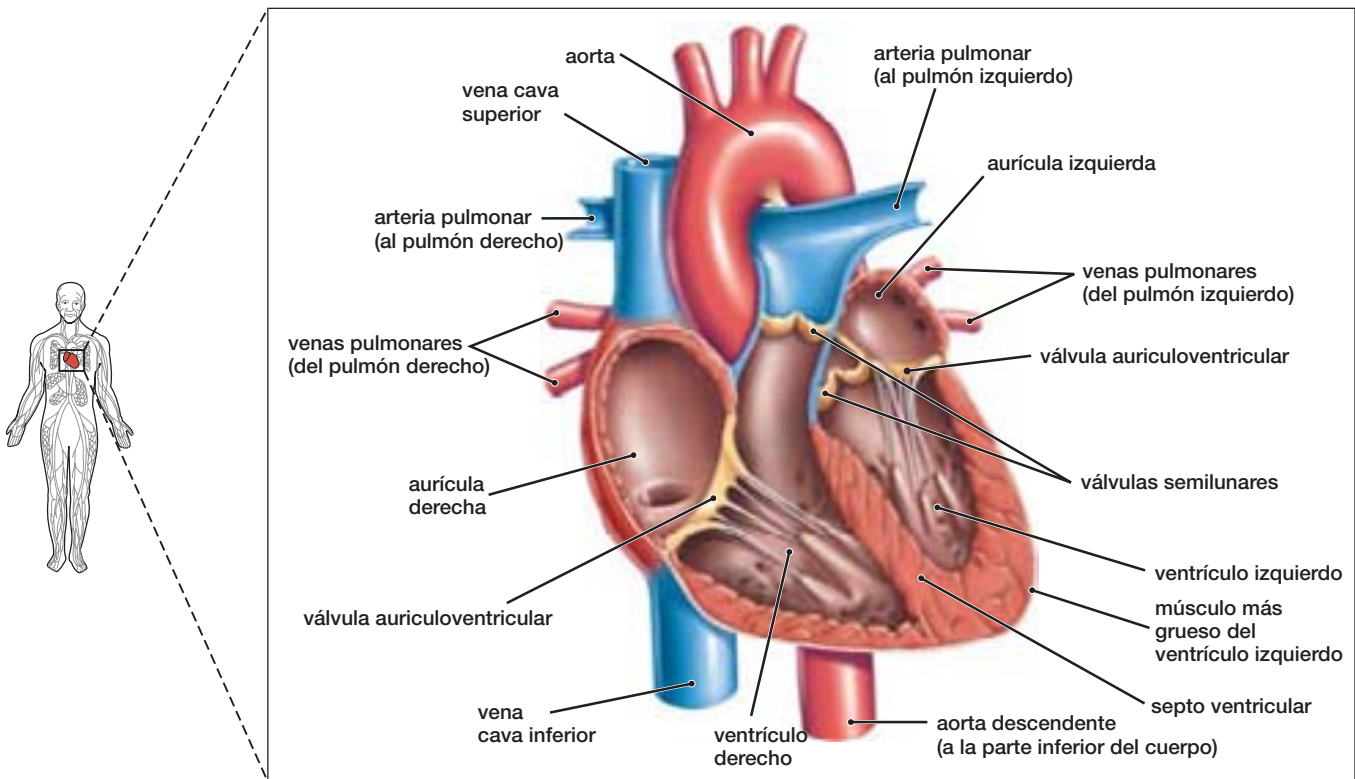
El corazón de los peces, los primeros vertebrados que aparecieron, consiste en cavidades contráctiles: una sola aurícula que se comunica con un solo ventrículo (**FIGURA 32-2a**). La sangre bombeada desde el ventrículo pasa primero por los *capilares*, vasos de paredes delgadas, donde capta oxígeno y libera dióxido de carbono. De ahí, la sangre viaja al resto del cuerpo. A través de los capilares del cuerpo, la sangre suministra oxígeno a los tejidos y recoge dióxido de carbono.

A lo largo del tiempo evolutivo, conforme los peces dieron origen a los anfibios, y éstos a los reptiles, surgió un corazón de tres cavidades: dos aurículas y un ventrículo (**FIGURA 32-2b**). En los corazones de tres cavidades de los anfibios y la mayoría de los reptiles, la sangre desoxigenada del cuerpo llega a la aurícula derecha, mientras la sangre proveniente de los pulmones llega a la aurícula izquierda. Ambas aurículas vacían su contenido en el único ventrículo. Aunque hay algo de mezcla



**FIGURA 32-2** Evolución del corazón de los vertebrados

**a)** El corazón más primitivo de los vertebrados está representado por el corazón de dos cavidades de los peces. **b)** Los anfibios y casi todos los reptiles tienen un corazón con dos aurículas, de las cuales la sangre pasa a un único ventrículo. Muchos reptiles tienen una pared parcial a la mitad del ventrículo. **c)** El corazón de las aves y los mamíferos en realidad consiste en dos bombas individuales que impiden la mezcla de sangre oxigenada y desoxigenada. La sangre oxigenada se ilustra de color rojo, y la desoxigenada, de color azul.



**FIGURA 32-3** El corazón humano con sus válvulas y vasos

Este corazón se dibujó como si estuviera en un cuerpo frente al lector, de manera que la derecha y la izquierda aparecen invertidas. Las paredes del ventrículo izquierdo están engrosadas porque deben bombear sangre a todo el cuerpo. Las válvulas semilunares separan la aorta del ventrículo izquierdo, y la arteria pulmonar del ventrículo derecho. Válvulas auriculoventriculares separan las aurículas de los ventrículos.

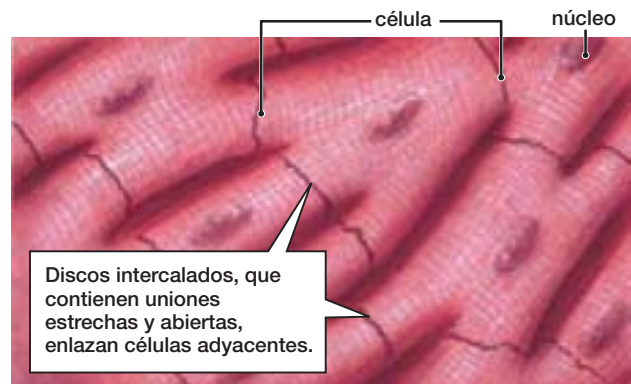
aquí, la sangre desoxigenada tiende a permanecer en la parte derecha del ventrículo para ser bombeada a los vasos que llegan a los pulmones, mientras que la mayor parte de la sangre oxigenada permanece en la porción izquierda del ventrículo y es bombeada al resto del cuerpo. En los reptiles, la separación es más notable porque hay una pared parcial entre las partes derecha e izquierda del ventrículo. En el corazón de cuatro cavidades de aves y mamíferos (**FIGURA 32-2c**) los ventrículos izquierdo y derecho están separados, lo que impide que la sangre oxigenada y la desoxigenada se mezclen.

### El corazón de los vertebrados consta de dos cavidades musculares que forman dos bombas individuales

#### Las venas transportan la sangre al corazón, y las arterias la extraen

El corazón de las aves y los mamíferos, incluido el ser humano, puede verse como dos bombas individuales, cada una con dos cavidades. En cada bomba, una aurícula recibe y retiene brevemente la sangre, y la pasa a un ventrículo que la impulsa hacia el cuerpo (**FIGURA 32-3**). Una bomba, formada por la aurícula derecha y el ventrículo derecho, bombea sangre desoxigenada. La aurícula derecha recibe del cuerpo sangre sin oxígeno a través de dos grandes **venas**, que son vasos que llevan sangre al corazón: la *vena cava superior* y la *vena cava inferior*. Después de llenarse con sangre, la aurícula derecha se contrae y empuja sangre hacia el ventrículo derecho. La contracción de éste envía la sangre sin oxígeno a los pulmones, a través de las **arterias pulmonares**, que son vasos que llevan

sangre proveniente del corazón. La otra bomba, formada por la aurícula y el ventrículo izquierdos, bombea sangre oxigenada. Sangre rica en oxígeno proveniente de los pulmones ingresa en la aurícula izquierda a través de las venas pulmonares y de ahí pasa al ventrículo izquierdo. Las vigorosas contracciones de este ventrículo, que es la cavidad más musculosa del corazón, empujan la sangre oxigenada por una arteria principal, la *aorta*, al resto del cuerpo.



**FIGURA 32-4** Estructura del músculo cardíaco

Las células del músculo cardíaco están ramificadas; discos intercalados unen células adyacentes. **PREGUNTA:** Si un músculo se ejercita continuamente, aumenta su tamaño. ¿Por qué el ritmo cardíaco de un atleta en buena condición es más lento durante el reposo que el ritmo cardíaco de una persona menos activa?

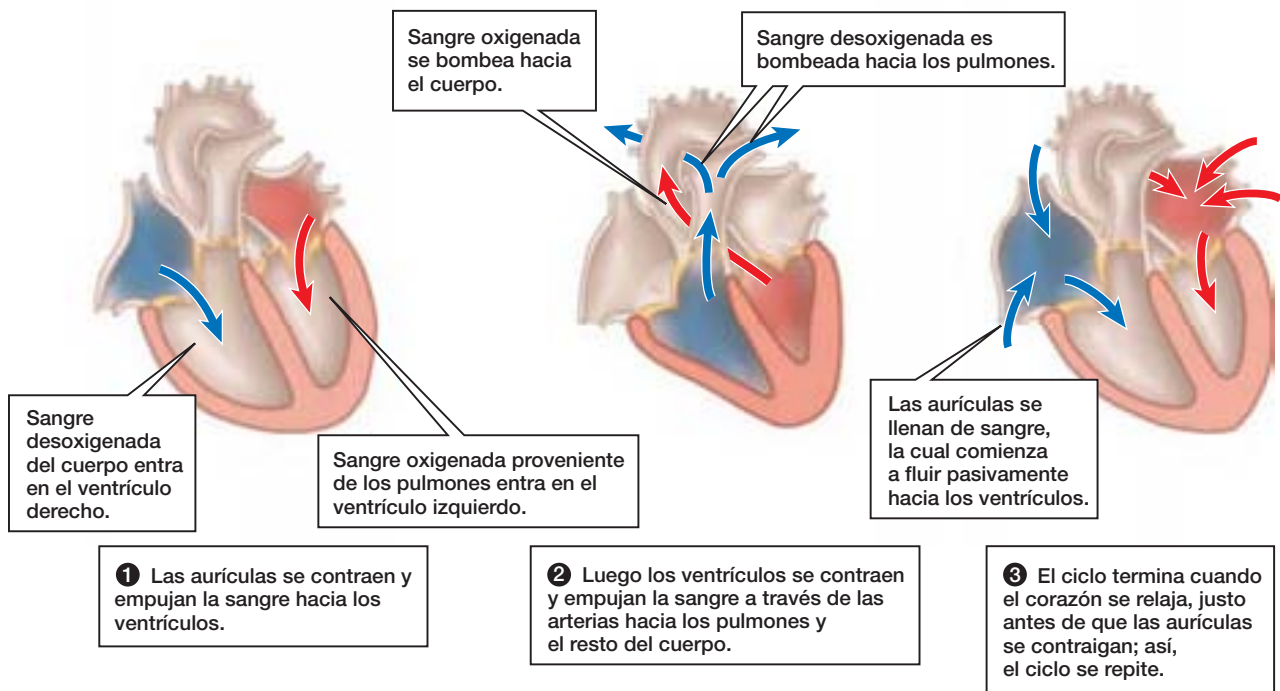


FIGURA 32-5 El ciclo cardíaco

### El músculo cardíaco está presente sólo en el corazón

Cada célula del **músculo cardíaco** es pequeña, ramificada y contiene fibras de proteína que le dan su apariencia de franjas (FIGURA 32-4). Las células del músculo cardíaco están unidas entre sí mediante *discos intercalados* que aparecen como bandas entre las células. Los discos intercalados contienen uniones estrechas (*desmosomas*) y uniones abiertas (poros que conectan células adyacentes). Los desmosomas evitan que las fuertes contracciones del corazón separen las células musculares. Las uniones abiertas permiten que la señal eléctrica que

desencadena las contracciones pase de manera directa y rápida de una célula muscular a las adyacentes. Esto provoca que regiones interconectadas del músculo cardíaco se contraigan casi de forma sincrónica.

### Las contracciones coordinadas de las aurículas y los ventrículos producen el ciclo cardíaco

El corazón humano late unas 100,000 veces al día. Durante cada latido, las dos aurículas se contraen en sincronía para vaciar su contenido a los ventrículos. Una fracción de segundo después, los dos ventrículos se contraen simultáneamente, impulsando la sangre hacia las arterias que salen del corazón. Luego, tanto las aurículas como los ventrículos se relajan brevemente antes de que este **ciclo cardíaco** se repita (FIGURA 32-5). Al ritmo cardíaco normal en reposo, el ciclo dura poco menos de un segundo. El ciclo cardíaco está relacionado con la medición de la presión arterial (FIGURA 32-6); la *presión sistólica* (la más



FIGURA 32-6 Medición de la presión arterial

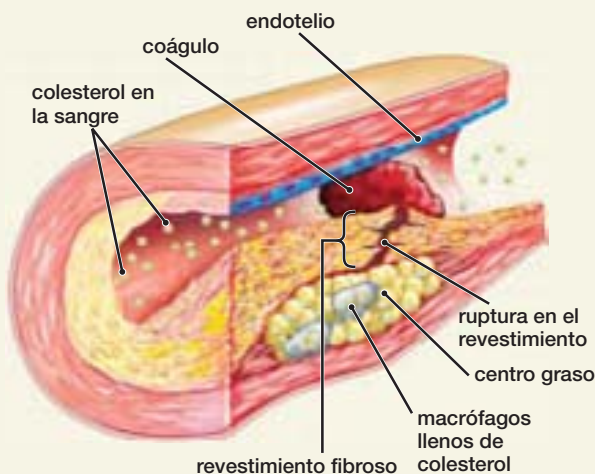
Primero, la banda se infla hasta que su presión cierra la arteria principal del brazo; luego se reduce gradualmente la presión. En el momento en que empieza a percibirse el pulso en la arteria con el estetoscopio, las contracciones del ventrículo izquierdo apenas están venciendo la presión de la banda y la sangre comienza a fluir. Esta presión se registra como la lectura más alta: la presión sistólica. Luego se sigue reduciendo la presión de la banda hasta que deja de percibirse el pulso, lo que indica que la sangre está fluyendo continuamente por la arteria. En otras palabras, la presión que prevalece entre las contracciones ventriculares apenas logra vencer la presión de la banda. Ésta es la lectura baja: la presión diastólica. Las cifras se dan en milímetros de mercurio, unidad de presión estándar que también se usa en los barómetros. **EJERCICIO:** Traza una gráfica que muestre cómo cambia la presión sanguínea dentro de una arteria durante el ciclo cardíaco. En la gráfica, señala los puntos que corresponden a la presión sanguínea sistólica y diastólica, medidas por la banda.

Las *enfermedades cardiovasculares* (desórdenes del corazón y los vasos sanguíneos) son la principal causa de muerte en Estados Unidos. Según la Asociación Estadounidense de Cardiología, las enfermedades cardiovasculares cobran una vida cada 35 segundos, lo que representa más de 900,000 muertes al año en ese país, algo que no sorprende. El corazón debe contraerse vigorosamente más de 2500 millones de veces en la vida, sin detenerse un momento a descansar, bombeando sangre por vasos cuya longitud total daría dos veces la vuelta al mundo. Como esos vasos podrían constreñirse, debilitarse u obstruirse por diversos motivos, el sistema cardiovascular es un candidato de importancia para un funcionamiento defectuoso.

**LA ATEROSCLEROSIS OBSTRUYE LOS VASOS SANGUÍNEOS**

La **aterosclerosis** (que proviene de las palabras griegas *athera*, que significa “papilla” o “engrudo”, y *scleros*, “duro”) hace que las paredes de las arterias grandes se engruesen y pierdan elasticidad. Ello se debe a depósitos, llamados **placas**, dentro de las paredes arteriales. Uno de los principales factores de riesgo para la formación de placa es un alto nivel de *colesterol LDL*, que consiste en moléculas de colesterol unidas a moléculas portadoras formadas a partir de lípidos y proteínas (lipoproteínas de baja densidad, *LDL*). Al parecer, la formación de placa se inicia por un daño menor en el revestimiento endotelial de las arterias, que puede ser provocado por hipertensión, toxinas provenientes del humo del cigarrillo, o por otros factores. El endotelio dañado atrae glóbulos blancos, que excavan debajo de él e ingieren grandes cantidades de colesterol y otros lípidos. Los cuerpos hinchados de estos macrófagos contribuyen a hacer crecer el centro graso de la placa. Mientras tanto, células musculares lisas de la parte inferior del endotelio migran hacia el centro, absorben más grasa y colesterol y contribuyen a engrosar la placa. También producen proteínas que forman un revestimiento fibroso que reemplaza el endotelio dañado y cubre el centro graso (**FIGURA E32-1**).

El revestimiento fibroso podría romperse, exponiendo a la sangre a factores que promueven la formación de coágulos dentro de la placa. Estos coágulos obstruyen aún más la arteria y podrían bloquearla por completo (véase la imagen en el re-



**FIGURA E32-1** Las placas obstruyen las arterias  
 Cuando el revestimiento fibroso se rompe, se forma un coágulo que obstruye la arteria.

cuadro al inicio de este capítulo). Otra posibilidad es que el coágulo sea transportado por el torrente sanguíneo hasta bloquear una parte más estrecha de la arteria. Los coágulos arteriales son la causa de las consecuencias más graves de la aterosclerosis: los *infartos al miocardio* y los *accidentes cerebrovasculares*.

Se presenta un **infarto al miocardio** cuando se bloquea una de las arterias que suministran sangre al músculo cardíaco. Privado de nutrimentos y oxígeno, el músculo cardíaco abastecido por la arteria bloqueada muere de forma rápida y dolorosa. Aunque los infartos al miocardio son la principal causa de muerte por aterosclerosis, esta enfermedad hace que se formen placas y coágulos en arterias de todo el cuerpo. Si un coágulo obstruye una arteria que abastece al cerebro, puede causar un **accidente cerebrovascular**, que también se conoce como *infarto cerebral*. Los accidentes cerebrovasculares pueden tener graves consecuencias porque las células del cerebro requieren de una gran cantidad de oxígeno y mueren en minutos si la sangre no llega a ellas. Dependiendo del grado o ubicación del daño cerebral, los accidentes cerebrovasculares provocan una variedad de problemas neurológicos incluyendo parálisis parcial, dificultades para recordar, comunicarse o aprender, cambios repentinos de humor o cambios en la personalidad.

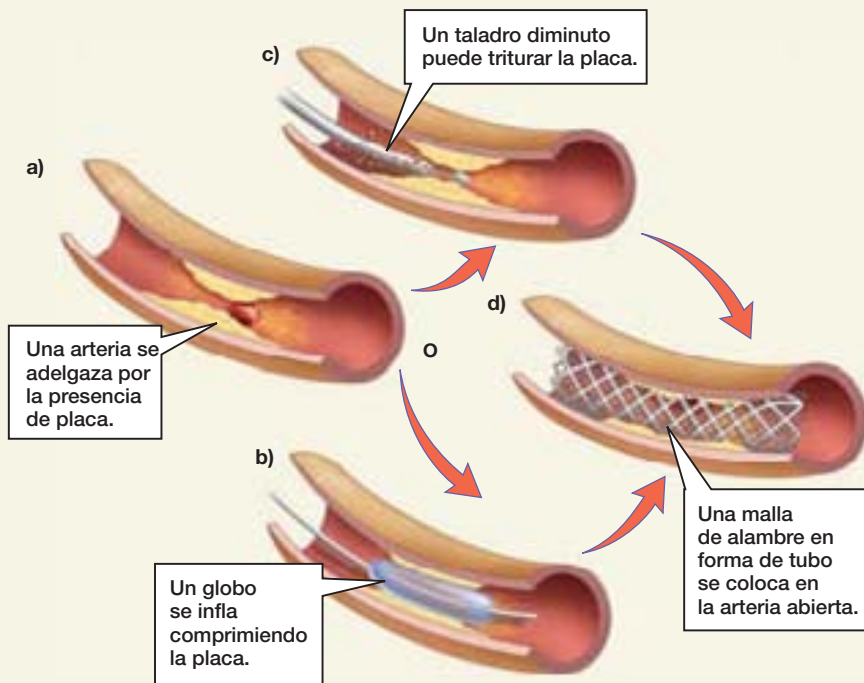
**TRATAMIENTO PARA LA ATEROSCLEROSIS**

Las causas de la aterosclerosis son la hipertensión, el tabaquismo, la obesidad, la diabetes, la falta de ejercicio y la predisposición genética, así como niveles elevados de colesterol LDL en la sangre. El tratamiento tradicional de la aterosclerosis incluye cambios en la dieta y el estilo de vida, pero si esto falla, existen medicamentos que pueden bajar los niveles de colesterol. Si una persona sufrió un accidente cerebrovascular o padece de **angina de pecho**, que es dolor en el pecho provocado por un suministro insuficiente de sangre al corazón, podría ser un candidato a cirugía para ensanchar la arteria obstruida o una cirugía de derivación coronaria (*bypass*).

La *angioplastia* se refiere a técnicas que permiten ensanchar las arterias coronarias obstruidas (**FIGURA E32-2**). Todos estos procedimientos implican hacer deslizar un tubo delgado y flexible a través de una arteria en el muslo o el brazo y guiarlo hasta la arteria obstruida. En la angioplastia de globo, el tubo tiene en el extremo un pequeño globo que se infla, comprimiendo la placa y permitiendo que la sangre fluya más libremente (**FIGURA E32-2b**). De manera alternativa, el globo podría estar equipado con unas pequeñas navajas giratorias que cortan la placa conforme ésta se comprime. Otro método utiliza un pequeño taladro de elevada rapidez con punta de diamante que tritura la placa en piezas microscópicas, las cuales son transportadas por la sangre (**FIGURA E32-2c**). Después de que los médicos eliminan la placa, a menudo insertan una malla de alambre en forma de tubo o *stent* dentro de la arteria para ayudar a mantenerla abierta (**FIGURA E32-2d**).

La *cirugía de derivación coronaria* o *bypass* consiste en pasar por alto una o más arterias coronarias obstruidas, con un trozo de vena (por lo regular obtenido de la pierna del paciente; **FIGURA E32-3**) o de una arteria (a menudo del antebrazo del paciente). Pero remover una vena es un procedimiento doloroso y que lleva mucho tiempo; además, miles de pacientes que podrían beneficiarse con una operación de este tipo no tienen vasos sanguíneos adecuados para injertarse. En un esfuerzo por ayudar a estos pacientes, los investigadores están tratando de desarro-



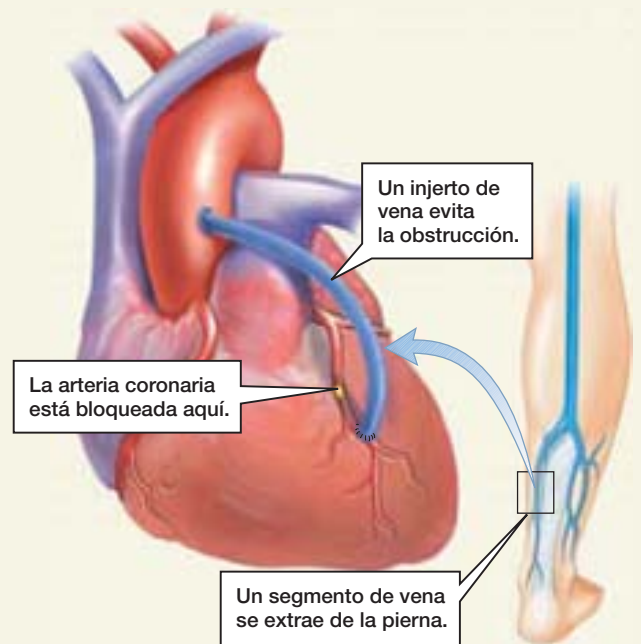


**FIGURA E32-2** La angioplastia destapa las arterias

a) Una arteria adelgazada puede abrirse mediante un procedimiento consistente en b) inflar un pequeño globo en su interior o en c) triturar la placa. Después de la angioplastia, d) una malla de metal en forma de tubo se inserta para mantener la arteria abierta.

llar vasos artificiales. La proteína de colágeno de cerdos o vacas, moldeada en forma de tubos, podría colocarse en un caldo nutritivo con células de vasos sanguíneos o injertarse directamente en los vasos de animales de experimentación. Las células vivas de vasos sanguíneos invadirán y cubrirán estos tubos para formar vasos funcionales, al menos temporalmente. Un nuevo procedimiento utiliza las propias células del paciente, cultivadas en un recipiente de plástico en el laboratorio. Aunque este procedimiento parece prometedor, requerirá de años para desarrollarse y probarse antes de que se utilice en los seres humanos.

Si ocurre un infarto al miocardio, un tratamiento oportuno puede minimizar el daño e incrementar significativamente las oportunidades de supervivencia del paciente. Los coágulos en las arterias coronarias o en el cerebro pueden disolverse inyectando una proteína "destructora de coágulos" (activador plasminógeno del tejido, tPA), que activa una enzima (la plasmina), la cual se encarga de romper la fibrina, la proteína que mantiene unidos los coágulos de sangre. Este medicamento es efectivo sólo si se administra en las siguientes horas después de que ocurre la obstrucción, de manera que muchos pacientes pierden esta oportunidad para tener una mejor recuperación. Recientemente, un agente destructor de coágulos más potente se probó en seres humanos, con resultados alentadores. Esta proteína se llama DSPA, que significa *Activador plasminógeno salival del Desmodus*, y se descubrió en la saliva del vampiro (del género *Desmodus*), el cual secreta la sustancia para que el proceso de coagulación no interfiera con su alimento consistente en sangre. Esta proteína única no sólo funciona mejor, sino que puede administrarse incluso nueve horas después de que se forma un coágulo, por lo que podría ayudar a muchas más personas en comparación con la tPA. Aunque las enfermedades cardíacas siguen siendo la principal causa de muerte en Estados



**FIGURA E32-3** Cirugía de derivación coronaria o bypass

Unidos, un consistente progreso en el tratamiento ha reducido significativamente la tasa de muertes y las discapacidades derivadas de la aterosclerosis.

alta de las dos lecturas) se mide durante la contracción ventricular y la *presión diastólica* se mide entre contracciones. La presión sanguínea alta, también llamada **hipertensión**, es causada por la constricción de las arteriolas, lo que provoca resistencia al flujo sanguíneo y tensión en el corazón. En la mayoría de los casos, la causa es desconocida. Una lectura aproximada en el límite de la presión alta es 140/90. La hipertensión también contribuye al “endurecimiento de las arterias”, como se describe en la sección “Guardián de la Salud: Al rescate de los corazones enfermos”.

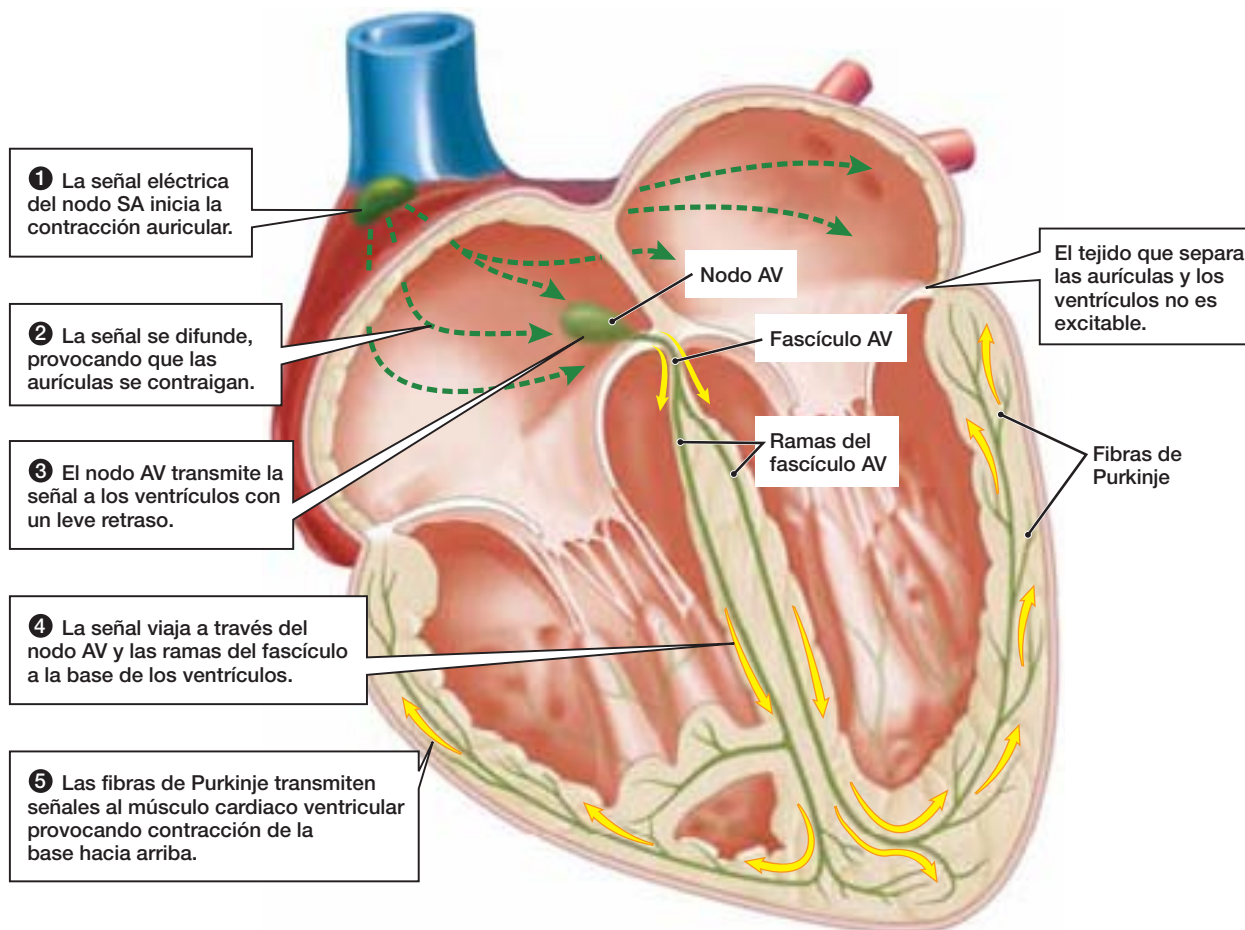
### Las válvulas mantienen la dirección del flujo sanguíneo e impulsos eléctricos coordinan la sucesión de contracciones

Cuando los ventrículos se contraen, la sangre debe salir por las arterias y no regresar a las aurículas. Luego, una vez que la sangre ha entrado en las arterias, debe impedirse que regrese al corazón cuando éste se relaja. Válvulas unidireccionales se encargan de mantener la dirección del flujo sanguíneo (véase las figuras 32-3 y 32-5). La presión en una dirección las abre fácilmente, pero la presión inversa las cierra herméticamente. Las **válvulas auriculoventriculares** permiten que la san-

gre fluya de las aurículas a los ventrículos (pero no a la inversa), y las **válvulas semilunares** permiten que entre sangre en la arteria pulmonar y en la aorta cuando se contraen los ventrículos, pero impiden que regrese cuando éstos se relajan. No hay válvulas que separen las aurículas izquierda y derecha de la vena pulmonar y de las venas cavas, respectivamente. De hecho, cuando las aurículas se contraen, algo de sangre fluye de regreso en estas venas; pero puesto que los ventrículos se llenan adecuadamente a pesar de este flujo hacia atrás, no se han desarrollado válvulas en esos lugares.

La contracción del corazón se inicia y coordina por medio de un **marcapasos**, un cúmulo de células especializadas de músculo cardíaco que producen señales eléctricas espontáneas a un ritmo regular. Estas señales eléctricas se transmiten entre las células musculares del corazón y las estimulan a contraerse. El marcapasos primario del corazón es el **nodo sinoauricular (SA)**, situado en la pared superior de la aurícula derecha (**FIGURA 32-7**). Las uniones abiertas que unen células cardíacas adyacentes permiten que las señales eléctricas pasen libre y rápidamente de las células cercanas al marcapasos a las células auriculares colindantes.

Durante el ciclo cardíaco, las aurículas se contraen primero y vierten su contenido en los ventrículos, luego se vuelven



a llenar mientras los ventrículos se contraen. Así, hay un retraso entre la contracción auricular y la ventricular. ¿Cómo se realiza esto? Desde el nodo SA, un impulso eléctrico crea una ola de contracción que corre por los músculos tanto de la aurícula derecha como de la izquierda, las cuales se contraen en sincronía. Luego, la señal llega a una barrera de tejido no excitable entre las aurículas y los ventrículos. Ahí, la excitación se canaliza a través del **nodo auriculoventricular (AV)**, una masa pequeña de células musculares especializadas situadas en la base de la aurícula derecha (véase la figura 32-7). El impulso se conduce lentamente en el nodo AV y pospone brevemente la contracción ventricular. Este retraso da tiempo a las aurículas para completar la transferencia de sangre a los ventrículos, antes de que se inicie la contracción ventricular. Desde el nodo AV, la señal de contracción se difunde a lo largo de tractos especializados de fibras musculares de conducción rápida, comenzando con el *fascículo AV*, que envía sus ramas, llamadas *ramas del fascículo AV*, a la parte inferior de ambos ventrículos. Aquí, los tractos se ramifican aún más para formar las **fibras de Purkinje**, las cuales transmiten la señal eléctrica de contracción hacia arriba dentro de las paredes ventriculares (véase la figura 32-7). El impulso viaja rápidamente por estas fibras y luego a través de las fibras musculares cardíacas comunicantes, lo que hace que los ventrículos se contraigan simultáneamente de la base hacia arriba forzando a la sangre a subir a la arteria pulmonar y la aorta.

Diversos desórdenes pueden interferir en la compleja serie de sucesos que producen el ciclo cardíaco normal. Cuando el marcapasos falla, o si otras áreas del corazón se vuelven más excitables y usurpan la función del marcapasos, se presentan contracciones sin coordinación e irregulares denominadas *fibrilación*. La fibrilación de los ventrículos puede ser mortal, porque el tembloroso músculo no logra bombear la sangre. Una máquina desfibriladora aplica una sacudida eléctrica al corazón para sincronizar la contracción de las células del músculo ventricular; a veces, esto permite al marcapasos reanudar su función coordinadora normal.

### El sistema nervioso y las hormonas influyen en el ritmo cardíaco

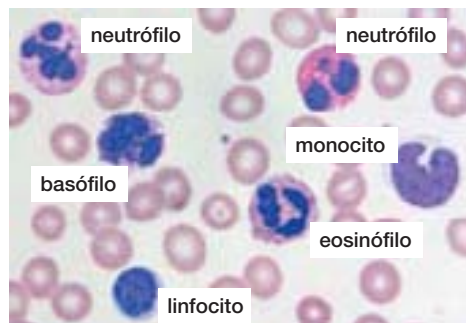
El ritmo cardíaco está en perfecta sintonía con el nivel de actividad del cuerpo, ya sea que estemos corriendo para llegar a tiempo a clase o que estemos acostados tomando el Sol. Por su cuenta, el marcapasos del nodo SA mantendría un ritmo constante de aproximadamente 100 latidos por minuto. Sin embargo, ciertos impulsos nerviosos y hormonas alteran significativamente el ritmo cardíaco. En una persona en reposo, la actividad del sistema nervioso parasimpático, que controla las funciones del cuerpo durante periodos de reposo (véase el capítulo 38), frena el ritmo cardíaco a cerca de 70 latidos por minuto (este ritmo durante el reposo comúnmente es más bajo en los atletas). Cuando el ejercicio o la tensión exigen un mayor abasto de sangre a los músculos, el sistema nervioso simpático (que prepara al cuerpo para acciones de emergencia) acelera el ritmo cardíaco. Asimismo, la hormona epinefrina (también llamada adrenalina) eleva el ritmo cardíaco al tiempo que moviliza a todo el cuerpo para responder a sucesos amenazantes o que provocan excitación. Por ejemplo, cuando los astronautas estaban alunizando, su ritmo cardíaco era de más de 170 latidos por minuto, ¡aunque se encontraban sentados en su nave espacial!

## 32.3 ¿QUÉ ES LA SANGRE?

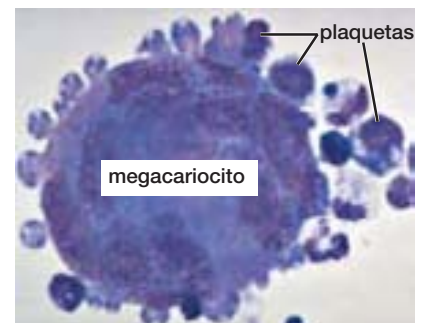
La sangre, que bien podría llamarse “el río de la vida”, transporta nutrimentos, gases, hormonas y desechos disueltos por el cuerpo. Tiene dos componentes principales: **1.** un líquido llamado **plasma**, y **2.** componentes celulares (*glóbulos rojos*, *glóbulos blancos* y *plaquetas*) suspendidos en el plasma (**FIGURA 32-8**). En promedio, los componentes celulares de la sangre representan del 40 a 45 por ciento de su volumen; el 55 o 60 por ciento restante es plasma. El ser humano promedio tiene de 5 a 6 litros de sangre, que constituye aproximadamente el 8 por ciento de su peso corporal. Los componentes de la sangre se resumen en la **tabla 32-1**.



a) Eritrocitos



b) Glóbulos blancos



c) Megacariocito produciendo plaquetas

### FIGURA 32-8 Tipos de células sanguíneas

a) Esta micrografía en color falso tomada con microscopio electrónico de barrido muestra claramente la forma de disco bicóncavo de los glóbulos rojos. b) Esta foto compuesta de glóbulos blancos teñidos muestra los cinco tipos diferentes que existen. c) Las plaquetas son piezas de citoplasma encerradas en una membrana; aquí se observa cómo brotan de un solo megacariocito. **PREGUNTA:** ¿Por qué una dieta deficiente en hierro provoca anemia (una condición caracterizada por escasez de glóbulos rojos para suministrar oxígeno)?

**Tabla 32-1 Composición de la sangre**

Componentes del plasma (55% de la sangre)	Funciones
<b>Agua</b>	Disuelve otros componentes Hace fluida la sangre
<b>Proteínas</b>	
Albúmina	Mantiene la osmolaridad
Protrombina	Da origen a la trombina, que promueve la coagulación
Fibrinógeno	Da origen a la fibrina, que promueve la coagulación
Globulina	Combate las infecciones; transporta sustancias; promueve la coagulación
<b>Sales</b> (sodio, potasio, calcio, magnesio, bicarbonato, cloro)	Mantiene la osmolaridad y el pH; permite la actividad neuronal y la contracción muscular
Componentes celulares (45% de la sangre)	Funciones
<b>Glóbulos rojos</b> (5,000,000 por mm <sup>3</sup> )	Transportan oxígeno y algo de dióxido de carbono
<b>Glóbulos blancos</b> (5,000-10,000 por mm <sup>3</sup> )	Combaten infecciones y enfermedades
<b>Plaquetas</b> (250,000 por mm <sup>3</sup> )	Importantes en la coagulación de la sangre
Sustancias transportadas en la sangre	
<b>Desechos metabólicos:</b> dióxido de carbono, urea, amoníaco	
<b>Oxígeno:</b> permite la producción de energía utilizando la respiración celular	
<b>Nutrientes:</b> glucosa, aminoácidos, lípidos, vitaminas	
<b>Hormonas:</b> influyen en el crecimiento, el desarrollo y las activi- dades metabólicas	

### El plasma es primordialmente agua en la que se disuelven proteínas, sales, nutrientes y desechos

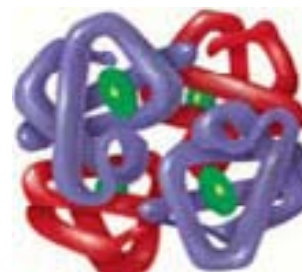
El agua constituye casi el 90 por ciento del plasma, cuyo color es amarillo pálido. Disueltas en el plasma hay proteínas y sales. La sangre también sirve como sistema de transporte para las hormonas, los nutrientes, los gases y los desechos (véase la tabla 32-1). Las proteínas del plasma son las más abundantes de las sustancias disueltas. Las tres principales proteínas plasmáticas son: las *albúminas*, las cuales ayudan a mantener la presión osmótica de la sangre (que controla el flujo de agua a través de las membranas plasmáticas); las *globulinas*, que transportan nutrientes y desempeñan un papel importante en el sistema inmunitario; y el *fibrinógeno*, importante en la coagulación de la sangre, como veremos más adelante.

### Los glóbulos rojos llevan oxígeno de los pulmones a los tejidos

Las células más abundantes en la sangre son las que transportan oxígeno: los llamados glóbulos rojos o **eritrocitos**

llo, tiene mayor área superficial que una célula esférica del mismo volumen, e incrementa la capacidad de la célula para absorber y liberar oxígeno a través de su membrana plasmática.

El color rojo de los eritrocitos se debe a una proteína de gran tamaño que contiene hierro, la **hemoglobina** (FIGURA 32-9; descrita en el capítulo 3). La hemoglobina representa cerca de un tercio del peso de cada glóbulo rojo. Una molécula de hemoglobina puede unirse y transportar a cuatro moléculas de oxígeno (una en cada grupo hem, como se destaca con los discos verdes en la figura 32-9). La hemoglobina permite a la sangre transportar mucho más oxígeno que si lo llevara disuelto en el plasma. Cuando la hemoglobina se une al oxígeno, adopta un color rojo cereza; cuando pierde el oxígeno adquiere un tono más oscuro. Como la sangre desoxigenada se encuentra en las venas, que aparecen con una tonalidad

**FIGURA 32-9 Hemoglobina**

azulosa cuando se les observa a través de la piel, en la mayoría de los diagramas las arterias se representan en color rojo y las venas en azul. La hemoglobina se une débilmente al oxígeno, al que capta en los capilares de los pulmones, donde la concentración de oxígeno es alta, y lo libera en otros tejidos del cuerpo, donde su concentración es baja. Después de liberar su oxígeno, una parte de la hemoglobina capta dióxido de carbono de los tejidos y lo transporta de regreso a los pulmones. El papel de la sangre en el intercambio de gases se estudiará más a fondo en el capítulo 33.

Una “sangre artificial” que contiene hemoglobina purificada extraída de los glóbulos rojos humanos se está probando en centros hospitalarios con los pacientes que han sufrido intensas hemorragias. El producto obtenido puede almacenarse durante mucho más tiempo que la sangre fresca, no transmite enfermedades y puede transfundirse inmediatamente porque es compatible con cualquier tipo de sangre. Esto puede hacer la diferencia entre la vida y la muerte para una persona que ha sufrido hemorragia masiva.

### Los glóbulos rojos tienen una vida relativamente corta

### Una retroalimentación negativa regula el número de glóbulos rojos

El número de glóbulos rojos en la sangre determina qué tanto oxígeno puede transportar; estos niveles se mantienen mediante un sistema de retroalimentación negativa en el que interviene la hormona **eritropoyetina**, la cual se produce en los riñones y se libera a la sangre como respuesta a una deficiencia de oxígeno. Esta falta de oxígeno podría deberse a una pérdida de sangre, a una producción insuficiente de hemoglobina, a una altitud elevada (donde hay menos oxígeno) o a una enfermedad de los pulmones que interfiere con el intercambio de gases en estos órganos. La hormona estimula la producción rápida de nuevos glóbulos rojos en la médula ósea. Una vez que se restablecen niveles adecuados de oxígeno, la producción de eritropoyetina baja y el ritmo de producción de glóbulos rojos vuelve a la normalidad (**FIGURA 32-10**).

### Los glóbulos blancos ayudan a defender al cuerpo contra las enfermedades

Los glóbulos blancos, o **leucocitos**, son de cinco tipos: *neutrófilos*, *eosinófilos*, *basófilos*, *linfocitos* y *monocitos*. En conjunto, constituyen menos del 1 por ciento de todas las células de la sangre (véase la figura 32-8b). Al igual que todas las células sanguíneas, los glóbulos blancos se producen en la médula ósea. Todos los glóbulos blancos tienen alguna función que protege al cuerpo contra enfermedades y usan el sistema circulatorio para desplazarse al lugar de la invasión. Algunos, como los monocitos, viajan por los capilares hasta heridas por las que han entrado bacterias y luego se salen por aberturas estrechas en las paredes de los capilares. Después de salir de los capilares, los monocitos se convierten en células parecidas a amibas llamadas **macrófagos** (que literalmente significa “grandes comedores”) y envuelven a partículas extrañas, como bacterias y células cancerosas (**FIGURA 32-11**). Por lo regular, los macrófagos mueren en el proceso y tales microorganismos muertos se acumulan y contribuyen a formar la sustancia blanca llamada *pus*, que a menudo se observa en los sitios in-



**FIGURA 32-11** Un glóbulo blanco ataca a las bacterias

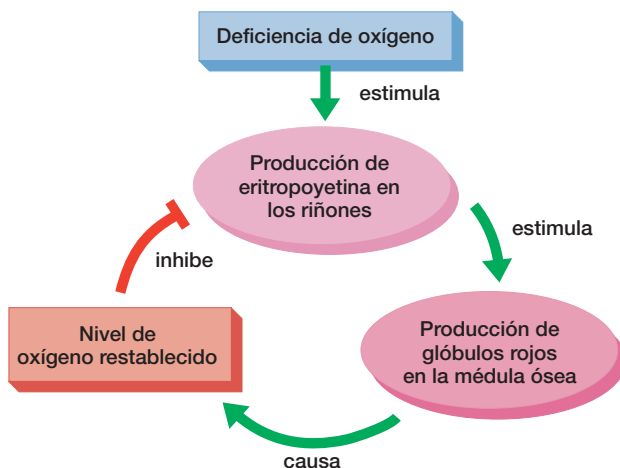
Estas bacterias (pequeñas esferas verdes) son *Escherichia coli*. Algunas formas de estas bacterias intestinales podrían causar enfermedades si entran en el torrente sanguíneo.

fectados. Los **linfocitos**, que describiremos en el capítulo 36, se encargan de producir anticuerpos que ayudan a inmunizar contra enfermedades. Las células que dan origen a los linfocitos migran desde la médula ósea a través de la corriente sanguínea hasta tejidos del sistema linfático, como el timo, el bazo y los ganglios linfáticos, que describiremos más adelante.

### Las plaquetas son fragmentos celulares que ayudan a coagular la sangre

Las **plaquetas**, que son cruciales para la coagulación de la sangre, son trozos de células grandes llamadas *megacariocitos*. Los megacariocitos permanecen en la médula ósea, donde separan trozos de su citoplasma envueltos por membrana para formar plaquetas (véase la figura 32-8c). Luego, las plaquetas entran en la sangre y desempeñan un papel central en su coagulación. Al igual que los glóbulos rojos, las plaquetas carecen de núcleo y su vida es aún más corta, de 10 a 12 días.

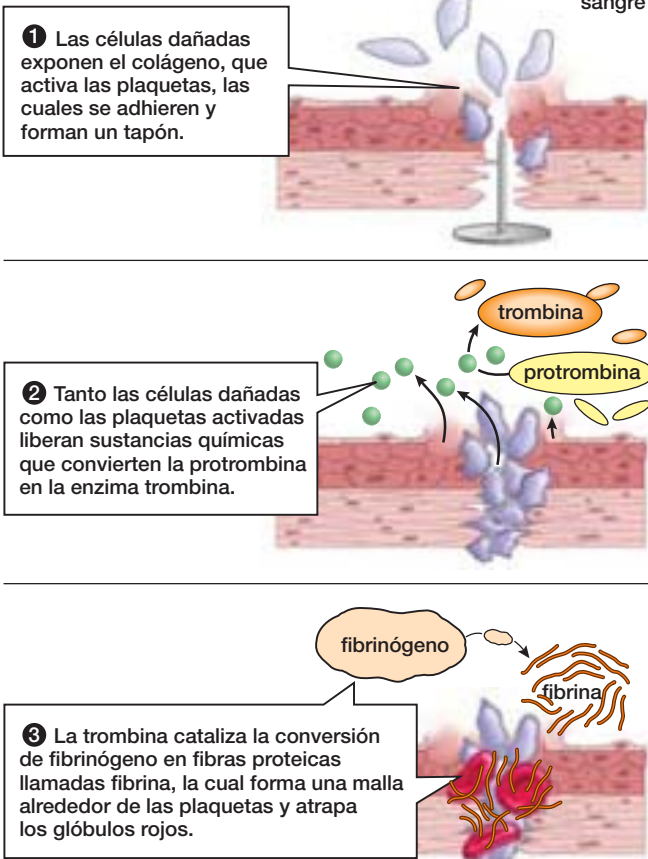
La **coagulación de la sangre** es un proceso complejo que evita que nos desangremos hasta morir, no sólo como consecuencia de traumatismos, sino también por el desgaste natural del cuerpo. La coagulación (**FIGURA 32-12a**) inicia cuando la sangre entra en contacto con un tejido dañado, por ejemplo, un vaso sanguíneo que tiene una pared rota. La superficie rasgada expone la proteína colágeno, la cual provoca que las plaquetas se adhieran y bloqueen parcialmente la abertura. Las plaquetas pegadas y las células lesionadas liberan diversas sustancias, iniciando una compleja serie de reacciones entre las proteínas que circulan en el plasma. Un importante resultado de estas reacciones químicas es la producción de la enzima **trombina** a partir de su forma inactiva, la *protrombina*. La trombina cataliza la conversión de la proteína plasmática llamada **fibrinógeno** en moléculas filamentosas insolubles llamadas **fibrina**. Las moléculas de fibrina se adhieren unas a otras para formar una red fibrosa alrededor de las plaquetas acumuladas. Esta red proteica atrapa glóbulos rojos y más plaquetas (**FIGURA 32-12b**



**FIGURA 32-10** Regulación de los glóbulos rojos por retroalimentación negativa

**PREGUNTA:** Algunos atletas de resistencia engañan practicando el dopaje: se inyectan grandes dosis de eritropoyetina. ¿Por qué esto les da una ventaja competitiva?

a) Pasos en la formación de un coágulo



b) Micrografía electrónica de barrido de un coágulo sanguíneo

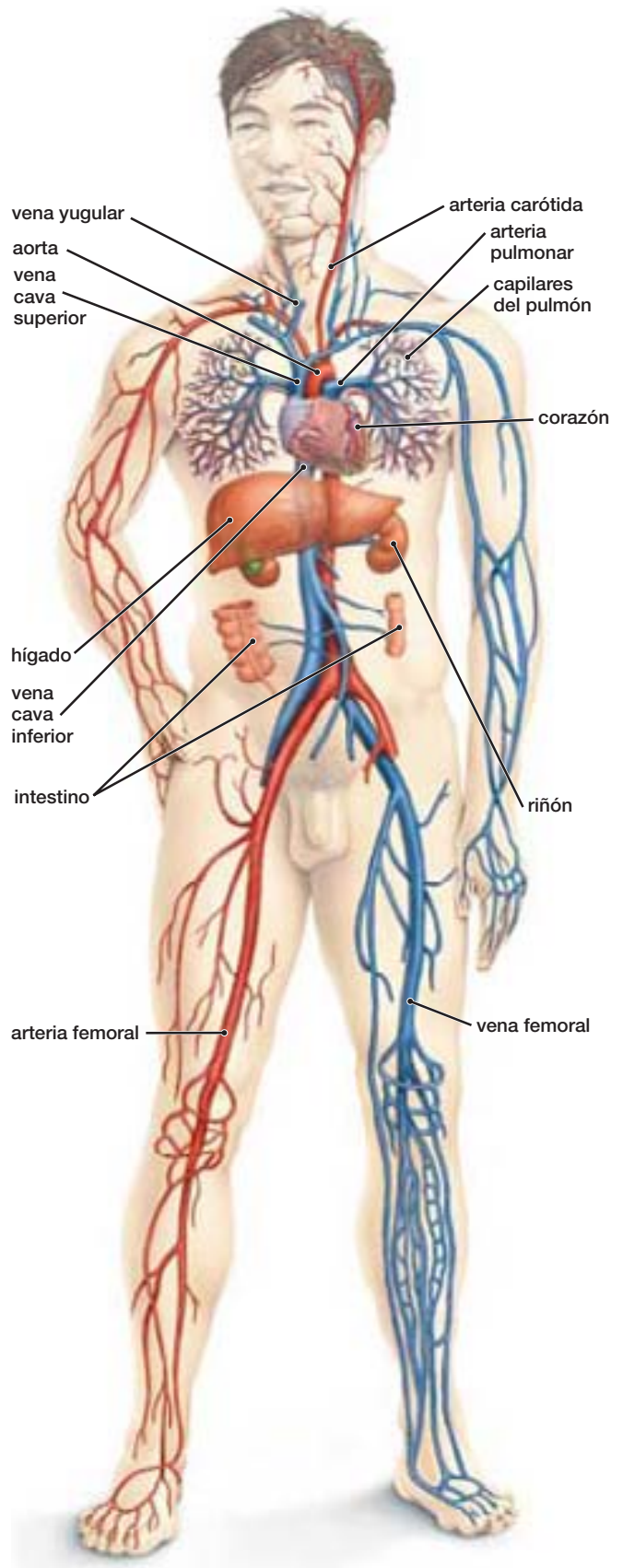


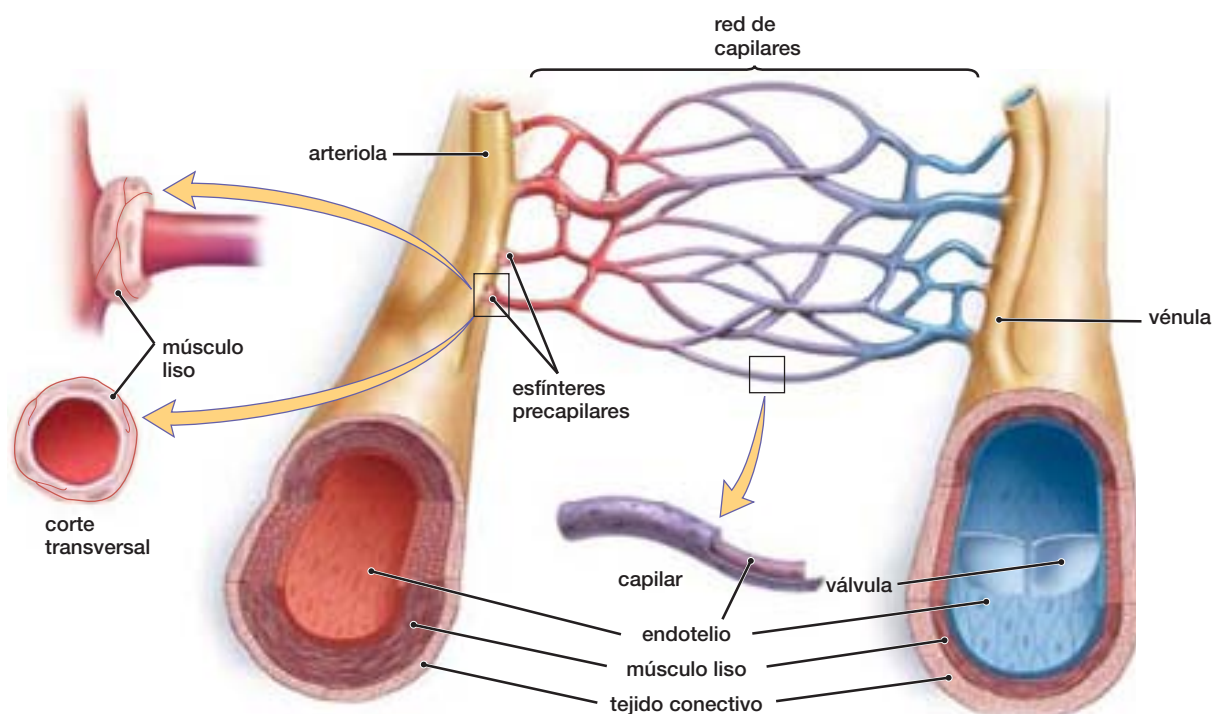
**FIGURA 32-12** Coagulación de la sangre

Los tejidos lesionados y las plaquetas que se les adhieren inician una compleja serie de reacciones bioquímicas entre las proteínas de la sangre, que conducen a la formación de un coágulo. Aquí se muestra una secuencia simplificada. **b)** La proteína filamentos fibrina produce una masa pegajosa y enmarañada que atrapa glóbulos rojos y finalmente forma un coágulo.

**FIGURA 32-13** El sistema circulatorio humano

Casi todas las venas (derecha) transportan sangre desoxigenada al corazón y casi todas las arterias (izquierda) transportan sangre oxigenada desde el corazón. Las venas pulmonares (que llevan sangre oxigenada) y las arterias pulmonares (que llevan sangre desoxigenada) son excepciones. Todos los órganos reciben sangre de las arterias, la devuelven por las venas y son alimentados por capilares microscópicos (los capilares de los pulmones están muy amplificados).





**FIGURA 32-14** Estructuras e interconexiones de los vasos sanguíneos

Las arterias y arteriolas son más musculares que las venas y vénulas. La sangre oxigenada se mueve de las arterias a las arteriolas y a los capilares. Las paredes de los capilares sólo tienen una célula de espesor. Éstos vacían sangre desoxigenada a las vénulas, que desembocan en venas. Los esfínteres precapilares regulan el movimiento de la sangre de las arteriolas a los capilares.

fibrosa producen proyecciones pegajosas que se sujetan unas a otras. En menos de media hora, las plaquetas se contraen, aprietan la trama y expulsan el líquido. Esta acción forma un coágulo más denso y duro (en la piel, lo llamamos *costra*), que también constriñe la herida, juntando las superficies dañadas para promover su cicatrización.

A pesar de la capacidad de la sangre para coagularse, cada año decenas de miles de personas se desangran hasta morir por heridas de arma de fuego o de otro tipo. Los investigadores han desarrollado vendas impregnadas con grandes cantidades de trombina y fibrinógeno, para estimular una rápida coagulación. Otros científicos han logrado modificar por ingeniería genética vacas y cerdos para que secreten grandes cantidades de fibrinógeno humano junto con la leche. Estos avances son prometedores para tener un mejor control sobre las hemorragias y para promover una cicatrización más rápida de las heridas en las víctimas.

### 32.4 ¿QUÉ TIPO DE VASOS SANGUÍNEOS HAY Y QUÉ FUNCIONES TIENEN?

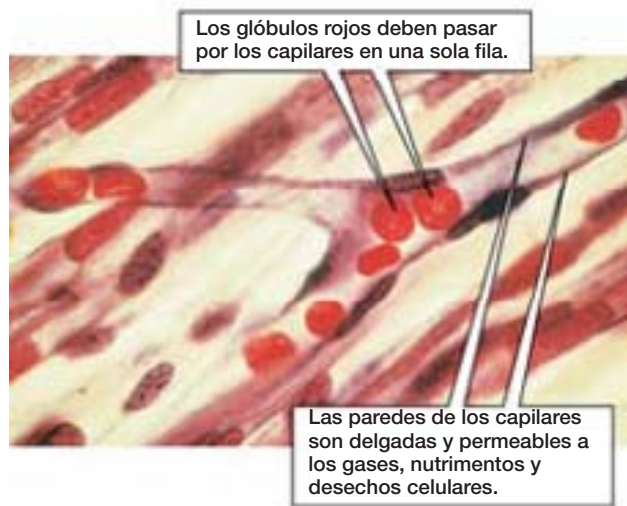
El río de la vida fluye por canales bien definidos llamados *vasos sanguíneos*. El diagrama de la **FIGURA 32-13** presenta algunos de los principales vasos sanguíneos del aparato circulatorio humano. Cuando la sangre sale del corazón, viaja de las arterias a las *arteriolas*, los capilares, las *vénulas*

#### Las arterias y arteriolas son vasos de paredes gruesas que transportan sangre desde el corazón

Las arterias conducen la sangre que sale del corazón. Estos vasos tienen paredes gruesas provistas de músculo liso y tejido conectivo elástico (véase la figura 32-14). Con cada pulsación de sangre de los ventrículos, las arterias se expanden un poco, como globos de pared gruesa. Entre un latido y otro, las paredes elásticas “rebotan” y ayudan a bombear la sangre y a mantener un flujo constante a través de los vasos más pequeños. Las arterias se ramifican para formar vasos de menor diámetro llamados **arteriolas**, las cuales desempeñan un papel importante en la distribución de la sangre dentro del cuerpo, como veremos más adelante.

#### Los capilares son vasos microscópicos que permiten el intercambio de nutrientes y desechos entre la sangre y las células del cuerpo

El aparato circulatorio completo es un complejo dispositivo que permite a cada célula del cuerpo intercambiar nutrientes y desechos por difusión. Las arteriolas conducen la sangre a los **capilares**, que son tan diminutos que los glóbulos rojos deben pasar a través de ellos en una sola fila (**FIGURA 32-15**



**FIGURA 32-15** Glóbulos rojos fluyen en una sola fila por un capilar

**PREGUNTA:** ¿Por qué el oxígeno sale de los capilares en los tejidos corporales mientras el dióxido de carbono entra, y no a la inversa?

reducen rápidamente conforme la sangre se mueve a través de esta red angosta y casi interminable de capilares, lo que da más tiempo a que ocurra la difusión.

Con paredes del grosor de una sola célula endotelial (véase la figura 32-4), los capilares están muy bien adaptados para su función de intercambio de materiales entre la sangre y el líquido que baña las células del cuerpo. La presión alta dentro de los capilares que se ramifican de las arteriolas provoca que se filtre líquido continuamente del plasma sanguíneo hacia los espacios alrededor de los capilares. La sustancia resultante, llamada **líquido intersticial**, consiste primordialmente en agua, en la que están disueltos nutrimentos, hormonas, gases, desechos, algunas proteínas y glóbulos blancos. El medio actúa como un intermediario entre las células del cuerpo y la sangre de los capilares, suministrando nutrimentos a las células, al tiempo que acepta sus desechos y otras secreciones.

Las sustancias toman varias rutas a través de las paredes capilares. Los gases, el agua, las hormonas liposolubles y los ácidos grasos pueden difundirse directamente a través de las membranas celulares de los capilares. Los nutrimentos de pequeñas dimensiones e hidrosolubles, como sales, glucosa y aminoácidos, viajan en el fluido intersticial a través de espacios angostos entre células capilares adyacentes. Los glóbulos blancos también pueden salir a través de estas aberturas. Las proteínas grandes pueden ser transportadas a través de las membranas de las células endoteliales en vesículas. Como resultado de la acción de filtración de las paredes capilares, la composición del líquido intersticial difiere de la de la sangre. Mientras que las concentraciones de iones y glucosa son muy similares, el líquido intersticial carece de glóbulos rojos y plaquetas, y tiene mucho menos contenido proteico que el plasma sanguíneo.

La presión dentro de los capilares disminuye conforme la sangre viaja hacia las vénulas, y la alta presión osmótica de la sangre que permanece en el interior de los capilares (debido a la presencia de albúminas y otras proteínas de gran tamaño) hace regresar el agua a los vasos por ósmosis conforme la sangre se aproxima al extremo venoso de los capilares. A

medida que el agua se mueve hacia los capilares y la sangre en su interior se vuelve más diluida, las sustancias disueltas en el líquido intersticial tienden a difundirse también de regreso a los capilares. Así, buena parte del líquido intersticial (aproximadamente el 85 por ciento) se reincorpora al torrente sanguíneo a través de las paredes capilares en el lado venoso de la red de capilares. Como aprenderás más adelante en este capítulo, el sistema linfático restituye el líquido restante (véase más adelante la figura 32-17).

### Las venas y vénulas llevan sangre de regreso al corazón

Después de recoger dióxido de carbono y otros desechos de las células, la sangre de los capilares drena en vasos más grandes llamados **vénulas**, las cuales desembocan en **venas**, que son aún más grandes (véase la figura 32-14). Las venas ofrecen un camino de baja resistencia para que la sangre regrese al corazón. Las paredes de las venas son más delgadas, menos musculares y más expansibles que las de las arterias, aunque ambas contienen una capa de músculo liso. Puesto que la presión sanguínea en las venas es baja, las contracciones de los músculos esqueléticos durante el ejercicio y la respiración ayudan a regresar sangre al corazón, al exprimir las venas y empujar la sangre por ellas.

Cuando las venas se comprimen, ¿por qué la sangre no se ve impelida a alejarse del corazón así como es empujada hacia este último? Las venas están equipadas con válvulas unidireccionales que sólo permiten el flujo de la sangre hacia el corazón (**FIGURA 32-16**). Cuando estamos sentados o de pie durante mucho tiempo, la falta de actividad favorece que la sangre se acumule en las venas de la parte inferior de las piernas. Por eso es que a veces se nos hinchan los pies después de un vuelo largo en avión. Los periodos largos de inactividad también contribuyen a la aparición de várices, que son venas permanentemente hinchadas porque sus válvulas se han estirado y debilitado.

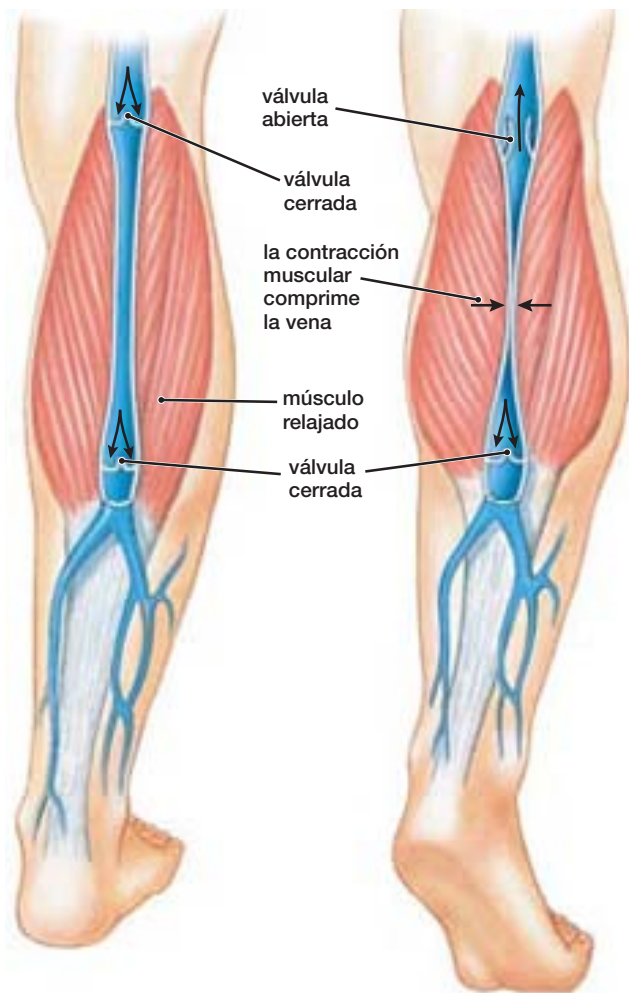
Si baja la presión sanguínea —por ejemplo, después de una intensa hemorragia—, las venas pueden ayudar a restablecerla. En tales casos, el sistema nervioso simpático (que prepara al cuerpo para acciones de emergencia) estimula automáticamente la contracción de los músculos lisos en las paredes de las venas. Esta acción reduce el volumen interno de las venas y eleva la presión arterial, acelerando el retorno de sangre al corazón.

### Las arteriolas controlan la distribución del flujo sanguíneo

Las arteriolas transportan la sangre hacia los capilares, y sus paredes musculares están bajo la influencia de nervios, hormonas y otras sustancias químicas producidas por los tejidos cercanos. Por ello, las arteriolas se contraen y se relajan en respuesta a las necesidades de los tejidos y órganos a los que abastecen. Es común leer en una novela de suspenso que la protagonista “palideció al ver el piso ensangrentado”. En efecto, la piel se pone pálida cuando las arteriolas que abastecen de sangre a los capilares de la piel se contraen porque el sistema nervioso estimula los músculos lisos para que se contraigan. Esta contracción eleva la presión sanguínea en general; pero una constricción selectiva retira la sangre de la piel, donde es menos necesaria en ese momento, y la redirige al corazón y los músculos, donde podría necesitarse para realizar acciones vigorosas.

En un día caluroso, en cambio, nos “ponemos rojos” porque las arteriolas de la piel se dilatan y llevan más sangre a los



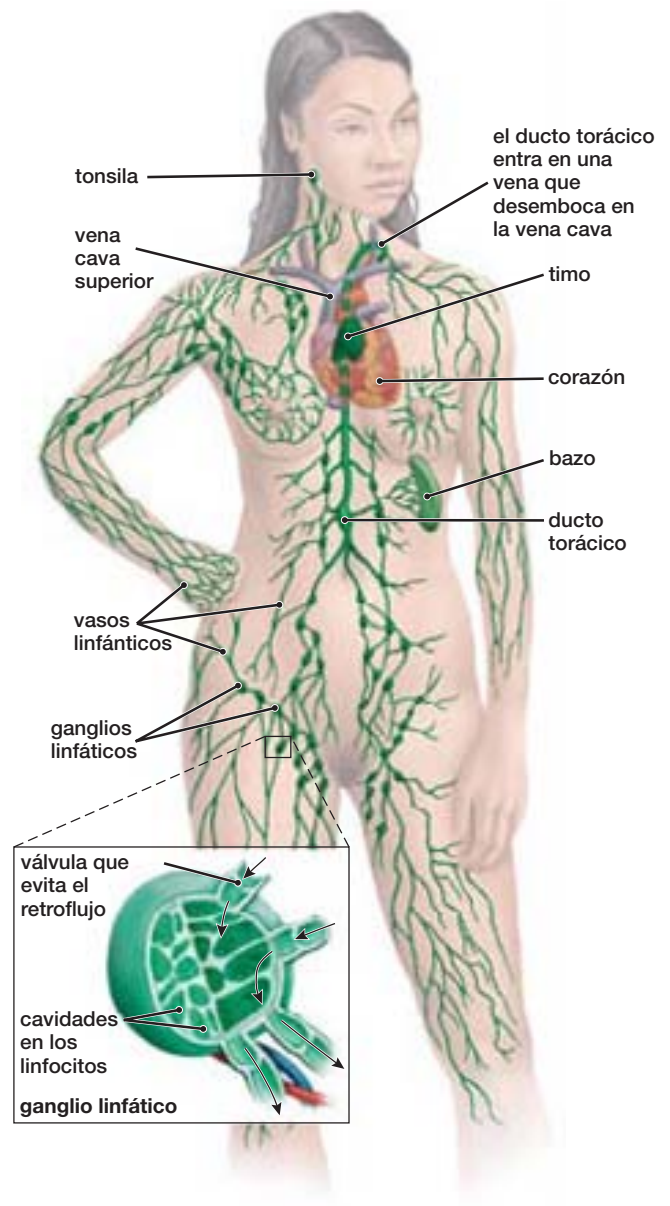


**FIGURA 32-16** Las válvulas dirigen el flujo de la sangre en las venas

Las venas y vénulas tienen válvulas unidireccionales que mantienen el flujo de sangre en la dirección correcta. Cuando los músculos cercanos comprimen una vena, las válvulas permiten que fluya sangre hacia el corazón, pero bloquean el flujo en la dirección opuesta.

capilares de ese órgano. Esto permite que el cuerpo disipe el exceso de calor al exterior y mantenga una temperatura interna relativamente constante. En contraste, cuando hace mucho frío, los dedos de las manos y los pies se nos pueden congelar porque las arteriolas que suministran sangre a las extremidades se constriñen. La sangre se desvía a órganos vitales, como el corazón y el cerebro, que no pueden funcionar correctamente si su temperatura es baja. Al minimizar el flujo de sangre a las extremidades que irradian calor normalmente, el cuerpo puede conservar ese calor.

El flujo de sangre en los capilares se regula mediante diminutos anillos de músculo liso, llamados **esfínteres precapilares**, que rodean a las uniones entre arteriolas y capilares (véase la figura 32-14). Estas uniones se abren y se cierran en respuesta a cambios químicos locales que indican las necesidades de los tejidos cercanos. Por ejemplo, la acumulación de dióxido de carbono, ácido láctico u otros desechos celulares indica que los tejidos requieren un mayor flujo de sangre. Estas señales hacen que los esfínteres precapilares y los músculos de las paredes de las arteriolas cercanas se relajen y así pueda fluir más sangre a través de los capilares.



**FIGURA 32-17** El sistema linfático humano

Los vasos linfáticos, ganglios linfáticos y dos órganos linfáticos auxiliares: el timo y el bazo. La linfa regresa al sistema circulatorio por medio del ducto torácico. (**Imagen en el recuadro**) Sección transversal de un ganglio linfático. El ganglio está lleno de canales revestidos de glóbulos blancos que atacan a los materiales extraños en la linfa.

¿Qué sucede cuando se rompen los vasos sanguíneos, o se estrechan debido a depósitos de colesterol, o se bloquean con coágulos, y se detiene el flujo del “río de la vida”? Exploramos esas cuestiones en la sección “Guardián de la salud: Al rescate de los corazones enfermos”.

## 32.5 ¿CÓMO COLABORA EL SISTEMA LINFÁTICO CON EL CIRCULATORIO?

El **sistema linfático** consta de una red de capilares linfáticos y vasos más grandes que desembocan en el sistema circulatorio, numerosos *ganglios linfáticos* pequeños, áreas de tejido conectivo rico en linfocitos (que incluyen a las *tonsilas* o *amí-*

dalas) y dos órganos adicionales: el *timo* y el *bazo* (FIGURA 32-17). Aunque no forma parte estrictamente del aparato circulatorio, el sistema linfático está asociado estrechamente a él. Este sistema tiene varias funciones importantes:

- Devuelve el exceso de líquido intersticial al torrente sanguíneo.
- Transporta grasas del intestino delgado al torrente sanguíneo.
- Defiende al cuerpo al exponer a las bacterias y virus a los glóbulos blancos.

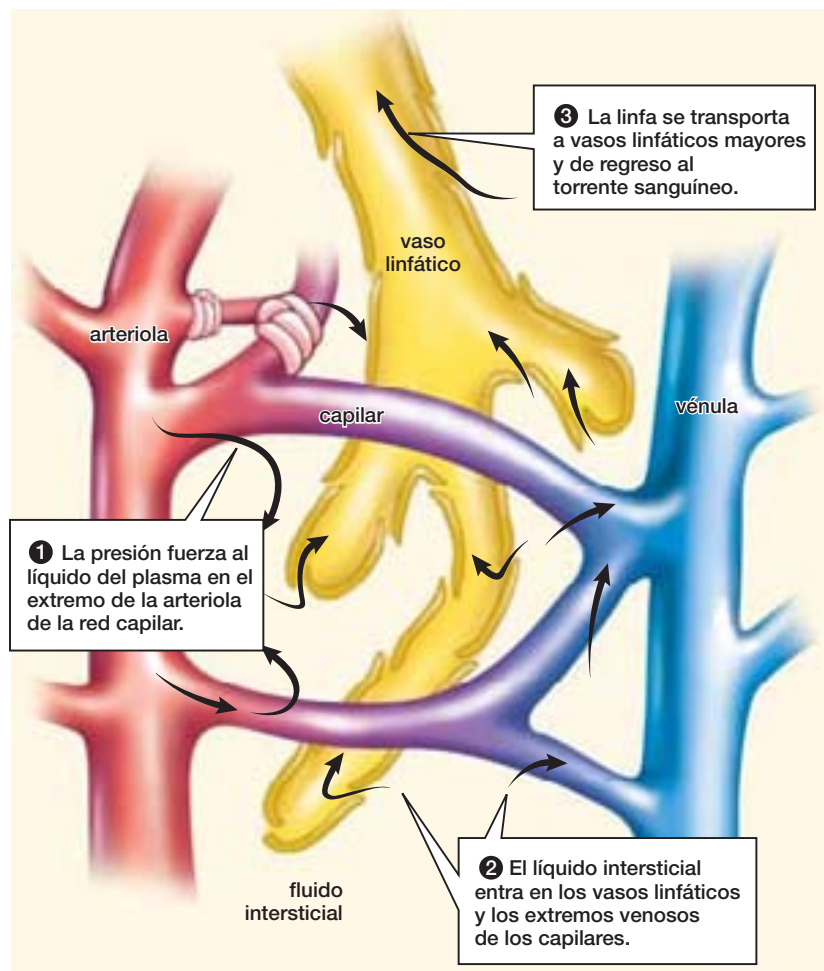
### Los vasos linfáticos se parecen a las venas y capilares del sistema circulatorio

Al igual que los capilares sanguíneos, los *capilares linfáticos* forman una compleja red de vasos microscópicamente angostos, de paredes delgadas, en los que las sustancias pueden entrar con facilidad. Las paredes de los capilares linfáticos se componen de células con aberturas entre ellas que actúan como válvulas unidireccionales. Estas aberturas permiten el ingreso de partículas relativamente grandes, junto con líquido, al interior de los capilares linfáticos. A diferencia de los capilares sanguíneos, que forman una red continua conectada, los capilares linfáticos tienen terminaciones ciegas en los tejidos del cuerpo (FIGURA 32-18). Los materiales recolectados por los capilares linfáticos fluyen a vasos linfáticos más grandes. La

linfa es bombeada por contracciones rítmicas de los músculos lisos en las paredes de estos vasos. Un posterior impulso para que la linfa fluya proviene de la contracción de los músculos cercanos, como los que intervienen en la respiración y la locomoción. Al igual que en las venas, la dirección del flujo se regula mediante válvulas unidireccionales (FIGURA 32-19).

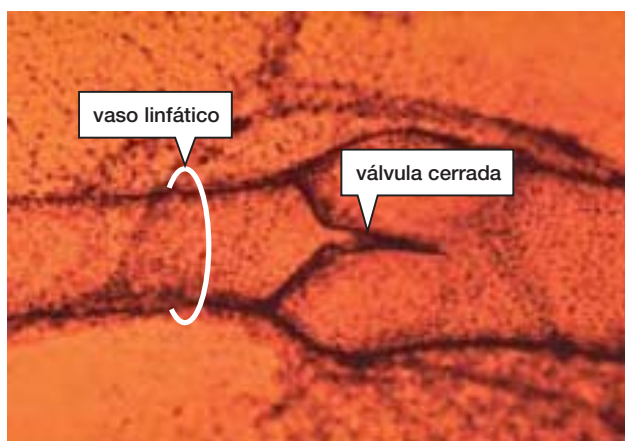
### El sistema linfático devuelve líquidos a la sangre

Como ya explicamos, se intercambian sustancias disueltas entre los capilares y las células del cuerpo por medio de líquido intersticial, que es filtrado del plasma sanguíneo a través de las paredes capilares mediante presión y que baña casi todas las células del cuerpo. En una persona promedio, la diferencia entre la cantidad de líquido que sale de los capilares sanguíneos y la que es reabsorbida por ellos, cada día, es de unos tres o cuatro litros. Una función del sistema linfático es devolver este líquido en exceso y las moléculas disueltas en él a la sangre. A medida que se acumula el líquido intersticial, su presión hace que entre líquido por las aberturas de los capilares linfáticos (véase la figura 32-18). El sistema linfático transporta este líquido, que ahora recibe el nombre de *linfa*, de regreso al sistema circulatorio. La importancia de que el sistema linfático devuelva líquido al torrente sanguíneo es evidente en la condición llamada *elefantiasis* (FIGURA 32-20). Este trastorno, que causa desfiguraciones, es provocado por un nematelminto parásito que coloniza los vasos linfáticos, los cuales cicatrizan y no pueden ya drenar el líquido en exceso.



**FIGURA 32-18** Estructura de los capilares linfáticos

Los capilares linfáticos tienen terminaciones ciegas en los tejidos del cuerpo, donde la presión por la acumulación de líquido intersticial hace que entre líquido en los capilares linfáticos, así como en la parte venosa de la red capilar.



**FIGURA 32-19** Válvula de un vaso linfático

Al igual que las venas que transportan sangre, los vasos linfáticos tienen válvulas internas unidireccionales que dirigen el flujo de la linfa hacia las venas grandes en las que desembocan.

### El sistema linfático transporta grasas del intestino delgado a la sangre

Después de una comida rica en grasas, partículas de grasa pueden constituir el 1 por ciento del líquido linfático. ¿A qué se debe esto? Como veremos en el capítulo 34, el intestino delgado está provisto con abundancia de capilares linfáticos. Después de absorber las grasas digeridas, las células intestinales liberan partículas de grasa hacia el líquido intersticial. Estas partículas son demasiado grandes para entrar por difusión en los capilares sanguíneos, pero no tienen problema para entrar por las aberturas entre las células de los capilares linfáticos. Una vez en la linfa, la grasa es transportada a las venas que salen de la vena cava superior, una vena grande que desemboca en el corazón.

### El sistema linfático ayuda a defender al cuerpo contra las enfermedades

Además de sus otras funciones, el sistema linfático colabora en la defensa del cuerpo contra invasores como bacterias y virus. En los revestimientos de los tractos respiratorio, digestivo y urinario hay porciones de tejido conectivo que contienen un gran número de linfocitos. Las más grandes de esas porciones son las **tonsilas** o **amígdalas**, situadas en la cavidad detrás de la boca. Los vasos linfáticos son interrumpidos periódicamente



**FIGURA 32-20** La elefantiasis es consecuencia del bloqueo de vasos linfáticos

Cuando la cicatrización de vasos linfáticos, tras la infección de un gusano parásito, impide que la linfa vuelva al torrente sanguíneo, el área afectada puede hincharse de forma masiva.

por estructuras con forma de haba y de unos 2.5 centímetros de longitud, llamados **nodos** o **ganglios linfáticos** (véase la figura 32-17). La linfa tiene que pasar por espacios estrechos dentro de los ganglios, que contienen masas de macrófagos y linfocitos. Algunas infecciones provocan que los ganglios se inflamen conforme acumulan glóbulos blancos, bacterias, desechos de células muertas y líquido.

El timo y el bazo son órganos que forman parte del sistema linfático (véase la figura 32-17). El **timo** está situado bajo el esternón, un poco más arriba del corazón. El timo está muy activo en los bebés y niños pequeños, pero su tamaño e importancia disminuyen en el adulto. Algunos tipos de linfocitos inmaduros producidos en la médula ósea viajan en el torrente sanguíneo hacia el timo, donde maduran. El **bazo** está situado en la parte izquierda de la cavidad abdominal, entre el estómago y el diafragma. Así como los ganglios linfáticos filtran la linfa, el bazo filtra la sangre, exponiéndola a macrófagos y linfocitos que destruyen las partículas extrañas y los glóbulos rojos viejos.

## OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO MUERTE SÚBITA



Es posible que Darryl Kile haya estado consciente del insidioso progreso de la aterosclerosis que lo amenazaba y que repentinamente le cobró la vida. Aunque las arterias coronarias extremadamente adelgazadas pueden provocar dolor en el pecho (*angina*) y advertir de un problema inminente, menos del 20 por ciento de los infartos al miocardio son causados sólo por la presencia de placa. La mayoría ocurre porque el recubrimiento fibroso que contiene la placa dentro de las paredes arteriales se rompe y estimula la formación de un coágulo dentro de la arteria (véase el recuadro en la fotografía que abre

el capítulo). Esos coágulos pueden desprenderse repentinamente y ser transportados a una parte más estrecha de la arteria, donde bloquean por completo el flujo de sangre. En Estados Unidos unas 3000 personas jóvenes, entre 15 y 34 años, mueren de infartos al miocardio cada año. Algunos individuos presentan factores genéticos que contribuyen de manera excepcional a los altos niveles de colesterol LDL, la hipertensión y la aterosclerosis. Pero con cambios en el estilo de vida y la ayuda de medicamentos que reducen la presión arterial, el colesterol LDL y la inflamación, incluso personas con factores especiales de riesgo logran llevar una vida activa y larga, evitando una tragedia como la

que ocurrió a Darryl Kile, a su familia, amigos y compañeros de equipo.

**Piensa en esto** ¿En tu familia existen factores de riesgo como colesterol alto (total y LDL), hipertensión o angina de pecho? ¿Alguna persona de tu familia inmediata murió prematuramente de alguna enfermedad cardíaca? ¡Nunca es demasiado pronto para averiguarlo! Incluso en ausencia de historia familiar, un examen físico completo que incluya un perfil de lípidos y un electrocardiograma te ayudará a evaluar tus propios riesgos y a emprender acciones que te permitan proteger la salud de tu sistema cardiovascular.

## REPASO DEL CAPÍTULO

### RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

#### 32.1 ¿Qué características y funciones principales tienen los sistemas circulatorios?

Los sistemas circulatorios transportan sangre rica en nutrientes disueltos y oxígeno a las inmediaciones de cada célula, donde liberan los nutrientes y absorben los desechos por difusión. Todos los sistemas circulatorios tienen tres partes principales: sangre, que es un líquido; vasos, un sistema de canales para conducir la sangre; y un corazón, una bomba que hace circular la sangre. Los invertebrados tienen sistemas circulatorios cerrados o abiertos. En los sistemas abiertos, el corazón bombea sangre hacia un hemocele, donde baña directamente los órganos internos. Casi todos los vertebrados tienen sistemas cerrados, en los que la sangre queda confinada al corazón y los vasos sanguíneos.

#### Web tutorial 32.1 Sistemas circulatorios

#### 32.2 ¿Cómo funciona el corazón de los vertebrados?

Los sistemas circulatorios de los vertebrados transportan gases, hormonas y desechos; distribuyen nutrientes; ayudan a regular la temperatura del cuerpo y lo defienden contra las enfermedades.

El corazón de los vertebrados evolucionó desde uno de dos cavidades en los peces, a uno de tres en los anfibios y la mayoría de los reptiles, hasta uno de cuatro en las aves y los mamíferos. En el corazón de cuatro cavidades, la sangre se bombea por separado a los pulmones y al resto del cuerpo, manteniendo una separación completa de la sangre oxigenada y desoxigenada. La sangre desoxigenada se recibe del cuerpo en la aurícula derecha y se pasa al ventrículo derecho, el cual la bombea a los pulmones. La sangre oxigenada de los pulmones entra en la aurícula izquierda, pasa al ventrículo izquierdo y se bombea al resto del cuerpo.

El ciclo cardíaco consta de dos etapas: **1.** contracción auricular seguida de **2.** contracción ventricular. La dirección del flujo de la sangre se mantiene mediante válvulas dentro del corazón. El nodo sinoauricular, que es el marcapasos del corazón, inicia y coordina las contracciones. El sistema nervioso y las hormonas, como la epinefrina, pueden modificar el ritmo cardíaco.

#### Web tutorial 32.2 Corazones de dos cavidades

#### Web tutorial 32.3 Corazones de tres cavidades

#### Web tutorial 32.4 El sistema cardiovascular humano

#### 32.3 ¿Qué es la sangre?

La sangre está constituida de líquido y componentes celulares. El líquido, llamado plasma, consiste en agua que contiene proteínas, hormonas, nutrientes, gases y desechos. Los glóbulos rojos o eritrocitos contienen una proteína grande llamada hemoglobina que es rica en hierro y transporta oxígeno. La hormona eritropoyetina regula el número de eritrocitos. Hay cinco tipos de glóbulos blancos, o leucocitos, que combaten las infecciones. Las plaquetas, que son fragmentos de megacariocitos, son importantes para la coagulación de la sangre.

#### 32.4 ¿Qué tipos de vasos sanguíneos hay y qué funciones tienen?

La sangre que sale del corazón viaja por arterias, arteriolas, capilares, vénulas, venas y regresa luego al corazón (en ese orden). Cada vaso está especializado para desempeñar su función. Las arterias, elásticas y musculares, ayudan a bombear la sangre. Los capilares, de paredes delgadas, intercambian materiales entre las células del cuerpo y la sangre. Las venas ofrecen un camino de baja resistencia para regresar al corazón y tienen válvulas unidireccionales que mantienen la dirección del flujo de la sangre. La distribución de la sangre se regula mediante la constricción y dilatación de las arteriolas por la influencia del sistema nervioso simpático y factores locales como la cantidad de dióxido de carbono en los tejidos. Factores locales regulan también a los esfínteres precapilares, que controlan el flujo de sangre a los capilares.

#### 32.5 ¿Cómo colabora el sistema linfático con el circulatorio?

El sistema linfático humano consta de vasos linfáticos, tonsilas o amígdalas, ganglios linfáticos, timo y bazo. El sistema linfático elimina el exceso de líquido intersticial que se filtra por las paredes de los capilares sanguíneos. Transporta grasas al torrente sanguíneo desde el intestino delgado y combate infecciones filtrando la linfa a través de los ganglios linfáticos, donde glóbulos blancos ingieren a invasores como virus y bacterias. El timo, que es más activo en los niños pequeños, produce linfocitos que intervienen en la inmunidad. El bazo filtra sangre haciéndola pasar por macrófagos y linfocitos, que eliminan bacterias y células sanguíneas dañadas.

## TÉRMINOS CLAVE

<b>accidente cerebrovascular</b> pág. 654	<b>eritropoyetina</b> pág. 659	<b>macrófago</b> pág. 659	<b>sistema circulatorio cerrado</b> pág. 650
<b>angina de pecho</b> pág. 654	<b>esfínter precapilar</b> pág. 663	<b>marcapasos</b> pág. 656	<b>sistema linfático</b> pág. 663
<b>arteria</b> pág. 652	<b>fibras de Purkinje</b> pág. 657	<b>músculo cardíaco</b> pág. 653	<b>timo</b> pág. 665
<b>arteriola</b> pág. 661	<b>fibrina</b> pág. 659	<b>nodo auriculoventricular (AV)</b> pág. 657	<b>tonsila</b> pág. 665
<b>aterosclerosis</b> pág. 654	<b>ganglio linfático</b> pág. 665	<b>nodo sinoauricular (SA)</b> pág. 656	<b>trombina</b> pág. 659
<b>aurícula</b> pág. 651	<b>hemocele</b> pág. 650	<b>placa</b> pág. 654	<b>válvula auriculoventricular</b> pág. 656
<b>bazo</b> pág. 665	<b>hemoglobina</b> pág. 658	<b>plaqueta</b> pág. 659	<b>válvula semilunar</b> pág. 656
<b>capilar</b> pág. 661	<b>hipertensión</b> pág. 656	<b>plasma</b> pág. 657	<b>vaso sanguíneo</b> pág. 650
<b>ciclo cardíaco</b> pág. 653	<b>infarto al miocardio</b> pág. 654	<b>sangre</b> pág. 650	<b>vena</b> pág. 652
<b>coagulación de la sangre</b> pág. 659	<b>leucocito</b> pág. 659	<b>sistema circulatorio abierto</b> pág. 650	<b>vénula</b> pág. 662
<b>corazón</b> pág. 650	<b>linfa</b> pág. 664		<b>ventrículo</b> pág. 651
<b>eritrocito</b> pág. 658	<b>linfocito</b> pág. 659		
	<b>líquido intersticial</b> pág. 662		

## RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. Traza el flujo de sangre por el sistema circulatorio, partiendo de la aurícula derecha y volviendo a ella.
2. Cita tres tipos de células sanguíneas y describe sus funciones principales.
3. Menciona cinco funciones del sistema circulatorio de los vertebrados.
4. ¿En qué se parecen las venas y los vasos linfáticos? Describe el transporte de líquidos en cada caso.
5. Describe tres funciones importantes del sistema linfático.
6. Distingue entre plasma, líquido intersticial y linfa.
7. Describe las venas, los capilares y las arterias, señalando sus similitudes y diferencias.
8. Traza la evolución del corazón de los vertebrados, desde el de dos cavidades hasta el de cuatro.
9. Explica detalladamente qué hace latir al corazón de los vertebrados.
10. Describe el ciclo cardíaco y relaciona las contracciones de las aurículas y los ventrículos con las dos lecturas que se toman al medir la presión arterial.
11. Explica cómo un sistema de retroalimentación negativa regula el número de glóbulos rojos.
12. Describe la formación de una placa aterosclerótica. ¿Qué riesgos están asociados con la aterosclerosis?

## APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. Comenta qué puedes hacer ahora y en el futuro para reducir el riesgo de padecer una enfermedad cardíaca.
2. Considerando lo comunes que son las enfermedades cardíacas y el elevado y cada vez más alto costo de tratarlas, ciertos tratamientos podrían no estar al alcance de todos a quienes podrían beneficiar. ¿Qué factores tomarías en cuenta al racionar los procedimientos cardiovasculares, como los trasplantes de corazón o la cirugía de derivación coronaria o *bypass*?
3. José, un ejecutivo de 45 años de edad en una importante corporación, trabaja 60 horas a la semana; cuando juega básquetbol con su hijo durante los fines de semana, siente dolor en el pecho. ¿Qué tratamientos o cambios en el estilo de vida podría recomendarle su médico? Si la angina de pecho de José se agrava, ¿qué tratamientos podría prescribirle el médico? Explica cómo funcionaría cada opción.

## PARA MAYOR INFORMACIÓN

Aldhous, P. "Print Me a Heart and a Set of Arteries". *New Scientist*, 15 de abril de 2006. Utilizando un dispositivo que parece una impresora de inyección, los bioingenieros están "imprimiendo" células en delgadas capas sobre una base de gel, donde comienzan a comportarse como un órgano real.

Ditlea, S. "The Trials of an Artificial Heart". *Scientific American*, julio de 2002. Describe los trabajos y los ensayos clínicos de corazones artificiales y otros dispositivos puente; incluye una discusión en torno a consideraciones éticas.

Fox, C. "Can Stem Cells Save Dying Hearts?" *Discover*, septiembre de 2005. Han comenzado los ensayos para inyectar en los corazones enfermos células madre de la médula ósea de los propios pacientes.

Gibbons, R. *et al.* "Waiting for Organ Transplantation". *Science*, 14 de enero de 2000. Estadísticas acerca de la necesidad, disponibilidad y tiempo de espera para el trasplante de órganos sugieren que es indispensable recurrir a nuevas fuentes de órganos.

Jain, R. K. y Carmeliet, P. F. "Vessels of Death of Life". *Scientific American*, diciembre de 2001. Aprendiendo a manipular la angiogénesis (la formación de vasos sanguíneos), los investigadores podrían encontrar formas de desintegrar tumores o de llevar más sangre al corazón.

Libby, A. "Atherosclerosis: The New View". *Scientific American*, mayo de 2002. Una descripción bellamente ilustrada de la formación de placa con un énfasis en el papel de la inflamación en las enfermedades cardíacas.

Martindale, D. "Reactive Reasoning". *Scientific American*, abril de 2005. Un compuesto en la sangre llamado proteína C reactiva podría ser esencial en la inflamación que desencadena la formación de placa aterosclerótica.

Wang, L. "Blood Relatives". *Science News*, 31 de marzo de 2001. Describe una variedad de enfoques y problemas al fabricar sangre artificial, así como las posibilidades en el futuro cercano.

## 33

## Respiración



Estos estudiantes dicen que dejarán de fumar más adelante.  
Sólo una de cada tres personas que afirman esto tendrá éxito.

## DE UN VISTAZO

### ESTUDIO DE CASO: Vidas que se esfuman

#### 33.1 ¿Por qué es necesario el intercambio de gases?

#### 33.2 ¿Cuáles son algunas de las adaptaciones evolutivas que permiten el intercambio de gases?

- Algunos animales de ambientes húmedos carecen de estructuras respiratorias especializadas
- Los sistemas respiratorios facilitan el intercambio de gases por difusión
- Las branquias facilitan el intercambio de gases en ambientes acuáticos
- Los animales terrestres tienen estructuras respiratorias internas

De cerca: Las branquias y los gases: un intercambio contracorriente

#### 33.3 ¿Cómo funciona el aparato respiratorio humano?

- La porción conductora del aparato respiratorio lleva aire a los pulmones
- El intercambio de gases se efectúa en los alveolos
- El oxígeno y el dióxido de carbono son transportados por mecanismos distintos

Guardián de la salud: Fumar: una decisión de vida

Enlaces con la vida: Quienes abandonan el hábito de fumar son ganadores

El aire se inhala activamente y se exhala pasivamente

El centro respiratorio del cerebro controla la frecuencia respiratoria

### OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Vidas que se esfuman



## ESTUDIO DE CASO VIDAS QUE SE ESFUMAN

LOS ESTUDIANTES SE REÚNEN afuera de los edificios de la universidad, encendiendo cigarrillos entre una clase y otra. Algunas toses se intercalan entre su conversación. Al igual que la mayoría de los adultos fumadores, muchos de estos estudiantes adquirieron el hábito en la preparatoria. “Comencé como un fumador social en la preparatoria”, dice un estudiante de primer año en la Universidad de Illinois citado en el periódico estudiantil. “Después, me volví adicto. Pero me gusta. Me gusta fumar y no me preocupan los efectos perjudiciales”. Esta universidad, donde aproximadamente el 30 por ciento de los estudiantes fumaron tabaco

durante el mes anterior, está registrando un incremento en el porcentaje de alumnos que fuman. De acuerdo con John Kirkwood, presidente de la Asociación Neumológica de Estados Unidos, cada día más de 4000 chicos de ese país menores de 18 años encienden su primer cigarrillo. Para muchos de ellos, éste es el comienzo de una lucha contra la adicción que durará toda la vida. De acuerdo con los Centros para el Control de Enfermedades, aproximadamente el 22 por ciento de los estudiantes de nivel medio superior fuman tabaco, aunque menos del 10 por ciento son fumadores frecuentes. Según las estadísticas, los fumadores jóvenes su-

fren infecciones respiratorias más severas y con mayor frecuencia que quienes no fuman, y el tabaquismo provoca retraso en el crecimiento de sus pulmones. La mayoría de los estudiantes están conscientes de los peligros que esto implica, pero afirman que dejarán de fumar “con el paso del tiempo”. ¿Estos fumadores tendrán probabilidad de abandonar el hábito de fumar? ¿Cuáles son sus probabilidades de morir a causa del tabaquismo? ¿Cómo interfiere el hábito de fumar con el aparato respiratorio desde los bronquios hasta el torrente sanguíneo?

### 33.1 ¿POR QUÉ ES NECESARIO EL INTERCAMBIO DE GASES?

¡Otra vez tarde! Al subir las escaleras de dos en dos peldaños para llegar al salón, sientes que te “arden” las pantorrillas. Recordando el capítulo 8, piensas: “¡Ah! Es la acumulación de ácido láctico: mis células musculares están fermentando glucosa porque no obtienen suficiente oxígeno para efectuar la respiración celular”. Al sentarte, tratando de no jadear demasiado y sintiendo los fuertes latidos del corazón, el malestar disminuye. El menor esfuerzo, aunado a una respiración rápida, garantiza un abasto adecuado de oxígeno ( $O_2$ ); el ácido láctico se vuelve a convertir en piruvato y luego se descompone en dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y agua, al tiempo que suministra energía adicional.

Estás experimentando en carne propia la relación entre la respiración celular y la inhalación de aire, que también se llama *respiración*. Cada célula del cuerpo (de todos los organismos) debe gastar continuamente energía para mantenerse. Cuando pedimos a nuestros músculos que nos suban rápidamente por las escaleras, la demanda es extrema. La respiración celular convierte la energía de nutrimentos (como el azúcar) en ATP que las células del cuerpo pueden usar, pero el proceso requiere un abasto continuo de oxígeno y genera dióxido de carbono como desecho. El rápido latir del corazón durante el relajamiento después de subir corriendo las escaleras es un recordatorio de que el sistema circulatorio funciona en estrecha armonía con el aparato respiratorio: extrae oxígeno del aire de los pulmones, lo lleva cerca de las células para que pueda difundirse y capta dióxido de carbono para liberarlo en los pulmones.

¿Cómo es que la inhalación de aire contribuye a la respiración celular? ¿Qué aspecto tiene el interior de un pulmón

y qué adaptaciones tiene para el intercambio de gases? ¿Por qué los pulmones están dentro de nuestro cuerpo y no afuera, donde estarían expuestos al aire de manera directa? ¿Cómo respiran los animales acuáticos? En este capítulo exploraremos las estructuras especializadas de los diversos sistemas respiratorios y su funcionamiento.

### 33.2 ¿CUÁLES SON ALGUNAS DE LAS ADAPTACIONES EVOLUTIVAS QUE PERMITEN EL INTERCAMBIO DE GASES?

En última instancia, el intercambio de gases en todos los organismos se basa en la difusión. La respiración celular agota el  $O_2$  y eleva los niveles de  $CO_2$ , creando gradientes de concentración que favorecen la difusión del dióxido de carbono hacia fuera de las células y del oxígeno hacia su interior. Aunque los sistemas respiratorios de los animales son asombrosamente diversos, todos tienen tres características en común que facilitan la difusión:

- La superficie respiratoria debe mantenerse húmeda, porque los gases deben estar disueltos en agua cuando se difunden hacia dentro o hacia fuera de las células.
- Las células que revisten las superficies respiratorias son muy delgadas, lo que facilita la difusión de gases a través de ellas.
- El sistema respiratorio debe tener una área superficial extensa en contacto con el entorno para que el intercambio de gases sea adecuado.

En los siguientes apartados examinaremos diversos sistemas respiratorios de los animales que han sido moldeados por el ambiente en el que evolucionaron.



a) Platelminto



b) Medusa



c) Esponja

#### FIGURA 33-1 Algunos animales carecen de estructuras respiratorias especializadas

Casi todos los animales que carecen de un aparato respiratorio tienen una demanda metabólica baja y una superficie corporal extensa y húmeda. **a)** El cuerpo aplanado de este platelminto marino intercambia gases con el agua. **b)** Las células del cuerpo con forma de campana de una medusa tienen una tasa metabólica baja y el agua de mar que entra y sale de la campana al nadar permite un intercambio adecuado de gases. **c)** Células flageladas hacen pasar corrientes de agua por numerosas aberturas del cuerpo de la esponja. Esas corrientes llevan partículas alimenticias microscópicas y permiten que las células intercambien gases con el agua.



### Algunos animales de ambientes húmedos carecen de estructuras respiratorias especializadas

En el caso de algunos animales que viven en ambientes húmedos, el exterior de su cuerpo, cubierto con una piel delgada y permeable a los gases, presenta una área lo bastante extensa como para que los gases se difundan. Si el cuerpo es muy pequeño y alargado, como en los gusanos nemátodos microscópicos, los gases sólo tienen que difundirse una distancia corta para llegar a todas las células del cuerpo. O bien, el cuerpo del animal podría ser delgado y aplanado, como en los gusanos platelmintos, donde la mayoría de las células están cerca de la piel húmeda a través de la cual los gases se difunden (FIGURA 33-1a).

Si la demanda energética es lo bastante baja, la proporción relativamente lenta de intercambio de gases por difusión podría ser suficiente, incluso para cuerpos más grandes y gruesos. Por ejemplo, las medusas pueden ser muy grandes, pero las células que están lejos de la superficie son relativamente inertes y requieren poco oxígeno (FIGURA 33-1b).

Otra adaptación para el intercambio de gases consiste en llevar el ambiente acuoso a las inmediaciones de todas las células del cuerpo. Las esponjas, por ejemplo, hacen circular el agua de mar a través de canales dentro de su cuerpo (FIGURA 33-1c).

Algunos animales combinan una superficie de piel extensa, a través de la cual hay difusión, con un sistema circulatorio bien desarrollado. Por ejemplo, en la lombriz de tierra los gases se difunden a través de la húmeda piel y se distribuyen por todo el cuerpo mediante un sistema circulatorio eficiente (véase la figura 32-1b). La sangre de los capilares cutáneos se lleva rápidamente el oxígeno que se difundió a través de la piel y mantiene un gradiente de concentración que favorece la difusión del oxígeno hacia el interior. La forma alargada del gusano garantiza que la superficie de la piel sea más grande en relación con su volumen interno. Este sistema es muy efectivo, ya que el lento metabolismo del animal requiere relativamente poco oxígeno. La piel debe mantenerse húmeda para seguir siendo eficaz como órgano de intercambio de gases; una lombriz con la piel seca se asfixiaría.

### Los sistemas respiratorios facilitan el intercambio de gases por difusión

Casi todos los animales han desarrollado sistemas respiratorios especializados que entran en contacto íntimo con su sistema circulatorio para intercambiar gases entre las células y el entorno. La transferencia de gases del entorno a la sangre y de ahí a las células, y de regreso, normalmente se efectúa en etapas que alternan el flujo masivo con la difusión. Durante el **flujo masivo**, líquidos o gases se mueven en gran cantidad a través de espacios relativamente grandes, desde áreas con mayor presión hacia áreas de menor presión. El flujo masivo difiere de la difusión, en la cual las moléculas se mueven individualmente de áreas de alta concentración a áreas de baja concentración (véase el capítulo 5). En los animales con sistemas respiratorios bien desarrollados —que van desde los insectos hasta los seres humanos—, el intercambio gaseoso en los sistemas respiratorios se lleva a cabo en las siguientes etapas ilustradas para el caso de los mamíferos en la FIGURA 33-2.

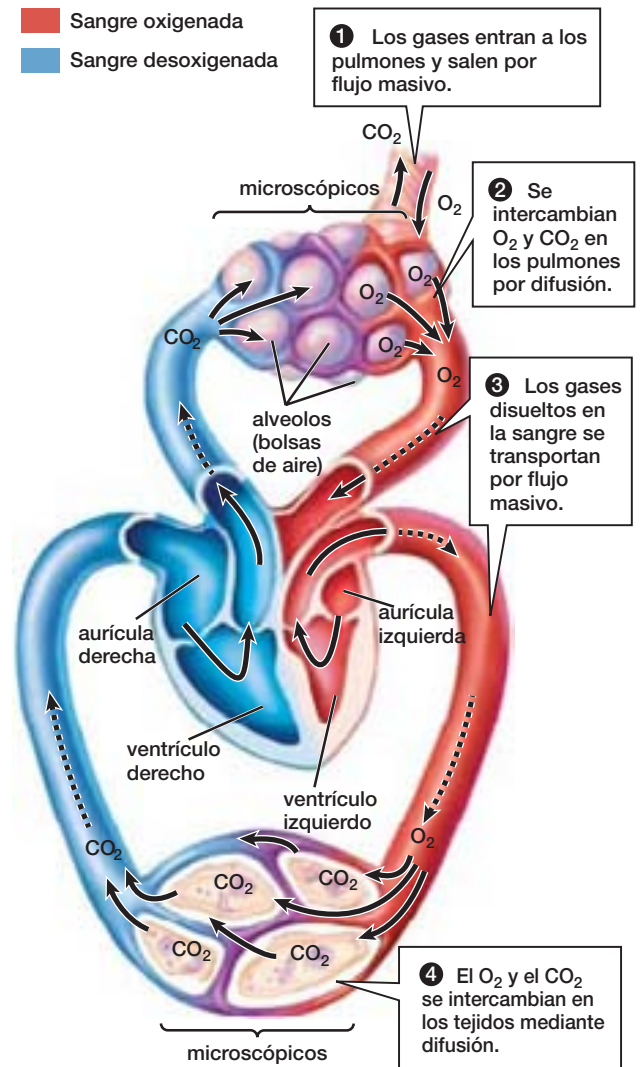


FIGURA 33-2 Descripción general del intercambio de gases tomando un mamífero como modelo

1. Aire o agua, con alto contenido de  $O_2$  y bajo contenido de  $CO_2$ , pasa a través de una superficie respiratoria mediante flujo masivo, lo que comúnmente se facilita con movimientos musculares de respiración.
2. El  $O_2$  y  $CO_2$  se intercambian a través de la superficie respiratoria de los pulmones mediante difusión; el oxígeno se lleva a los capilares del sistema circulatorio y el dióxido de carbono se extrae de la sangre.
3. Se transportan gases entre el sistema circulatorio y los tejidos por flujo masivo de sangre y son bombeados por todo el cuerpo mediante la actividad cardíaca.
4. Se intercambian gases entre los tejidos y el sistema circulatorio por difusión. En los tejidos, el  $O_2$  se difunde de los capilares hacia los tejidos circundantes; el  $CO_2$  se difunde de los tejidos al interior de los capilares, de acuerdo con sus gradientes de concentración.

**FIGURA 33-3** Branquias externas en un molusco

### Las branquias facilitan el intercambio de gases en ambientes acuáticos

Las **branquias** o agallas son las estructuras respiratorias de muchos animales acuáticos. El tipo más sencillo de branquia, presente en ciertos anfibios (véase la figura 33-5a) y moluscos nudibranchios (literalmente, “branquias desnudas”) (**FIGURA 33-3**), consiste en numerosas proyecciones de la superficie corporal hacia el agua circundante. En general, las branquias tienen complejas ramificaciones o pliegues que aumentan al máximo su área superficial. En algunos animales, el tamaño de las branquias depende de la disponibilidad de oxígeno en el agua circundante. Por ejemplo, las salamandras que viven en agua estancada (la cual tiene poca oportunidad de mezclarse con aire) tienen branquias más grandes que las que viven en agua bien aireada. Las branquias tienen una densa red de capilares inmediatamente abajo de sus delicadas membranas exteriores. Estos capilares acercan la sangre a la superficie, donde se intercambian gases.

El cuerpo de los peces protege sus delicadas membranas branquiales debajo de una tapa ósea protectora, el *opérculo*. Los peces crean una corriente continua sobre sus branquias bombeando agua por la boca y expulsándola por el opérculo justo detrás de las branquias (véase la figura E33-2 en la sección “De cerca”). Los peces pueden aumentar el flujo de agua nadando con la boca abierta; algunos nadadores rápidos, como la caballa, el atún y algunos tiburones (pero no todos), dependen considerablemente del nado para ventilar sus branquias. Los peces enfrentan un desafío al extraer el oxígeno del agua. Mientras que el oxígeno constituye aproximadamente el 21 por ciento del aire, en el agua constituye menos del 1 por ciento. Como el agua es unas 800 veces más densa que el aire, bombear el agua a través de las branquias consume mucha más energía que la inhalación de aire. Los peces han desarrollado un método muy eficiente, llamado *intercambio contracorriente*, para intercambiar los gases con el agua. Dentro de las branquias, el agua y el flujo sanguíneo fluyen en direcciones opuestas y mantienen relativamente constantes los gradientes de concentración, como se describe en “De cerca: Las branquias y los gases: un intercambio contracorriente”.

### Los animales terrestres tienen estructuras respiratorias internas

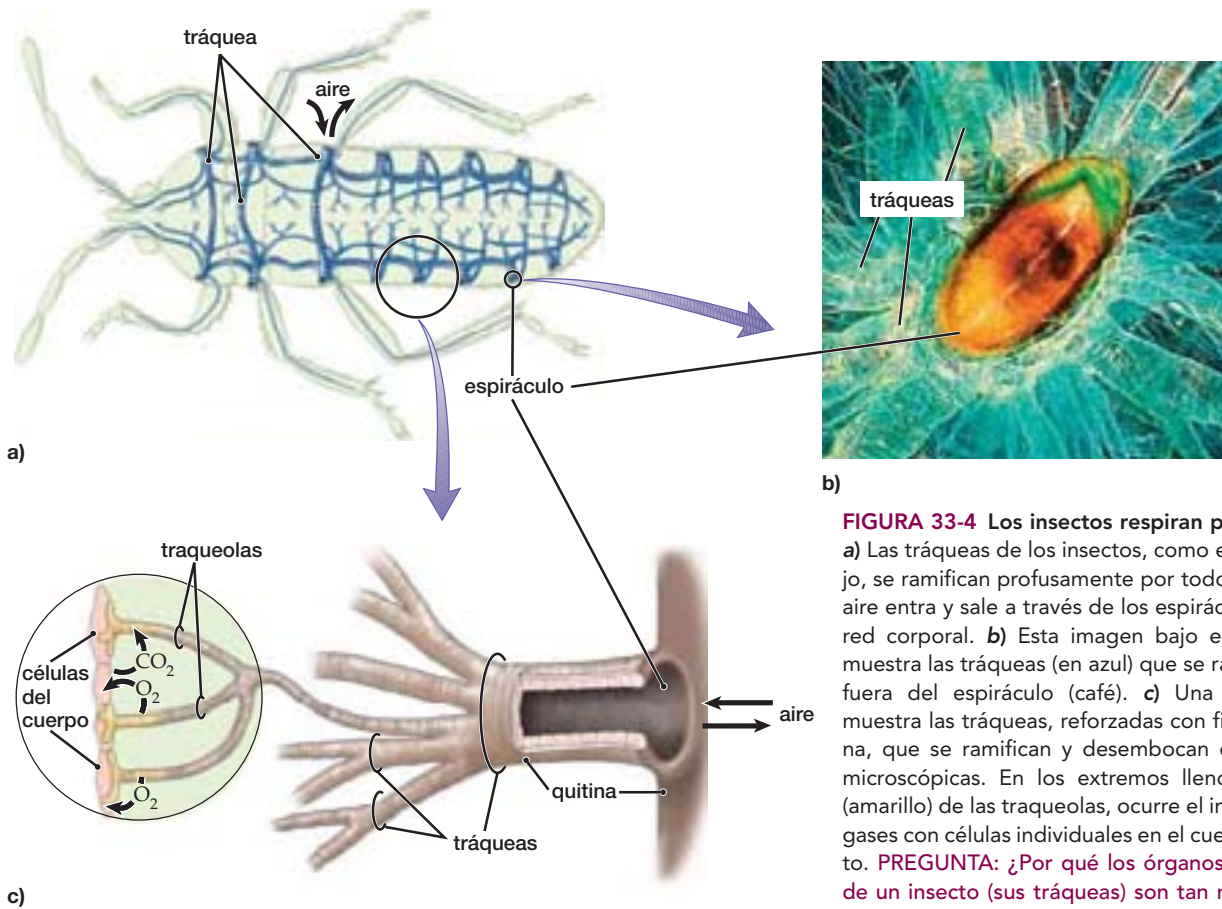
necesitan permanecer húmedas. Por ello, conforme los animales hicieron la transición del agua a la tierra seca a lo largo del tiempo evolutivo, fue necesario que desarrollaran estructuras respiratorias cuyas membranas superficiales delgadas estuvieran protegidas, sostenidas y cubiertas por una película de agua. La selección natural produjo una variedad de tales estructuras, incluyendo las tráqueas de los insectos y los pulmones de los vertebrados.

#### Los insectos respiran mediante tráqueas

Los insectos emplean un sistema de tubos internos muy ramificados llamados **tráqueas**, que llevan aire directamente a todo el cuerpo (**FIGURA 33-4a**). Las tráqueas, reforzadas con quitina (que también confiere dureza al esqueleto externo del insecto), penetran en los tejidos del cuerpo (**FIGURA 33-4b**) y se ramifican para formar canales microscópicos llamados *traqueolas*, las cuales permiten el intercambio de gases a través de sus terminaciones llenas de líquido (**FIGURA 33-4c**). Cada célula del cuerpo está cerca de una traqueola, lo que reduce al mínimo las distancias de difusión. El aire entra en las tráqueas y sale de ellas a través de una serie de aberturas llamadas **espiráculos**, situadas a los costados del abdomen. Los espiráculos tienen válvulas que permiten su apertura o cierre. Algunos insectos grandes utilizan movimientos musculares de bombeo en el abdomen para acelerar el movimiento de aire a través de las tráqueas.

#### Casi todos los vertebrados terrestres respiran por medio de pulmones

Los **pulmones** son cámaras que contienen superficies respiratorias húmedas protegidas dentro del cuerpo, donde se reduce al mínimo la pérdida de agua, en tanto que la pared corporal brinda sostén. El primer pulmón de un vertebrado probablemente apareció en un pez de agua dulce y consistió en una evaginación del tracto digestivo. El intercambio de gases en este sencillo pulmón ayudaba al pez a sobrevivir en agua estancada, escasa en oxígeno. Los anfibios, que ocupan la frontera entre la vida acuática y terrestre, utilizan branquias en la etapa larvaria y pulmones en la forma adulta, más terrestre. Por ejemplo, el renacuajo, totalmente acuático, cambia sus branquias por pulmones al convertirse en una rana, que es más terrestre (**FIGURAS 33-5a, b**). Las ranas y las salamandras utilizan su piel húmeda como superficie respiratoria complementaria.



**FIGURA 33-4** Los insectos respiran por tráqueas

a) Las tráqueas de los insectos, como este escarabajo, se ramifican profusamente por todo el cuerpo; el aire entra y sale a través de los espiráculos en la pared corporal. b) Esta imagen bajo el microscopio muestra las tráqueas (en azul) que se ramifican hacia fuera del espiráculo (café). c) Una amplificación muestra las tráqueas, reforzadas con fibras de quitina, que se ramifican y desembocan en traqueolas microscópicas. En los extremos llenos de líquido (amarillo) de las traqueolas, ocurre el intercambio de gases con células individuales en el cuerpo del insecto. **PREGUNTA:** ¿Por qué los órganos respiratorios de un insecto (sus tráqueas) son tan numerosos en comparación con los órganos respiratorios de un mamífero o un ave (los pulmones)?



a)



b)



c)

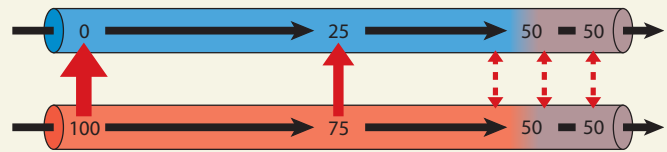
Las escamas de los reptiles (**FIGURA 33-5c**) reducen la pérdida de agua a través de la piel y permiten al animal sobrevivir en lugares secos. Sin embargo, las escamas también reducen la difusión de gases a través de la piel, por lo que los pulmones de los reptiles están mejor desarrollados que los de los anfibios.

**FIGURA 33-5** Los batracios y reptiles tienen diferentes adaptaciones respiratorias

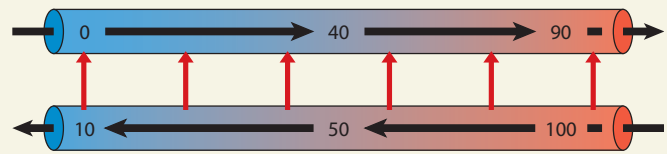
a) La rana toro, un anfibio, inicia la vida como renacuajo totalmente acuático, con branquias externas plumosas que después quedarán encerradas en una cámara protectora. b) Durante la metamorfosis para convertirse en una rana adulta que respira aire, las branquias se pierden y son remplazadas por pulmones sencillos con forma de bolsa. Tanto en el renacuajo como en la rana, también hay intercambio de gases por difusión a través de la piel, la cual debe mantenerse húmeda para funcionar como superficie respiratoria. c) Los reptiles adaptados a la vida terrestre, como esta serpiente, están cubiertos de escamas que restringen el intercambio de gases a través de la piel. Para compensar esta pérdida, los pulmones de los reptiles son más eficientes que los de los anfibios. **PREGUNTA:** ¿Cómo influyen las adaptaciones respiratorias de los anfibios en la variedad de hábitat en los que viven estos animales?

Durante el **intercambio contracorriente**, los líquidos que difieren en alguna propiedad (como temperatura o concentración de una sustancia disuelta) fluyen uno a lo largo del otro en direcciones opuestas. Durante el *flujo contracorriente*, se transfiere algo de calor o soluto del líquido con una mayor cantidad al que tiene menor cantidad. El intercambio contracorriente ayuda a reducir la pérdida de calor de las extremidades de los vertebrados, a reabsorber agua en los riñones y a maximizar el intercambio de gases en las branquias. Cuando los líquidos fluyen en direcciones opuestas, esto mantiene un gradiente de concentración de la sustancia disuelta de un líquido al otro en una distancia relativamente grande, lo que promueve la máxima difusión. La **FIGURA E33-1a** muestra el *intercambio concurrente*, en el que dos líquidos fluyen en la misma dirección. Aunque el gradiente inicial es grande, los dos líquidos finalmente adquieren iguales concentraciones del soluto (en color rojo), eliminando el gradiente de difusión. En contraste, el intercambio contracorriente (**FIGURA E33-1b**) mantiene un gradiente y da por resultado una transferencia mucho mayor del soluto.

Las branquias de los peces utilizan el intercambio contracorriente como un mecanismo eficiente para transferir el oxígeno del agua que fluye por ellas hacia los capilares de las branquias (**FIGURA E33-2a**). Las branquias de los peces consisten en una serie de filamentos (**FIGURA E33-2b**). Cada filamento se nutre por un vaso sanguíneo de entrada que transporta sangre desoxigenada y un vaso de salida que contiene sangre oxigenada; cada filamento está cubierto con delgados pliegues de tejido, llamados *laminillas*. La sangre fluye en los capilares a través de cada laminilla del vaso de entrada al de la salida, mientras que el agua fluye a través de los filamentos y de las laminillas en la dirección opuesta (**FIGURA E33-2c**). Durante su tránsito a través de las laminillas, la sangre de los capilares recoge el oxígeno (y libera el dióxido de carbono) en la contracorriente de agua. Como



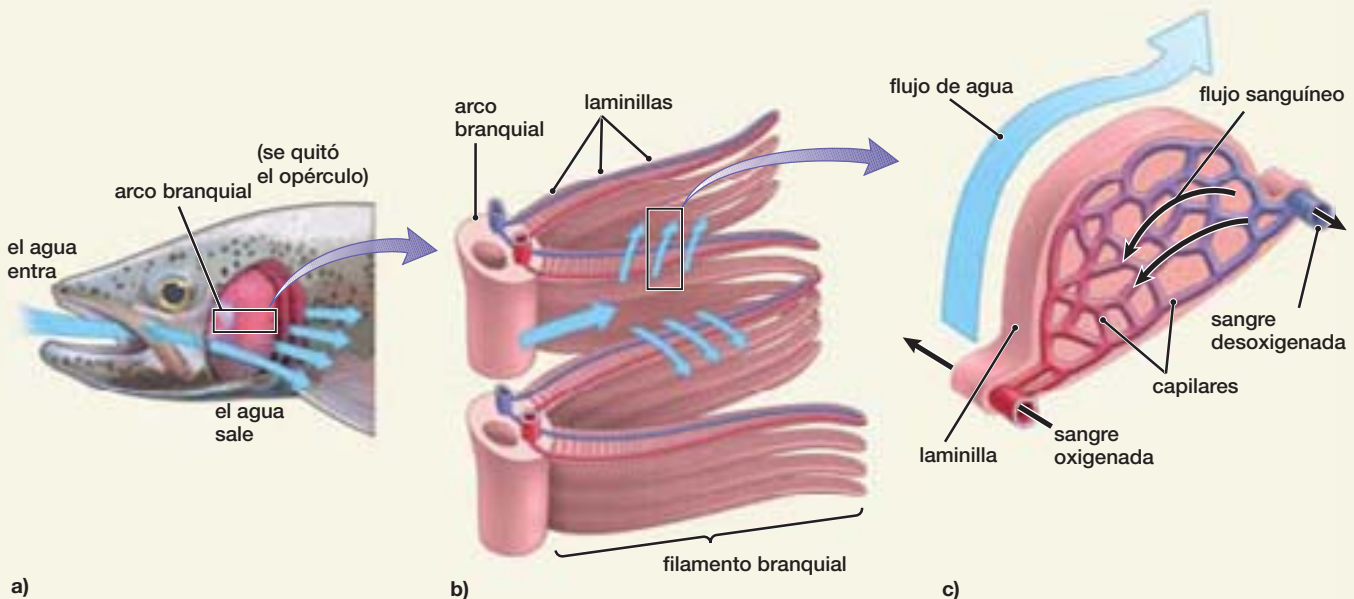
a) Intercambio concurrente



b) Intercambio contracorriente

**FIGURA E33-1** Intercambio concurrente versus contracorriente

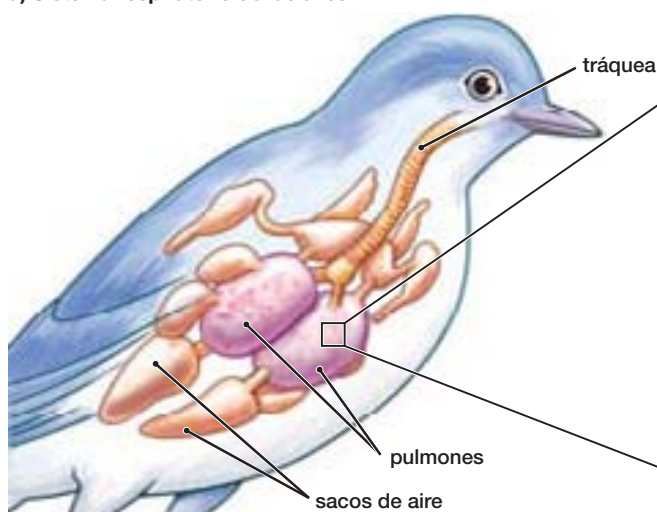
se ilustra en las figuras E33-1 y E33-2c, el agua y la sangre mantienen un gradiente de concentración de gases aproximadamente igual conforme pasan de una a otra. De esta forma, aunque el agua más oxigenada encuentra la sangre más oxigenada, esta configuración mantiene un gradiente de concentración constante que favorece la difusión de oxígeno del agua hacia la sangre (y de dióxido de carbono de la sangre hacia el agua) en todo el trayecto a través de la laminilla. El intercambio contracorriente es tan eficiente que algunos peces logran extraer el 85 por ciento del oxígeno del agua que fluye por sus branquias.



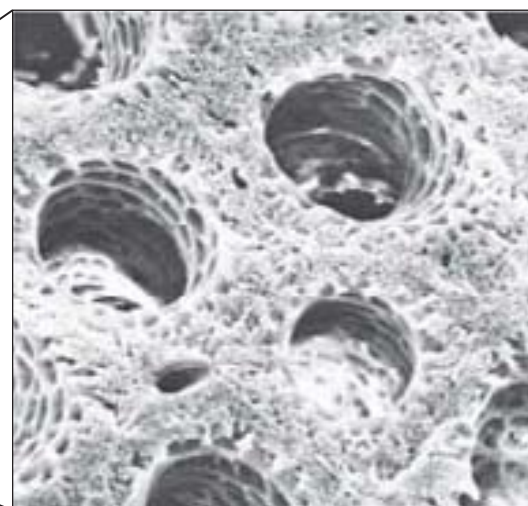
**FIGURA E33-2** Las branquias intercambian gases con el agua

Los peces bombean agua que entra por su boca y sale por sus branquias. **b)** El agua fluye por una densa capa de filamentos dispuestos en pares adheridos a los arcos óseos branquiales. **c)** Las laminillas se proyectan desde cada filamento branquial. El agua fluye por encima de las laminillas en la dirección opuesta a la del flujo sanguíneo que circula por su red capilar.

a) Sistema respiratorio de las aves



b) Tejido de parabronquios en los pulmones

**FIGURA 33-6** El sistema respiratorio de las aves es sumamente eficiente

a) Además de los pulmones, las aves poseen bolsas de aire que les permiten un intercambio más eficiente de gases. b) En las aves existen órganos tubulares para el intercambio de gases, llamados *parabronquios*, que permiten que el aire fluya, a través de los pulmones, hacia las bolsas de aire y de regreso. El aire fluye a través de canales con el extremo abierto; la región porosa entre los canales está llena de capilares y espacios de aire donde ocurre el intercambio gaseoso.

Todas las aves y los mamíferos respiran por medio de pulmones. Los pulmones de las aves han desarrollado adaptaciones que hacen posible un intercambio extremadamente eficiente de gases (FIGURA 33-6), lo cual es necesario para satisfacer la enorme demanda de energía del vuelo, a veces a miles de metros de altitud, donde escasea el oxígeno. En contraste con otros pulmones de vertebrados, que semejan bolsas, los de las aves están llenos de tubos huecos, con paredes delgadas, llamados *parabronquios*, que permiten el paso del aire en ambas direcciones (figura 33-6b). Las aves también se diferencian de otros vertebrados en que utilizan de siete a nueve sacos flexibles de aire como fuelles para bombear el aire hacia dentro y hacia fuera. Cuando un ave inhala, hace pasar aire por los pulmones, donde se extrae oxígeno; simultáneamente introduce aire en bolsas, algunas de las cuales están situadas más allá de los pulmones (figura 33-6a). Al exhalar, el aire oxigenado de las bolsas pasa otra vez por los pulmones, lo que permite al ave extraer oxígeno incluso al exhalar.

### 33.3 ¿CÓMO FUNCIONA EL APARATO RESPIRATORIO HUMANO?

El aparato respiratorio de los seres humanos y otros vertebrados pulmonados se puede dividir en dos partes: la **porción conductora** y la **porción de intercambio gaseoso**. La porción conductora consiste en una serie de conductos que transportan aire hacia y desde la parte de intercambio gaseoso, donde se intercambian gases con la sangre en bolsas diminutas dentro de los pulmones.

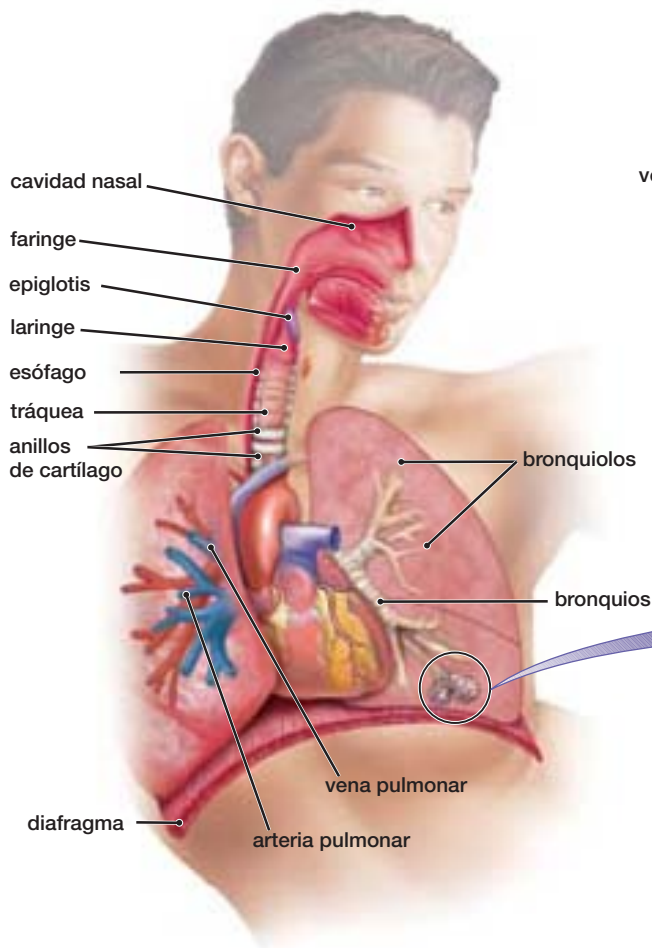
**La porción conductora del aparato respiratorio lleva aire a los pulmones**

la nariz o la boca, atraviesa la cavidad nasal u oral hasta llegar a una cámara común, la **faringe**, y luego viaja por la **laringe**, la “caja de sonido” u órgano de fonación (FIGURA 33-7). La abertura a la laringe está protegida por la **epiglotis**, un pliegue de tejido sustentado por cartílago. Durante la respiración normal, la epiglotis está inclinada hacia arriba, como se aprecia en la figura 33-7, y permite el libre flujo de aire a la laringe. Durante la deglución, la epiglotis se inclina hacia abajo y tapa la laringe, dirigiendo las sustancias al esófago. Si una persona trata de inhalar y tragar al mismo tiempo, este reflejo podría fallar y el alimento podría atorarse en la laringe e impedir el paso de aire a los pulmones. ¿Qué debemos hacer, si vemos que esto sucede? La **maniobra de Heimlich** (FIGURA 33-8) es fácil de efectuar y ha salvado incontables vidas.

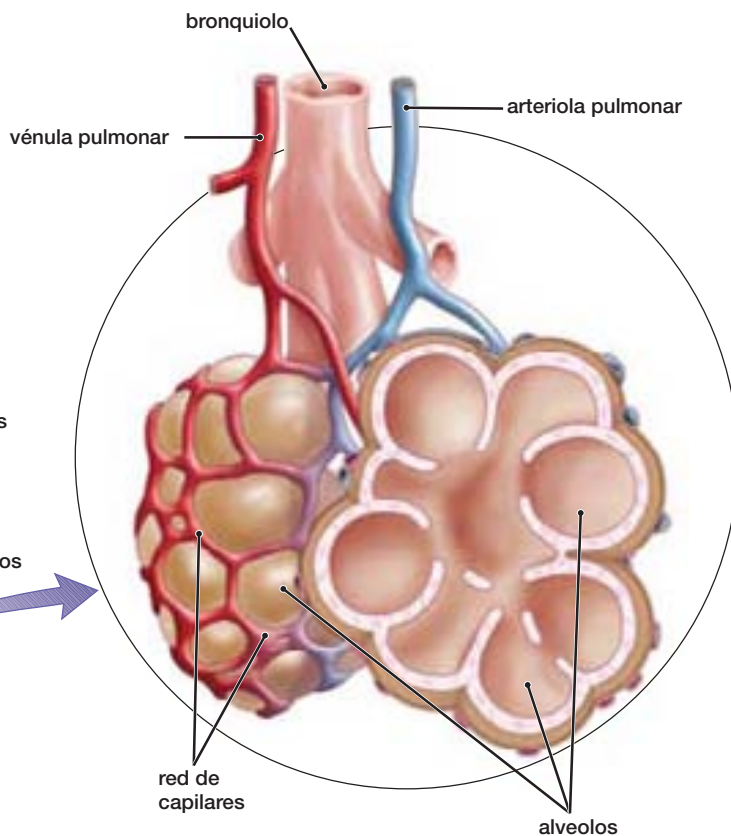
Dentro de la laringe están las **cuerdas vocales**, bandas de tejido elástico controladas por músculos. Las contracciones musculares pueden hacer que las cuerdas vocales obstruyan parcialmente la abertura dentro de la laringe. El aire exhalado hace que vibren y produzcan los sonidos del habla o el canto. El tono de los sonidos se altera estirando las cuerdas y las palabras se articulan con movimientos de la lengua y los labios.

Después de la laringe, el aire inhalado pasa a la **tráquea**, un tubo flexible cuyas paredes están reforzadas con bandas semicirculares de cartílago rígido. Dentro del tórax, la tráquea se divide en dos ramas grandes llamadas **bronquios**, una para cada pulmón. Dentro del pulmón, el bronquio se ramifica una y otra vez en tubos cada vez más pequeños llamados **bronquiolos**. Los bronquiolos terminan en los microscópicos **alveolos**

## a) Aparato respiratorio humano



## b) Alveolos con capilares

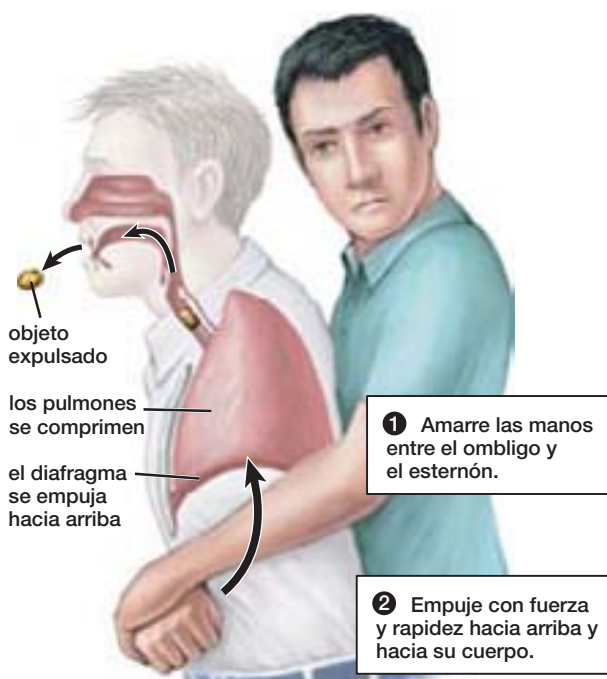
**FIGURA 33-7** El aparato respiratorio humano

El aire entra principalmente por la cavidad nasal y la boca y pasa a través de la faringe y la laringe hacia la tráquea. La epiglotis impide que entren alimentos a la tráquea, la cual se divide en dos ramas grandes, los bronquios, que conducen a los dos pulmones. Las ramas más pequeñas de los bronquios, los bronquiolos, conducen el aire a los alveolos, que son microscópicos y están rodeados por capilares, donde se efectúa el intercambio de gases. La arteria pulmonar lleva sangre sin oxígeno (azul) a los pulmones; la vena pulmonar lleva sangre oxigenada (roja) de regreso al corazón. **b)** Vista ampliada de los alveolos (se muestra su interior en esta sección recortada) y los capilares que los rodean.

quios y la tráquea. Al llegar a la faringe, el moco se expulsa tosiendo, o bien, se deglute. La acción de fumar interfiere con este proceso de limpieza porque paraliza los cilios (véase “Guardián de la salud: Fumar: una decisión de vida”). El *asma* se presenta cuando el tejido liso de los músculos en los bronquiolos se vuelve hipersensible y la producción de moco aumenta, generalmente por una alergia a alguna sustancia presente en el aire, como el polen. Los bronquiolos sufren espasmos y reducen su diámetro. La víctima de asma tiene especial dificultad para exhalar a través de los bronquiolos constreñidos, puesto que el volumen de aire reducido provocado por la exhalación permite que los conductos obstruidos con mucosidad se colapsen más fácilmente.

**El intercambio de gases se efectúa en los alveolos**

Los pulmones han evolucionado hasta crear una muy extensa superficie húmeda para el intercambio de gases. La densa red de bronquiolos conduce aire a diminutas estructuras, los alveolos, que se agrupan alrededor del extremo de cada bronquiolo como si se tratara de un racimo de uvas. En un adulto normal, los dos pulmones poseen, en conjunto, unos 300 millones de alveolos. Estas cámaras microscópicas (0.2 milímetros de diámetro) confieren al tejido pulmonar amplificado un aspecto esponjoso y de color rosado. Los alveolos ofrecen una extensa área superficial para la difusión, en total unos 140 metros cuadrados, unas 80 veces el área superficial de la piel de



**FIGURA 33-8** La maniobra de Heimlich puede salvar vidas

Si una persona se atragantó con comida u otro objeto y no puede respirar, la maniobra de Heimlich empuja hacia arriba el diafragma de la víctima y fuerza a que el aire salga de los pulmones, lo que facilita la expulsión del objeto. Se debe repetir esta maniobra si es necesario.

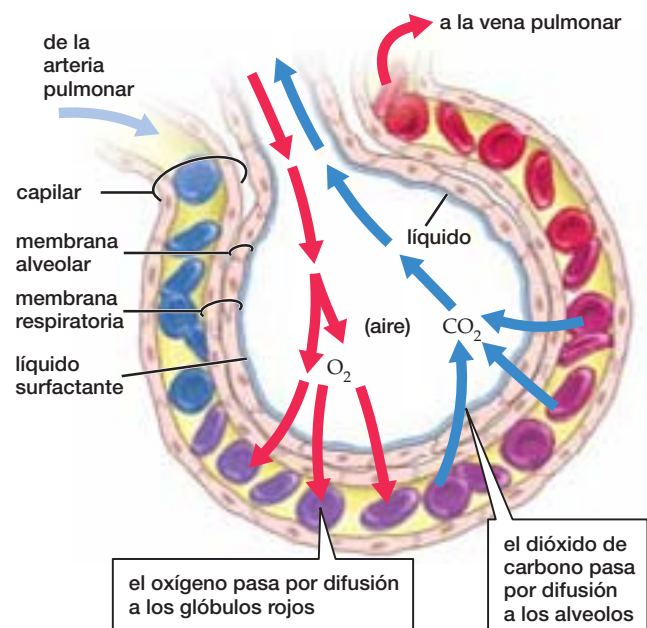
un humano adulto. Una red de capilares cubre aproximadamente el 85 por ciento de la superficie alveolar (véase la figura 33-7b). Las paredes de los alveolos, que constan de una sola capa de células epiteliales, forman la porción más interna de la *membrana respiratoria*. La membrana respiratoria a través de la cual se difunden los gases consiste en el epitelio de los alveolos y las células endoteliales que forman la pared de cada capilar. Estas dos capas están unidas entre sí por fibras de colágeno. Puesto que tanto la pared alveolar como las paredes de los capilares adyacentes apenas tienen una célula de espesor, los gases deben difundirse sólo una corta distancia para moverse entre el aire y la sangre (**FIGURA 33-9**). Los alveolos están revestidos con una delgada capa de líquido que contiene una secreción oleaginosa (llamada *surfactante*), la cual reduce la tensión superficial y evita que los alveolos se colapsen durante la exhalación. La enfermedad pulmonar llamada *enfisema*, que por lo regular es provocada por el tabaquismo, hace que los alveolos se rompan, lo que reduce severamente el área disponible para el intercambio de gases (el enfisema se explica con detalle en la sección “Guardián de la salud: Fumar: una decisión de vida”).

Una vez que la sangre con oxígeno circula por los tejidos del cuerpo, el corazón la bombea hacia los pulmones. La sangre que llega y rodea a los alveolos contiene poco oxígeno (porque las células del cuerpo lo han consumido) y mucho

dióxido de carbono (que es liberado por las células; véase la figura 33-2). El dióxido de carbono sale de la sangre por difusión, pues su concentración ahí es alta, y pasa al aire de los alveolos, donde su concentración es más baja (véase la figura 33-9). La concentración de dióxido de carbono en la sangre es especialmente alta después de un esfuerzo, como subir corriendo las escaleras para llegar a clase. Conforme el dióxido de carbono pasa por difusión al aire en los alveolos, el oxígeno pasa por difusión del aire —donde su concentración es alta— a la sangre, donde su concentración es baja. La sangre proveniente de los pulmones, ahora oxigenada y depurada de dióxido de carbono, vuelve al corazón, que la bombea a los tejidos del cuerpo. En los tejidos, el oxígeno pasa por difusión a las células porque su concentración es más baja en ellas que en la sangre.

### El oxígeno y el dióxido de carbono son transportados por mecanismos distintos

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) se produce constantemente a partir de la respiración de todas las células. La sangre de los capilares recoge el dióxido de carbono y lo lleva a los pulmones, donde pasa por difusión y se exhala. En la sangre el dióxido de carbono se transporta de tres formas distintas



**FIGURA 33-9** Intercambio de gases entre los alveolos y los capilares

Las paredes de los alveolos y de los capilares tienen apenas el grosor de una célula y están muy cercanas entre sí, con células cubiertas por una delgada capa de líquido. Esto permite que los gases se disuelvan y difundan fácilmente entre los pulmones y el sistema circulatorio.

## GUARDIÁN DE LA SALUD

## Fumar: una decisión de vida

Se calcula que unos 440,000 estadounidenses mueren por enfermedades relacionadas con el tabaquismo cada año; esto incluye cáncer pulmonar, enfisema, bronquitis crónica, infartos al miocardio, accidentes cerebrovasculares y otras formas de cáncer.

El humo del tabaco tiene un efecto drástico sobre las vías respiratorias humanas. Al inhalarse, las sustancias tóxicas como la nicotina y el dióxido de azufre paralizan los cilios que recubren a las vías respiratorias; un solo cigarrillo puede desactivarlos durante una hora. Como estos cilios “barrenderos” se encargan de eliminar las partículas inhaladas, el hecho de fumar inhibe su actividad justo cuando más se le necesita. La porción visible del humo del cigarrillo consiste en miles de millones de partículas microscópicas de carbono. Unas 200 sustancias tóxicas se adhieren a esas partículas, y se sabe que más de una docena de ellas son *carcinógenos* o posibles *carcinógenos* (sustancias que causan cáncer). Al quedar desactivados los cilios, las partículas se adhieren a las paredes de las vías respiratorias y entran en los pulmones.

El humo del cigarrillo también afecta negativamente a los glóbulos blancos que defienden las vías respiratorias envolviendo las partículas extrañas y las bacterias. Por ello, entran en los pulmones aún más bacterias y partículas de polvo y humo. Como respuesta a la irritación del humo del cigarrillo, las vías respiratorias producen más moco, que es otro método para atrapar las partículas extrañas. El problema es que, sin los cilios que lo desplazan, el moco se acumula y puede obstruir las vías respiratorias; la conocida “tos de fumador” es un intento por expulsarlo. Partículas microscópicas de humo se acumulan en los alveolos al paso de los años hasta que los pulmones del fumador quedan literalmente ennegrecidos (compara un pulmón normal en la **FIGURA E33-3a** con el pulmón enfermo en la **FIGURA E33-3b**). Cuanto más tiempo estén expuestos los delicados tejidos de los pulmones a los *carcinógenos* de las partículas atrapadas, mayor es la posibilidad de desarrollar cáncer (**FIGURA E33-3c**).

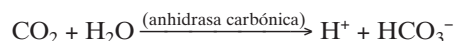
Algunos fumadores desarrollan *bronquitis crónica*, una infección persistente de los pulmones caracterizada por tos, inflamación del revestimiento de las vías respiratorias, aumento en la producción de moco y reducción en el número y la actividad de los cilios. El resultado es una reducción en el flujo de aire ha-

cia los alveolos. El *enfisema* se presenta (figura E33-3b) cuando las sustancias tóxicas del humo del tabaco estimulan al organismo para producir sustancias que hacen que los alveolos se vuelvan quebradizos y se rompan. La pérdida de los alveolos, donde se intercambian gases, provoca la falta de oxígeno en todos los tejidos del cuerpo. Una persona con enfisema tiene dificultad para respirar y su condición va empeorando hasta que muere.

El monóxido de carbono, presente en niveles elevados en el humo del tabaco, se une tenazmente a los glóbulos rojos en vez del oxígeno. Esta unión reduce la capacidad de la sangre para transportar oxígeno y, por consiguiente, obliga al corazón a trabajar más. La bronquitis crónica y el enfisema complican este problema. El tabaquismo también causa *aterosclerosis*, un engrosamiento de las paredes arteriales por depósitos grasos, lo cual puede causar infartos al miocardio (véase el capítulo 32). Por ello, los fumadores tienen una probabilidad 70 por ciento mayor que los no fumadores de morir por una enfermedad cardíaca. Las heridas y los huesos rotos de los fumadores tardan más en sanar y es más probable que su piel se arrugue prematuramente. El monóxido de carbono del humo del tabaco también podría contribuir a los problemas que experimentan las mujeres embarazadas que fuman, porque el feto en desarrollo se ve privado de oxígeno. Además, entre las complicaciones reproductivas que provoca el tabaquismo se incluyen una mayor incidencia de infertilidad, abortos espontáneos, menor peso de los bebés al nacer y, más adelante, problemas de aprendizaje y de conducta en los hijos.

El “*tabaquismo pasivo*”, que consiste en respirar humo de segunda mano, es un peligro real para la salud tanto de niños como de adultos. Los investigadores han llegado a la conclusión de que los hijos de padres que fuman tienen mayor probabilidad de contraer bronquitis, pulmonía, infecciones del oído, tos y resfriados, así como de tener capacidad pulmonar disminuida. Los niños que crecen al lado de fumadores tienen mayor probabilidad de desarrollar asma y alergias; en el caso de niños con asma, el número y la gravedad de los ataques asmáticos aumentan con la exposición al humo de segunda mano. Entre los adultos, los estudios han llegado a la conclusión de que los

**FIGURA 33-10a**): un poco se disuelve en el plasma; una mayor cantidad se une débilmente a la **hemoglobina**, una proteína que contiene hierro y que está contenida en los glóbulos rojos; y la mayor parte de él se combina con agua para formar iones bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) mediante la siguiente reacción:



Esta reacción ocurre en los glóbulos rojos, que contienen la enzima *anhidrasa carbónica*. La mayor parte del  $\text{HCO}_3^-$  pasa por difusión al plasma, donde ayuda a mantener el pH adecuado de la sangre (alrededor de un pH de 7.4; el  $\text{H}^+$  restante se queda en los glóbulos rojos unido a la hemoglobina). Esta reacción se invierte cuando los capilares corren por los alveolos, donde el dióxido de carbono es bajo (**FIGURA 33-10b**). Tanto la producción de iones bicarbonato como la unión del  $\text{CO}_2$  a la hemoglobina reducen la concentración de  $\text{CO}_2$  disuelto en la sangre y elevan el gradiente para que el  $\text{CO}_2$

A medida que la sangre de los capilares, rica en dióxido de carbono proveniente de los tejidos, fluye por los alveolos de los pulmones (o de las membranas de otros órganos donde se realiza el intercambio de gases), libera el  $\text{CO}_2$  y recoge el  $\text{O}_2$



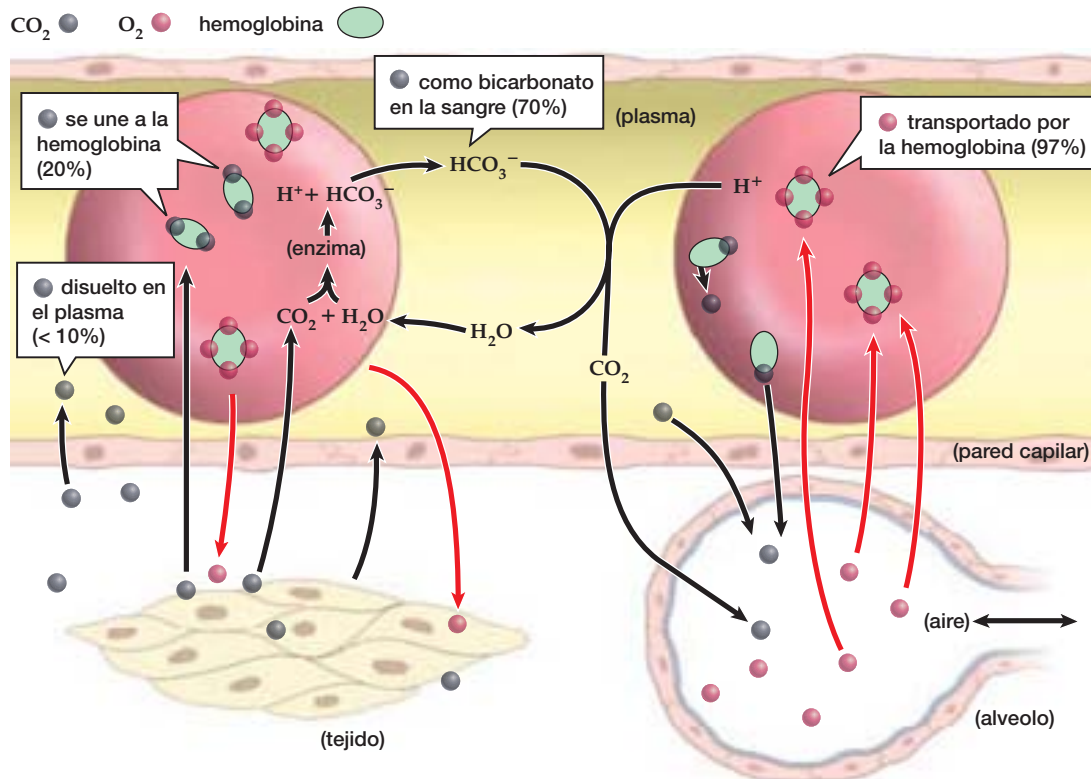
cónyuges no fumadores de las personas que fuman enfrentan un riesgo un 30 por ciento mayor de sufrir infartos al miocardio y cáncer pulmonar en comparación con los cónyuges de no fumadores. Un estudio reciente vincula la exposición incluso poco frecuente al humo de segunda mano con la aterosclerosis. Algunas dependencias del gobierno calculan que el humo de segunda mano es la causa de 3000 muertes por cáncer pulmonar y de por lo menos 35,000 muertes por enfermedades cardíacas de no fumadores cada año en Estados Unidos.

En los fumadores que abandonan el hábito, el cuerpo comienza de inmediato a sanar y la probabilidad de un infarto al miocardio, cáncer pulmonar y numerosas enfermedades más relacionadas con el tabaquismo disminuye gradualmente (véase "Enlaces con la vida: Quienes abandonan el hábito de fumar son ganadores").



**FIGURA E33-3** Daños a los pulmones provocados por el tabaquismo

a) Un pulmón normal. b) El pulmón de un fumador que murió de enfisema está ennegrecido y colapsado. c) El cáncer pulmonar se hace visible como una masa pálida; el tejido pulmonar que lo rodea está ennegrecido por las partículas de humo atrapadas. El tabaquismo es responsable de un 87 por ciento de todos los cánceres de pulmón y es la causa principal de muertes por cáncer en Estados Unidos.



**FIGURA 33-10** Mecanismo del intercambio de gases

## ENLACES CON LA VIDA

## Quienes abandonan el hábito de fumar son ganadores

¿Acaso tú o algún conocido tuyo han dejado de fumar? La Asociación Neumológica de Estados Unidos tiene noticias alentadoras: una línea del tiempo de las mejorías que experimentan los ex fumadores conforme sus cuerpos comienzan a recuperarse, a partir de que fumaron el último cigarrillo. Si una persona deja de fumar, después de 20 minutos, la presión arterial y el pulso disminuyen. Después de ocho horas, el nivel de monóxido de carbono en la sangre se reduce, mientras que el oxígeno en la sangre aumenta a niveles normales. Después de 24 horas su oportunidad de sufrir un infarto al miocardio disminuye. Después de 48 horas recupera su capacidad de oler y saborear los alimentos. De dos semanas a tres meses después, es capaz de hacer ejercicio más fácilmente conforme las funciones del sistema circulatorio y del aparato respiratorio mejoran. De uno a

nueve meses después, la tos disminuye y hay menos congestión en los senos paranasales; además, se siente más energía. Después de un año se tiene la mitad del riesgo de un fumador de padecer una enfermedad coronaria. Después de cinco años el riesgo de sufrir un accidente cerebrovascular comienza a disminuir. Después de 10 años de abandonar el hábito, el riesgo de sufrir cáncer pulmonar es la mitad del que tiene un fumador, y la probabilidad de padecer cáncer en el páncreas, los riñones, la vejiga, el esófago, la garganta y la boca también se reduce. Después de 15 años el riesgo de morir por algún factor relacionado con el tabaquismo es casi tan bajo como el de quienes jamás han fumado. (Con información de "What Are the Benefits of Quitting Smoking?", publicado por la Asociación Neumológica de Estados Unidos en <http://www.lungusa.org>).

totalmente para formar CO<sub>2</sub>. En niveles elevados, el CO es mortal porque "engaña" a la hemoglobina, uniéndose a ella en lugar del oxígeno y con una fuerza 200 veces mayor. Una persona puede morir si respira aire con tan sólo 0.1 por ciento de CO. La hemoglobina que contiene CO es de color rojo brillante (al igual que la hemoglobina oxigenada), pero no puede transportar oxígeno porque los sitios de unión para este gas se encuentran ocupados. Casi todas las víctimas de asfixia tienen labios y uñas azulosos porque su hemoglobina está desoxigenada; los labios y las uñas de las víctimas de envenenamiento con monóxido de carbono (que podría presentarse al respirar el escape de un automóvil en un espacio cerrado) son más rojos de lo normal.

### El aire se inhala activamente y se exhala pasivamente

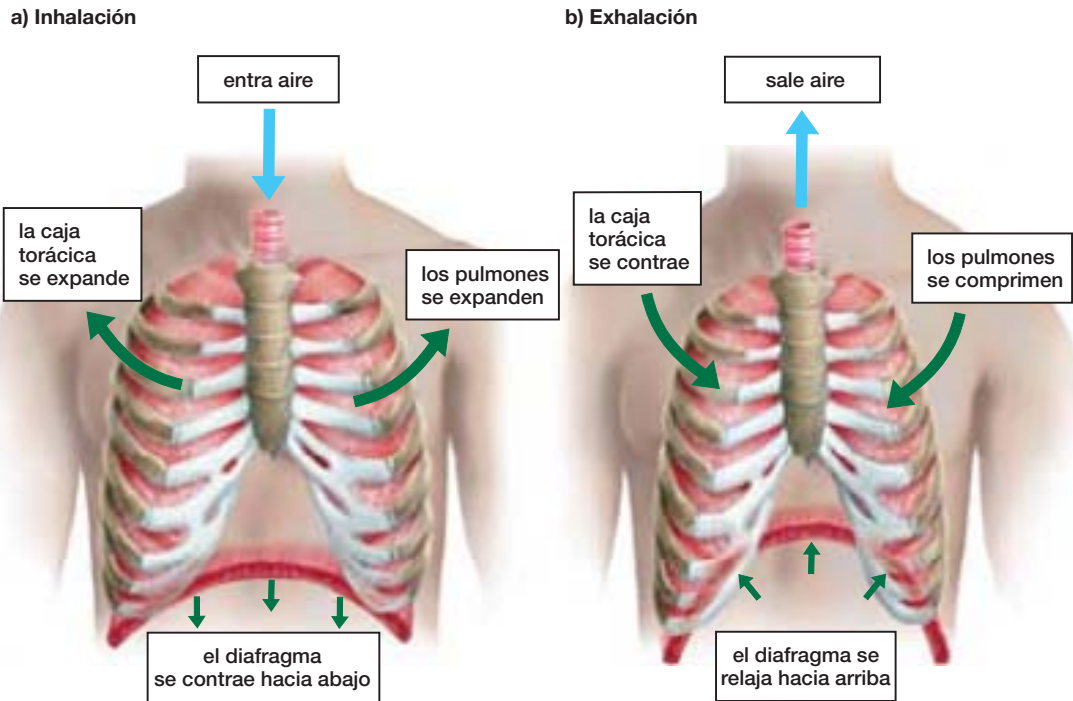
La respiración se efectúa en dos etapas: **1. inhalación**, cuando se introduce aire activamente a los pulmones, y **2. exhalación**, cuando se expulsa pasivamente de los pulmones. La inhalación se logra agrandando la cavidad torácica, mediante la contracción del **diafragma**, un músculo que forma el límite inferior de la cavidad torácica. En reposo, este delgado músculo se arquea hacia arriba, pero la contracción tira de él hacia abajo y, de esta forma, se expande la cavidad torácica. Los músculos de las costillas también se contraen, levantando las costillas hacia arriba y hacia fuera (**FIGURA 33-11a**). Cuando la cavidad torácica se expande, los pulmones se expanden con ella porque un vacío con una capa de líquido los mantiene pegados a la pared interna del tórax. Al expandirse los pulmones junto con la cavidad torácica durante la inhalación, su mayor volumen crea un vacío parcial que succiona aire hacia ellos. Una herida que perfora el tórax es peligrosa, en parte, porque permite que el aire penetre entre la pared torácica y los pulmones, evitando que éstos se expandan cuando la cavidad torácica lo hace.

Aunque el aire puede exhalarse de manera forzada, en reposo, la exhalación se efectúa automáticamente cuando se relajan los músculos que causan la inhalación. El diafragma relajado se curva hacia arriba y las costillas caen hacia abajo y hacia dentro, lo que reduce el tamaño de la cavidad torácica y expulsa el aire de los pulmones (**FIGURA 33-11b**

nen aire. Este aire evita que los delgados alveolos se colapsen y llena el espacio dentro de la porción conductora del sistema respiratorio. Una respiración normal desplaza apenas unos 500 mililitros de aire "nuevo" en el sistema respiratorio. De este volumen, sólo unos 350 mililitros llegan a los alveolos para que haya intercambio de gases. La respiración más profunda durante el ejercicio hace que se intercambie un volumen varias veces mayor.

### El centro respiratorio del cerebro controla la frecuencia respiratoria

Imaginemos tener que pensar para respirar. Por fortuna, la respiración es rítmica y automática, sin necesidad de conciencia. Pero, a diferencia del músculo cardíaco, los músculos que se usan para respirar no se autoactivan; cada contracción es estimulada por impulsos de células nerviosas. Estos impulsos se originan en el **centro respiratorio**



**FIGURA 33-11** Mecánica de la respiración

**a)** Durante la inhalación, los impulsos nerviosos rítmicos del cerebro estimulan al diafragma para que se contraiga (lo que tira de él hacia abajo) y también a los músculos que rodean a las costillas (lo que las mueve hacia arriba y hacia fuera). El resultado es un aumento en el tamaño de la cavidad torácica que succiona aire hacia su interior. **b)** La relajación de estos músculos (exhalación) permite que el diafragma se curve hacia arriba y que la caja torácica se colapse, lo que expulsa el aire de los pulmones. **PREGUNTA:** Imagina que una mujer que vive a nivel del mar viaja a la cima de una alta montaña; ahí, inhala con una contracción muscular exactamente de la misma fuerza a la que está acostumbrada cuando se encuentra en reposo en su casa a nivel del mar. ¿La inhalación resultante contendrá un volumen de aire mayor, menor o igual que al nivel del mar? ¿Por qué?

## OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO VIDAS QUE SE ESFUMAN



Mark Twain dijo una vez: "Dejar de fumar es fácil, yo lo he hecho mil veces". La nicotina es una poderosa droga adictiva, y tiene tanta probabilidad de conducir

a la adicción como la cocaína o la heroína. La mayoría de los fumadores consumen cigarrillos diariamente, unos 14 en promedio. Los investigadores han encontrado que, al igual que la cocaína y la heroína, la nicotina activa el centro cerebral de recompensa. El cerebro experimenta ciertas adaptaciones: se vuelve menos sensible, requiere mayores cantidades de nicotina para experimentar el mismo efecto de recompensa y provoca que el centro de recompensa se sienta subestimulado cuando se le retira la nicotina. Los síntomas de abstinencia pueden incluir el deseo compulsivo de nicotina, depresión, ansiedad, irritabilidad, dificultad para con-

centrarse, dolores de cabeza y sueño interrumpido. Así que no es de sorprender que para algunos, la única forma de dejar de fumar es no comenzar a hacerlo. Aunque por lo menos el 79 por ciento de los fumadores desearían abandonar el hábito, sólo un 2.5 por ciento de ellos lo logran cada año. Al llegar a los 60 años, aproximadamente un 33 por ciento habrá tenido éxito, la mayoría de ellos sólo después de dos o tres intentos. De aquellos que continúan fumando, alrededor de un tercio morirá a causa de un factor relacionado con el tabaquismo. Un estudiante de la Universidad de Illinois expresa una actitud común entre los jóvenes fumadores: "Sé que es malo para mí y que podría matarme. Tengo 21 años y no soy ciego ante las consecuencias. Mi abuelo murió de cáncer porque fumó toda su vida". Un estudiante que no fuma explica: "La gente fuma sin importarle lo que le pueda pasar. Uno podrá

mostrarles fotografías de pulmones (cancerosos) o de dientes podridos por el tabaco, pero esto no les causa ningún efecto... Cada quien tiene el derecho de elegir la vida que quiere".

**Piensa en esto** Los costos médicos directos de tratar el cáncer pulmonar ascienden aproximadamente a \$5000 millones cada año en Estados Unidos. Casi el 90 por ciento de estos cánceres podrían evitarse si la gente no fumara. La mayor parte de estos costos son absorbidos por los seguros médicos. Las crecientes tarifas de los seguros médicos hacen pensar que el porcentaje de trabajadores no asegurados aumentará y que los salarios disminuirán en tanto que las empresas luchan por contener los costos. Analiza las responsabilidades que acompañan al "derecho de elegir" fumar.

# REPASO DEL CAPÍTULO

## RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

### 33.1 ¿Por qué es necesario el intercambio de gases?

El sistema respiratorio sustenta la respiración celular. El aire rico en oxígeno que se inhala suministra oxígeno a la sangre, la cual lo lleva a las células de todo el cuerpo. La sangre también recoge CO<sub>2</sub> (producto de la respiración celular) de las células del cuerpo y lo transporta a los pulmones, de donde es liberado a la atmósfera.

### 33.2 ¿Cuáles son algunas de las adaptaciones evolutivas que permiten el intercambio de gases?

La respiración hace posible el intercambio de oxígeno y dióxido de carbono entre el cuerpo y el entorno mediante la difusión de esos gases, a través de una superficie húmeda. En los entornos húmedos, los animales cuyo cuerpo es muy pequeño o aplanado podrían depender exclusivamente de la difusión a través de la superficie corporal. Los animales con baja demanda metabólica y/o sistemas circulatorios bien desarrollados podrían carecer también de estructuras respiratorias especializadas. Los animales más grandes y activos han desarrollado sistemas respiratorios especializados. Los que viven en entornos acuáticos poseen branquias o agallas, como los peces y muchos anfibios. En tierra, las superficies respiratorias húmedas deben protegerse internamente. Esta necesidad ha dado pie al desarrollo evolutivo de tráqueas en los insectos, y pulmones en los vertebrados terrestres.

La transferencia de gases entre el sistema respiratorio y los tejidos se efectúa en una serie de etapas que alternan el flujo masivo con la difusión. Aire o agua se mueve por flujo masivo sobre la superficie respiratoria y los gases de la sangre son transportados por flujo masivo. Los gases atraviesan por difusión las membranas entre el sistema respiratorio y los capilares y entre éstos y los tejidos.

### 33.3 ¿Cómo funciona el aparato respiratorio humano?

El aparato respiratorio humano consiste en una porción conductora —integrada por la nariz y la boca, la faringe, la laringe, la tráquea, los bronquios y los bronquiolos— y una porción de intercambio gaseoso, formada por alveolos (bolsas microscópicas). La sangre dentro de una densa red de capilares que rodean a los alveolos libera dióxido de carbono y absorbe oxígeno del aire.

Casi todo el oxígeno de la sangre está unido a la hemoglobina dentro de los glóbulos rojos. Al eliminar el oxígeno de la solución, la hemoglobina mantiene un gradiente de concentración favorable que permite que el oxígeno pase fácilmente por difusión del aire a la sangre. Luego la hemoglobina transporta el oxígeno a los tejidos del cuerpo, donde se difunde siguiendo el gradiente de concentración. El dióxido de carbono se difunde hacia la sangre desde los tejidos y se transporta en tres formas: como iones bicarbonato, unido a la hemoglobina o disuelto en el plasma.

La respiración implica succionar activamente aire hacia los pulmones contrayendo el diafragma y los músculos de las costillas, lo que expande la cavidad torácica. El relajamiento de esos músculos hace que la cavidad torácica reduzca su volumen y expulse el aire. La respiración está controlada por impulsos nerviosos que se originan en el centro respiratorio del bulbo raquídeo. El ritmo de la respiración se modifica mediante receptores, como los del bulbo raquídeo que vigilan los niveles de dióxido de carbono en la sangre.

[Web tutorial 33.1](#) El aparato respiratorio humano

## TÉRMINOS CLAVE

alveolos *pág. 675*

branquia *pág. 672*

bronquiolos *pág. 675*

bronquios *pág. 675*

centro respiratorio  
*pág. 680*

cuerdas vocales *pág. 675*

diafragma *pág. 680*

espiráculo *pág. 672*

exhalación *pág. 680*

faringe *pág. 675*

flujo masivo *pág. 671*

hemoglobina *pág. 678*

inhalación *pág. 680*

intercambio contracorriente  
*pág. 674*

laringe *pág. 675*

porción conductora *pág. 675*

porción de intercambio  
de gases *pág. 675*

pulmón *pág. 672*

tráquea (en aves y mamíferos)  
*pág. 675*

tráquea (en insectos) *pág. 672*

## RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. Describe el intercambio contracorriente. ¿Cuáles son los beneficios de este proceso? ¿Cómo funciona en las branquias de los peces?
2. Rastrea la ruta que sigue el aire en el sistema respiratorio de los vertebrados, indicando las estructuras por las que fluye y el punto en el que se efectúa el intercambio de gases.
3. Explica algunas características de animales que viven en entornos húmedos que podrían complementar a los sistemas respiratorios o hacerlos innecesarios.
4. ¿Cómo se inician los movimientos respiratorios en el ser humano? ¿Cómo se modifican? ¿Por qué son adaptativos estos controles?
5. ¿Qué sucesos ocurren durante la inhalación humana? ¿Durante la exhalación? ¿Cuál de éstos es siempre un proceso activo?
6. Sigue el camino de una molécula de oxígeno en el cuerpo humano, desde la nariz hasta una célula del cuerpo.
7. Describe los efectos del tabaquismo sobre el aparato respiratorio humano.
8. Explica cómo el flujo masivo y la difusión interactúan para promover el intercambio de gases entre el aire y la sangre, y entre ésta y los tejidos.
9. Compara el transporte de dióxido de carbono y de oxígeno en la sangre. Incluye el origen y el destino de cada uno.
10. Explica cómo la estructura y la disposición de los alveolos los hacen idóneos para su papel en el intercambio de gases.

## APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. En algunos casos se realizan trasplantes de corazón-pulmón, cuando ambos órganos están dañados, por ejemplo, a causa del tabaquismo; pero hay muy pocos donadores. Con base en lo que sabes del aparato respiratorio, del sistema circulatorio y de los factores de estilo de vida que podrían dañarlos, ¿qué criterios usarías para seleccionar a un receptor de un trasplante de ese tipo?
2. La nicotina es una droga presente en el tabaco que causa varios de los efectos que ansían los fumadores. Comenta las ventajas y desventajas de los cigarrillos bajos en nicotina.
3. Comenta por qué una exposición breve a monóxido de carbono es mucho más peligrosa que una exposición breve a dióxido de carbono.
4. Repasa los sistemas respiratorio y circulatorio (véase el capítulo 32) de insectos y mamíferos. ¿De qué forma el sistema respiratorio de un insecto realiza algunas de las funciones del sistema circulatorio de los mamíferos?
5. María, una resuelta niña de tres años, amenaza con retener la respiración hasta morir si no consigue lo que quiere. ¿Podría cumplir su amenaza? Explica por qué.

## PARA MAYOR INFORMACIÓN

Platt, C. "Here, Breathe This Liquid". *Discover*, octubre de 2001. Llenar los pulmones con perfluorocarbonos fríos y enriquecidos con oxígeno podría incrementar las oportunidades de supervivencia de los pacientes cuyos corazones han dejado de latir. Después de que el corazón reinicia su actividad, el líquido a baja temperatura podría enfriar rápidamente el cuerpo y reducir los requerimientos del cerebro y las reacciones químicas dañinas que ocurren cuando el tejido cerebral se encuentra carente de oxígeno.

Rist, C. "The Physics of...Singing". *Discover*, agosto de 1999. El autor describe cómo las cuerdas vocales convierten el flujo de aire en notas musicales.

Seppa, N. "Secondary Smoke Carries High Price". *Science News*, 17 de enero de 1998. La investigación sugiere que fumar provoca aterosclerosis, que el daño continúa incluso después de que una persona ha dejado de fumar y que la exposición al humo de segunda mano aumenta significativamente la acumulación de placa en las arterias carótidas de los no fumadores.

Wheelwright, J. "Toxic Inheritance". *Discover*, marzo de 2006. Existe evidencia de que los contaminantes que inhala una madre podrían alterar su DNA en formas que podrían dañar a sus hijos.

## 34

## Nutrición y digestión



Carré Otis, ahora recuperada de la anorexia, observa su imagen saludable en el espejo. Las personas anoréxicas se miran al espejo y ven un individuo con sobrepeso, sin importar qué tan esqueléticos estén sus cuerpos.

## DE UN VISTAZO

### ESTUDIO DE CASO: ¿Adelgazar hasta morir?

#### 34.1 ¿Qué nutrientes necesitan los animales?

La energía se obtiene de los nutrientes y se mide en calorías  
Los lípidos incluyen triglicéridos (grasas), fosfolípidos y colesterol

**Guardián de la salud:** Cuando se antoja una hamburguesa con queso

Los carbohidratos son una fuente de energía rápida

Los aminoácidos forman los bloques de construcción de las proteínas

Los minerales son elementos indispensables para el cuerpo

Las vitaminas desempeñan diversos papeles en el metabolismo

Dos terceras partes del cuerpo humano se componen de agua

Ciertas pautas nutricionales ayudan a obtener una dieta equilibrada

#### 34.2 ¿Cómo se efectúa la digestión?

Generalidades de la digestión

En las esponjas la digestión se efectúa dentro de células individuales

Una bolsa con una abertura es el sistema digestivo más simple

La digestión en un tubo permite a los animales alimentarse con mayor frecuencia

Especializaciones digestivas

#### 34.3 ¿Cómo digieren los alimentos los seres humanos?

El desdoblamiento mecánico y químico de los alimentos se inicia en la boca

El esófago conduce los alimentos al estómago

Casi toda la digestión se efectúa en el intestino delgado

**Guardián de la salud:** Las úlceras digieren el tracto digestivo

Casi toda la absorción se efectúa en el intestino delgado

En el intestino grueso se absorbe agua y se forman heces

La digestión es controlada por el sistema nervioso y ciertas hormonas

#### OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿Adelgazar hasta morir?



## ESTUDIO DE CASO ¿ADELGAZAR HASTA MORIR?

LA SUPERMODELO CARRÉ OTIS explica: "Los sacrificios que yo hacía ponían en riesgo mi vida. Había entrado en un mundo que parecía basarse en la mentalidad de que había que mantener una delgadez anormal 'a cualquier costo'". Para muchos modelos, actores y otros personajes que están bajo la mirada del público, cumplir las expectativas de extrema delgadez es una batalla continua que puede conducirlos al desastre. Entre las víctimas célebres se encuentran Jane Fonda, la desaparecida princesa Diana y Elton John. Carré, quien mide 1.78, llegó a pesar 45 kilos. Ahora mantiene un peso saludable —a expensas de su carrera de modelo— y se ha convertido en vocera de la Asociación Nacional de Trastornos Alimentarios de Estados Unidos. Ella espera ayudar a otros a evitar el daño que sufrió su cuerpo. "Era común que las chicas con quienes yo trabajaba sufrieran infartos al miocardio; si un trastorno alimentario no se trata a tiempo, puede convertirse en una enfermedad mortal".

La selección natural ha equipado a los animales con fuertes impulsos para comer cuando se necesitan nutrientes (e incluso cuando se necesitan, si la comida está

disponible), pero en algunas personas, estos impulsos naturales tienen resultados negativos. En las últimas décadas hemos atestiguado un incremento tanto de personas que comen de más como de quienes padecen *trastornos alimentarios*, los cuales son afecciones caracterizadas por una severa perturbación del comportamiento normal de alimentación.

Los trastornos alimentarios incluyen dos enfermedades particularmente debilitantes: la *anorexia nerviosa* y la *bulimia nerviosa*. Los individuos con bulimia —quienes pueden ser anoréxicos, o bien, mantener un peso normal— participan en grandes comilonas, lo que significa que consumen grandes cantidades de alimentos en un breve lapso. Después de esas comilonas se provocan el vómito o toman una sobredosis de laxantes para eliminar los alimentos de su cuerpo. También es común que los bulímicos hagan ejercicio excesivo para quemar las calorías que consumieron. El vómito continuo daña el aparato digestivo y altera el equilibrio normal de sales en la sangre, lo que puede conducir a afecciones cardíacas.

Quienes padecen anorexia experimentan un miedo intenso a subir de peso, y logran

una pérdida excesiva de peso —algunos pierden hasta un 30 por ciento de su peso normal— comiendo muy poco y en ocasiones ejercitándose excesivamente. Aunque tienen una apariencia esquelética, los anoréxicos se ven gordos a sí mismos. Aproximadamente la mitad de todos los anoréxicos también desarrollan bulimia. Y las consecuencias son desastrosas. Los anoréxicos se ven demacrados, ya que pierden tanto grasa como músculo. En el proceso, a menudo alteran sus funciones digestivas, cardíacas, endocrinas y reproductivas. Las personas entre 18 y 24 años que padecen anorexia tienen 12 veces más probabilidades de morir que otras en su mismo grupo de edad.

Más del 90 por ciento de los diagnósticos de trastornos alimentarios corresponden a mujeres; la incidencia de anorexia está entre 0.5 y 2 por ciento, y la de bulimia entre el 1 y 2 por ciento de las mujeres estadounidenses. ¿Cómo es que los trastornos alimentarios dañan el aparato digestivo? ¿Qué los provoca? Consulta las respuestas en "Otro vistazo al estudio de caso".

### 34.1 ¿QUÉ NUTRIMENTOS NECESITAN LOS ANIMALES?

Todos los alimentos, desde el brócoli hasta una malteada de chocolate, contienen nutrimentos que necesitamos para sobrevivir. Los **nutrimentos** se clasifican en seis categorías: lípidos, carbohidratos, proteínas, minerales, vitaminas y agua. Estas sustancias satisfacen las necesidades básicas del cuerpo, incluyendo energía y materias primas para sintetizar las moléculas de la vida: enzimas, proteínas estructurales, material genético, portadores de energía, el calcio que compone los huesos y los componentes a base de lípidos de todas las membranas celulares, sólo por mencionar algunas.

#### La energía se obtiene de los nutrimentos y se mide en calorías

Las células dependen de un continuo suministro de energía para mantener su increíble complejidad y realizar una amplia gama de funciones. Cuando se les priva de esta energía, las células comienzan a morir en el lapso de unos cuantos segundos. Dos tipos de nutrimentos aportan la mayor cantidad de energía a la dieta de los animales: carbohidratos y lípidos (en Estados Unidos un individuo promedio también obtiene alrededor de un 15 por ciento de su energía de las proteínas). Estas moléculas se desdoblan mediante el proceso de digestión y sus subunidades se metabolizan durante la respiración celular; de esta forma, se libera energía que se capta en el trifosfato de adenosina (ATP) (véase el capítulo 3).

La energía de los nutrimentos se mide en calorías. Una **caloría** es la cantidad de energía requerida para elevar la temperatura de 1 gramo de agua en 1 grado Celsius. El contenido calórico de los alimentos se mide en unidades de 1000 calorías (*kilocalorías*), también llamadas **Calorías** (con *C* mayúscula). El cuerpo humano promedio en reposo quema unas 70 Calorías por hora, pero esta cantidad varía en función de la complejidad del cuerpo, la masa muscular, la edad, el sexo y factores genéticos. El ejercicio eleva considerablemente los requerimientos calóricos: un atleta bien entrenado puede elevar temporalmente su consumo de calorías desde 1 Caloría por minuto en reposo hasta casi 20 Calorías por minuto durante el ejercicio vigoroso (tabla 34-1).

#### Los lípidos incluyen triglicéridos (grasas), fosfolípidos y colesterol

Aunque en nuestra sociedad excedida de peso a veces se les considera como enemigos, los triglicéridos y otros lípidos son

nutrimentos esenciales. Los lípidos son un grupo diverso de moléculas que incluyen los *triglicéridos* (grasas), los *fosfolípidos* y el *colesterol* (véase el capítulo 3). Los triglicéridos se utilizan primordialmente como fuente de energía. Los fosfolípidos son importantes componentes de las membranas celulares, en tanto que el colesterol se emplea en la síntesis de membranas celulares, hormonas sexuales y bilis (que ayuda a desdoblar los lípidos). Algunas especies animales son capaces de sintetizar todos los lípidos que constituyen los “bloques de construcción” necesarios para formar los lípidos especializados que necesitan. Otras especies deben obtener algunos de éstos, llamados **ácidos grasos esenciales**, a partir de su alimento. Por ejemplo, el ser humano no puede sintetizar el ácido linoleico, que se necesita para la síntesis de ciertos fosfolípidos, por lo que debe obtener ese ácido graso esencial de la dieta.

#### Los animales almacenan energía en forma de triglicéridos

Cuando la dieta de un animal proporciona más energía de la que éste necesita para sus actividades metabólicas, casi todos los carbohidratos y proteínas en exceso se convierten en triglicéridos para almacenarse. En cada kilogramo de triglicéridos se almacenan aproximadamente unas 8000 Calorías. Los triglicéridos tienen dos ventajas importantes como moléculas para almacenar energía. En primer lugar, son la fuente de energía más concentrada, pues contienen más del doble de energía por unidad de peso que los carbohidratos o las proteínas (unas 9 Calorías por gramo de triglicéridos, en comparación con las 4 Calorías por gramo, en el caso de las proteínas y los carbohidratos). La segunda ventaja es que los lípidos son *hidrofóbicos*, es decir, no se mezclan con el agua. Por consiguiente, los depósitos de grasa no causan una acumulación adicional de agua en el cuerpo. Por ambas razones, los triglicéridos almacenan más calorías con menos peso que otras moléculas. Ello permite al animal moverse con mayor rapidez (lo que es importante para escapar de depredadores y cazar presas) y gastar menos energía al moverse (lo cual es importante si el abasto de alimentos es limitado). Puesto que el ser humano evolucionó con las mismas restricciones en cuanto a alimentos que los demás animales, tiene una notable tendencia a comer cuando hay alimentos disponibles, a menudo más de lo que necesita, pues podría requerir la energía más adelante. Algunas sociedades modernas tienen acceso casi ilimitado a alimentos altos en calorías. En tal contexto, nuestras tendencias naturales a comer en exceso se convierten en una desventaja y necesitamos tener una enorme fuerza de volun-

Tabla 34-1 Energía aproximada consumida por una persona de 68 kg en diferentes actividades

Actividad	Calorías/h	Tiempo para “quemar”			
		500 Calorías Hamburguesa	340 Calorías Cono de helado	70 Calorías Manzana	40 Calorías 1 taza de brócoli
Correr (10 kph)	700	43 min	26 min	6 min	3 min
Esquí a campo traviesa (moderado)	560	54 min	32 min	7.5 min	4 min
Patinaje en ruedas	490	1 h 1 min	37 min	8.6 min	5 min
Andar en bicicleta (17 kph)	420	1 h 11 min	43 min	10 min	6 min
Caminar (5 kph)	250	2 h	1 h 12 min	17 min	10 min
Jugar con Frisbee®	210	2 h 23 min	1 h 26 min	20 min	11 min
Estudiar	100	5 h	3 h	42 min	24 min



El médico de Patrick Deuel le planteó un ultimátum: hospitalizarse y perder peso o morir. Pero había que derrumbar una pared para que Patrick pudiera salir de su habitación, donde sus 486 kilos lo tenían atrapado. Después de casi un año de dieta y ejercicio bajo supervisión médica, Patrick perdió 191 kilos y estaba listo para una cirugía de derivación gástrica o *bypass*. El médico selló la mayor parte del estómago de Patrick y dejó sólo una pequeña bolsa que se unió con la parte intermedia del intestino delgado (FIGURA E34-1a). Ahora su estómago sólo puede recibir pequeñas porciones de alimento, al igual que su intestino delgado, donde se absorben los nutrimentos ricos en calorías.

La obesidad es una epidemia creciente en Estados Unidos. El porcentaje de adultos con sobrepeso ha aumentado a más del doble desde 1980, y entre los niños y adolescentes, ese porcentaje se ha elevado a más del triple. Una forma simple de hacer una estimación de la grasa corporal es calcular el **índice de masa corporal (IMC)**, que se obtiene dividiendo el peso de un individuo (en kilogramos) entre su altura al cuadrado (en el sistema métrico decimal). El cálculo del IMC se aplica a la gente con cantidades promedio de músculo y supone que el peso que excede de esta cantidad corresponde a grasa, de manera que el cálculo no es exacto para personas con una gran musculatura, como aquellas que practican el físico-construccionismo. Muchos sitios de Internet incluyen tablas o efectúan este cálculo por ti: busca bajo el nombre IMC. Un IMC entre 20 y 24 se considera saludable. Un estudio reciente de los Centros para el Control de Enfermedades concluyó que el 66 por ciento de todos los adultos estadounidenses tienen sobrepeso (IMC  $\geq$  25) y que el 32 por ciento de ellos son obesos (IMC  $\geq$  34).

**¿GENÉTICAMENTE OBESO?**

¿Acaso algunas personas “nacieron para ser gordas”? El médico describió a Patrick como “obeso” cuando éste apenas tenía tres meses. Los investigadores han encontrado por lo menos 134 genes diferentes que influyen en el peso de algún modo. Los individuos difieren genéticamente en la forma como sus cuerpos responden al ejercicio, en qué tan satisfechos se sienten después de comer, en cuánta grasa almacenan y en cuántas calorías consumen sus cuerpos en reposo. Aunque nuestros genes no han cambiado apreciablemente en los últimos 20 años, el número de gente con sobrepeso en Estados Unidos ha aumentado drásticamente. A pesar de las diferencias genéticas, toda persona con sobrepeso ha comido más de lo que su cuerpo necesita, al sucumbir ante un impulso que ayudó a nuestros ancestros a sobrevivir a la hambruna. El Instituto Nacional de Salud de Estados Unidos (NIH) aconseja comer más veces pero en menor cantidad, y elegir frutas, vegetales, cereales integrales, carnes magras y lácteos. En respuesta a la demanda de consumo, varias cadenas de comida rápida ahora incluyen opciones saludables en sus menús. El NIH también recomienda realizar ejercicio de moderada intensidad (como caminar, por ejemplo) durante 30 minutos por lo menos, de ser posible, a diario. Para perder peso o para mantenerlo, algunas personas requieren ejercicio adicional. ¿Te parece mucho trabajo? Quizá, pero bien vale la pena. Los individuos con sobrepeso tienen un mayor riesgo de sufrir infartos al miocardio y accidentes cerebrovasculares, diabetes, cáncer, apnea del sueño (es decir, problemas para respirar durante el sueño), osteoartritis, enfermedades hepáticas y cálculos biliares.

**¿DELGADO MEDIANTE CIRUGÍA?**

Algunas personas tienen dificultad inusual para controlar su peso; en tal caso, los médicos podrían recomendar cirugía para aquellos cuyo peso representa un grave riesgo para la salud. Stuart Logan, por ejemplo, comenzó a engordar cuando cursa-

ba el primer año de la escuela elemental. Para cuando tenía 16 años, pesaba 265 kilos; entonces optó por la *cirugía de la banda gástrica*, aprobada recientemente en Estados Unidos. Como se observa en la FIGURA E34-1b, este proceso limita el ingreso de alimento al colocar una banda alrededor de la parte superior del estómago. Tres meses después de la cirugía (que le permitió reducir a la mitad la entrada de alimento a su estómago), Logan había perdido 18 kilos y por fin podía sentarse en el sillón de la peluquería. Mientras que algunos estudios indican que la banda gástrica produce resultados menos espectaculares que la cirugía de derivación gástrica, se trata de una operación quirúrgica más simple, es reversible e implica menos complicaciones que esta última, la cual en ocasiones provoca una deficiencia nutricional porque evita el paso de alimento por una parte del intestino delgado. Mientras tanto, Patrick ya se sometió a una segunda operación para eliminar un sobrante de piel y tejido abdominal que anteriormente albergaba los 272 kilos que perdió. Ahora, que pesa menos de 180 kilos, se regocija al poder ver sus rodillas y ser capaz de caminar de nuevo.

**a) Cirugía de derivación gástrica (o bypass)**



**b) Cirugía de banda gástrica**



**FIGURA E34-1** Cirugías para perder peso



**FIGURA 34-1** La grasa sirve como aislante

Estas morsas pueden soportar las heladas aguas de los mares polares porque cuentan con una gruesa capa de triglicéridos (grasa) aislante bajo la piel.

tad para evitar la obesidad (véase “Guardián de la salud: Cuando se antoja una hamburguesa con queso”).

En los animales que mantienen una temperatura corporal elevada, los depósitos de triglicéridos sirven también como aislante, además de almacenar energía. Los triglicéridos, que conducen el calor con una rapidez tres veces menor que otros tejidos corporales, por lo regular se almacenan en una capa debajo de la piel. Las aves (especialmente aquellas que no vuelan, como los pingüinos) y los mamíferos que viven cerca de los polos o en las frías aguas oceánicas necesitan aún más esta capa aislante, la cual reduce la cantidad de energía que deben gastar para mantenerse calientes (**FIGURA 34-1**).

### Los carbohidratos son una fuente de energía rápida

Los carbohidratos (descritos en el capítulo 3) incluyen los azúcares *monosacáridos* (como la glucosa, de la cual las células obtienen la mayor parte de su energía), *disacáridos* (como la sacarosa, que es el “azúcar de mesa”) y largas cadenas de azúcares llamadas *polisacáridos*. El *almidón*, el *glucógeno* y la *celulosa* son polisacáridos compuestos de cadenas de moléculas de glucosa. El almidón es la principal fuente de energía para la gente y muchos otros animales, y el principal material para almacenar energía en el caso de las plantas. El glucógeno permite a los animales almacenar energía a corto plazo. La celulosa es el principal componente estructural de las paredes celulares de las plantas y es el carbohidrato más abundante en el planeta, pero sólo unas cuantas especies de animales son capaces de digerirla, como se describirá más adelante.

Los animales, incluido el ser humano, almacenan el carbohidrato **glucógeno** (una cadena grande y muy ramificada de moléculas de glucosa) en el hígado y los músculos. Muchos atletas comen alimentos ricos en carbohidratos, como papas y pasta, para hacer que sus cuerpos acumulen tanto glucógeno como sea posible. Aunque el ser humano podría llegar a almacenar cientos de kilos de grasa, sólo almacena menos de un cuarto de kilo de glucógeno. Durante el ejercicio, digamos al correr, el cuerpo utiliza esta reserva de glucógeno como fuente rápida de energía. Si la actividad es prolongada, como en el caso de un maratonista, el glucógeno almacenado podría agotarse. La expresión “echar el bofe” describe la fatiga extrema que los corredores de larga distancia podrían experimentar después de agotar su reserva de glucógeno. Cuando esto ocurre, el corredor debe depender principalmente de los ácidos grasos de la grasa corporal almacenada para obtener energía. Como en este caso las transformaciones metabólicas son más

complejas, toma aproximadamente el doble de tiempo extraer energía de los ácidos grasos que del glucógeno. Un corredor al que se le ha agotado el glucógeno, incluso uno con abundante provisión de triglicéridos, podría necesitar reducir su paso drásticamente para compensar esta reducción de energía disponible. Por esta razón, los maratonistas a menudo beben soluciones azucaradas durante la carrera.

### Los aminoácidos forman los bloques de construcción de las proteínas

En el tracto digestivo, las proteínas de los alimentos se desdoblán en subunidades, los aminoácidos, los cuales pueden utilizarse para sintetizar nuevas proteínas. Las proteínas desempeñan muchas funciones distintas en el cuerpo, al actuar como enzimas, receptores en las membranas celulares, moléculas portadoras de oxígeno (hemoglobina), proteínas estructurales (cabello y uñas), anticuerpos y proteínas musculares. Los aminoácidos en exceso sirven como fuente de energía, o bien, se convierten en triglicéridos que se almacenan.

El ser humano puede sintetizar 11 de los 20 aminoácidos distintos empleados en las proteínas. Aquellos que no pueden sintetizarse se llaman **aminoácidos esenciales** y deben obtenerse de alimentos como carne, leche, huevos, maíz, frijoles y soya. Puesto que muchas proteínas vegetales son deficientes en algunos de los aminoácidos esenciales, quienes llevan una dieta vegetariana deben incluir gran variedad de productos vegetales (por ejemplo, leguminosas y cereales) cuyas proteínas combinadas proporcionen los nueve aminoácidos esenciales. Una deficiencia de proteínas puede provocar una condición debilitante llamada *kwashiorkor* (**FIGURA 34-2a**), que por lo general se encuentra en países azotados por la pobreza.

### Los minerales son elementos indispensables para el cuerpo

Los **minerales** son elementos que desempeñan papeles cruciales en la nutrición animal (**tabla 34-2**). Los minerales deben obtenerse por medio de la dieta, ya sea en los alimentos o disueltos en agua potable, porque el cuerpo no puede fabricarlos. Entre los minerales necesarios están el calcio, el magnesio y el fósforo, que son importantes constituyentes de los huesos y los dientes. El sodio, el calcio y el potasio son esenciales para la contracción muscular y la conducción de impulsos nerviosos. El hierro es un componente fundamental en cada molécula de hemoglobina en la sangre, y el yodo está presente en hormonas producidas por la glándula tiroides. Además, son necesarias cantidades muy pequeñas de otros minerales, como zinc y magnesio (ambos indispensables para el funcionamiento de algunas enzimas), cobre (necesario para la síntesis de la hemoglobina) y cromo (que se utiliza en el metabolismo de los azúcares).

### Las vitaminas desempeñan diversos papeles en el metabolismo

“¡Toma tus vitaminas!” es la conocida cantaleta en muchos hogares con niños. Pero, ¿por qué debemos tomarlas? Las **vitaminas** son un grupo diverso de compuestos orgánicos que los animales requieren en pequeñas cantidades para el funcionamiento normal de las células y también para el crecimiento y el desarrollo. Muchas vitaminas se requieren para el adecuado funcionamiento de las enzimas que controlan las reacciones metabólicas en todo el cuerpo. En general, el cuerpo



**FIGURA 34-2** Síntomas de deficiencias de proteínas y vitaminas

**a)** La enfermedad de kwashiorkor es causada por una deficiencia de proteínas. Bajos niveles de la proteína albúmina en la sangre disminuyen la fuerza osmótica de la sangre y permiten que los líquidos se fuguen de los capilares sanguíneos hacia el área abdominal. Los músculos también se debilitan por la falta de proteína. **b)** La pelagra, caracterizada por lesiones y escamas en la piel de color rojizo oscuro y una lengua enrojecida e inflamada, es causada por una deficiencia de niacina. **c)** El raquitismo, que provoca deformaciones en los huesos, es resultado de una deficiencia de vitamina D.

**Tabla 34-2 Principales fuentes de minerales y sus funciones en el ser humano**

Mineral	Fuentes en la dieta	Principales funciones en el cuerpo	Síntomas de deficiencia
<b>Calcio</b>	Leche, queso, vegetales de hojas verdes, leguminosas	Formación de huesos y dientes Coagulación sanguínea Transmisión de impulsos nerviosos	Merma del crecimiento Raquitismo, osteoporosis Convulsiones
<b>Fósforo</b>	Leche, queso, carne, aves, cereales	Formación de huesos y dientes Equilibrio ácido-base	Debilidad Desmineralización ósea Pérdida de calcio
<b>Potasio</b>	Carne, leche, frutas	Equilibrio ácido-base Equilibrio del agua corporal Función nerviosa	Debilidad muscular Parálisis
<b>Cloro</b>	Sal de mesa	Formación de jugo gástrico Equilibrio ácido-base	Calambres musculares Apatía Pérdida de apetito
<b>Sodio</b>	Sal de mesa	Equilibrio ácido-base Equilibrio del agua corporal Función nerviosa	Calambres musculares Apatía Pérdida de apetito
<b>Magnesio</b>	Cereales integrales, vegetales de hojas verdes	Activación de enzimas en la síntesis de proteínas	Falta de crecimiento Alteraciones de la conducta Debilidad, espasmos
<b>Hierro</b>	Huevos, carne, leguminosas, cereales integrales, vegetales	Constituyente de hemoglobina y enzimas que participan en el metabolismo energético	Anemia por deficiencia de hierro (debilidad, menor resistencia a infecciones)
<b>Flúor</b>	Agua fluorada, té, mariscos y pescados	Mantenimiento de los dientes y probablemente de la estructura ósea	Alta incidencia de caries dentales
<b>Zinc</b>	Ampliamente distribuido en alimentos	Constituyente de enzimas que participan en la digestión	Falta de crecimiento Glándulas sexuales pequeñas
<b>Yodo</b>	Peces y moluscos marinos, lácteos, muchos vegetales, sal yodada	Constituyente de hormonas de la tiroides	Bocio
<b>Cromo</b>	Frutas, vegetales, cereales integrales	Metabolismo de azúcares y lípidos	Menor tolerancia a la glucosa Insulina elevada en la sangre

Tabla 34-3 Fuentes de vitaminas y sus funciones en el ser humano

Vitamina	Fuentes en la dieta	Funciones en el cuerpo	Síntomas de deficiencia
<b>Hidrosolubles</b>			
<b>Complejo B</b>			
<b>Vitamina B<sub>1</sub></b> (tiamina)	Leche, carne, pan	Coenzima en reacciones metabólicas	Beriberi (debilidad muscular, cambios en nervios periféricos, edema, insuficiencia cardíaca)
<b>Vitamina B<sub>2</sub></b> (riboflavina)	Ampliamente distribuida en alimentos	Constituyente de coenzimas en el metabolismo energético	Labios enrojecidos, grietas en las comisuras de la boca, lesiones oculares
<b>Niacina</b>	Hígado, carne magra, cereales, leguminosas	Constituyente de dos coenzimas del metabolismo energético	Pelagra (lesiones cutáneas y gastrointestinales; nerviosismo, trastornos mentales)
<b>Vitamina B<sub>6</sub></b> (piridoxina)	Carne, verduras, cereales integrales	Coenzima en el metabolismo de aminoácidos	Irritabilidad, convulsiones, tics musculares, dermatitis, cálculos renales
<b>Ácido pantoténico</b>	Leche, carne	Constituyente de la coenzima A, participa en el metabolismo energético	Fatiga, perturbaciones del sueño, merma de coordinación
<b>Ácido fólico</b>	Leguminosas, vegetales de hojas verdes, trigo integral	Coenzima del metabolismo de ácidos nucleicos y aminoácidos	Anemia, perturbaciones gastrointestinales, diarrea, retardo del crecimiento, defectos congénitos
<b>Vitamina B<sub>12</sub></b>	Carne, huevo, lácteos	Coenzima en el metabolismo de ácidos nucleicos	Anemia perniciosa, trastornos neurológicos
<b>Biotina</b>	Leguminosas, verduras, carne	Coenzimas requeridas para la síntesis de triglicéridos, metabolismo de aminoácidos y formación de glucógeno	Fatiga, depresión, náuseas, dermatitis, dolor muscular
<b>Colina</b>	Yema de huevo, hígado, cereales, leguminosas	Constituyente de fosfolípidos, precursor del neurotransmisor acetilcolina	No se han informado en el ser humano
<b>Vitamina C</b> (ácido ascórbico)	Cítricos, tomates pimientos y chiles verdes	Mantenimiento de cartílagos, huesos y dentina (tejido duro de los dientes); síntesis de colágeno	Escorbuto (degeneración de la piel, dientes encías, vasos sanguíneos; hemorragias epiteliales)
<b>Liposolubles</b>			
<b>Vitamina A</b> (retinol)	Beta caroteno en hortalizas de color verde, amarillo y rojo Retinol añadido a lácteos	Constituyente del pigmento visual Mantenimiento de tejidos epiteliales	Ceguera nocturna, ceguera permanente
<b>Vitamina D</b>	Aceite de hígado de bacalao, huevo, lácteos	Promueve el crecimiento y la mineralización de los huesos Aumenta la absorción de calcio	Raquitismo (deformaciones óseas) en niños; deterioro esquelético
<b>Vitamina E</b> (tocoferol)	Semillas, vegetales de hojas verdes, margarinas, manteca	Antioxidante, evita daños celulares provocados por los radicales libres	Posiblemente anemia
<b>Vitamina K</b>	Verduras de hojas verdes Producto de bacterias intestinales	Importante en la coagulación de la sangre	Sangrado, hemorragias internas

no puede sintetizar las vitaminas (o no puede hacerlo en suficiente cantidad), así que las debe obtener de la dieta. Nuestra dieta moderna es tan diferente de la dieta natural con la que evolucionamos que muchas personas sufren de deficiencias vitamínicas incluso si su alimentación es adecuada. Por ejemplo, nuestra piel puede fabricar algo de vitamina D cuando se le expone a la luz solar, pero casi todos nosotros pasamos tanto tiempo en interiores que no sintetizamos la suficiente y debemos obtenerla de la dieta o de complementos. Las vitaminas que se consideran esenciales en la nutrición humana se presentan en la [tabla 34-3](#).

Algunas vitaminas, como la C y E, son *antioxidantes* además de sus otras funciones. Cuando nuestras células generan y usan energía, se producen moléculas dañinas llamadas *radicales libres*, los cuales reaccionan con el DNA, con riesgo de dañarlo y, en algunos casos, provocan cáncer. Además, los radicales libres pueden promover la aterosclerosis y, a lo largo de la vida,

contribuir al deterioro fisiológico asociado al envejecimiento. En células que se cultivan en el laboratorio, los antioxidantes se combinan con radicales libres para limitar sus efectos dañinos, y estas vitaminas tienen efectos similares en el cuerpo.

### Vitaminas hidrosolubles

Las vitaminas que el ser humano necesita suelen agruparse en dos categorías: solubles en agua o hidrosolubles y solubles en lípidos o liposolubles. Entre las primeras están la vitamina C y los nueve compuestos que constituyen el complejo B. Estas sustancias se disuelven en el plasma sanguíneo y se excretan a través de los riñones, de manera que no se almacenan en el cuerpo en cantidades apreciables. Por esa razón, es indispensable reabastecer al cuerpo de estas vitaminas de manera constante. La mayoría de las vitaminas solubles en agua generalmente operan en colaboración con enzimas para promover reacciones químicas que suministran energía o sintetizan

moléculas biológicas. Puesto que cada vitamina participa en varios procesos metabólicos, la deficiencia de una sola vitamina puede tener efectos generalizados (véase la tabla 34-3). Por ejemplo, una deficiencia de la vitamina B llamada niacina provoca piel agrietada y escamosa característica de la pelagra (FIGURA 34-2b), así como trastornos del sistema nervioso. El ácido fólico, otro tipo de vitamina B, es indispensable para sintetizar timina, un componente del DNA; una deficiencia de ácido fólico dificulta la división celular en todo el cuerpo. Como resulta evidente, es particularmente importante que las mujeres embarazadas consuman suficiente ácido fólico para facilitar el rápido crecimiento del feto. Una deficiencia de ácido fólico también causa una reducción en los glóbulos rojos y la anemia consecuente. Para que el ácido fólico funcione adecuadamente, se requieren pequeñas cantidades de vitamina B<sub>12</sub>. En la dieta humana, la vitamina B<sub>12</sub> se puede obtener sólo a partir de las proteínas de origen animal, por lo que los vegetarianos estrictos requieren tomar complementos de esta vitamina.

### Vitaminas liposolubles

Las vitaminas solubles en lípidos A, D, E y K desempeñan papeles aún más variados (véase la tabla 34-3). La vitamina K, por ejemplo, ayuda a regular la coagulación de la sangre. Una deficiencia de vitamina A provoca ceguera nocturna porque se emplea en la producción de la molécula que capta la luz en la retina. La vitamina D es indispensable para la formación normal de los huesos; una deficiencia de esta vitamina puede provocar raquitismo (véase la FIGURA 34-2c). Investigadores estadounidenses descubrieron recientemente que muchas mujeres adultas, especialmente aquellas con piel oscura que no pueden sintetizar mucha vitamina D en presencia de luz solar, tienen niveles inadecuados de esta vitamina. Los hijos de madres que tienen una deficiencia de vitamina D están en alto riesgo de padecer raquitismo, cuya prevalencia se está incrementando en Estados Unidos. Las vitaminas liposolubles se pueden almacenar en la grasa corporal y podrían acumularse en el cuerpo con el tiempo. Por ello, algunas de estas vitaminas (como la A, por ejemplo) podrían ser tóxicas si se consumen en dosis excesivas.

### Dos terceras partes del cuerpo humano se componen de agua

ye aproximadamente el 10 por ciento de las necesidades promedio, mientras que el resto se obtiene de ingestión de líquidos. El agua en exceso se excreta a través de la orina.

### Ciertas pautas nutricionales ayudan a obtener una dieta equilibrada

Casi todos quienes viven en países desarrollados tienen la suerte de contar con abundante comida. Sin embargo, la abrumadora diversidad de alimentos que se venden en un supermercado típico en uno de esos países y la amplia disponibilidad de “comida rápida” contribuyen a la obesidad y a una nutrición deficiente. Para ayudar a la gente a tomar decisiones informadas, el gobierno de Estados Unidos ha establecido ciertas pautas nutricionales, bajo el nombre de “Mi pirámide”, que se pueden consultar en un sitio Web interactivo. El sitio Web, que presenta 12 conjuntos individualizados de recomendaciones nutricionales, es un buen punto de partida para la pirámide de la alimentación familiar. Consúltala bajo el nombre “mypyramid” en un motor de búsqueda de Internet.

Otra fuente de información es la etiqueta con información nutricional que ahora se exige en muchos países para los alimentos envasados comercialmente. Esta etiqueta ofrece información completa en cuanto a contenido de calorías, fibra, lípidos, azúcares y vitaminas (FIGURA 34-3). Algunas cadenas de expendios de comida rápida entregan volantes que detallan la información nutrimental de sus productos.

DATOS DE NUTRICIÓN			
Tamaño de porción	1 taza (55 g)		
Porciones por envase	8		
Cantidad por porción			
Calorías 210	Calorías de grasa 0		
Valor diario (porcentaje)			
Grasa total 0 g	0 %		
Grasa saturada 0 g	0 %		
Colesterol 0 mg	0 %		
Sodio 20 mg	1 %		
Carbohidratos totales 46 g	15 %		
Fibra alimenticia 6 g	24 %		
Azúcares 12 g			
Proteínas 6 g			
Vitamina A*	•	Vitamina C 2 %	
Calcio 4 %	•	Hierro 18 %	
Tiamina 38 %	•		
* Los valores diarios porcentuales se basan en una dieta de 2000 Calorías y podrían ser más altos o bajos dependiendo de sus necesidades calóricas.			
	Calorías	2000	2500
Grasa total	Menos de	65 g	80 g
Grasa saturada	Menos de	20 g	25 g
Colesterol	Menos de	300 mg	300 mg
Sodio	Menos de	2400 mg	2400 mg
Carbohidratos totales		300 g	375 g
Fibra alimenticia		25 g	30 g
Calorías por gramo:			
Grasa 9 • Carbohidrato 4 • Proteína 4			

FIGURA 34-3 Etiqueta completa de alimentos

## 34.2 ¿CÓMO SE EFECTÚA LA DIGESTIÓN?

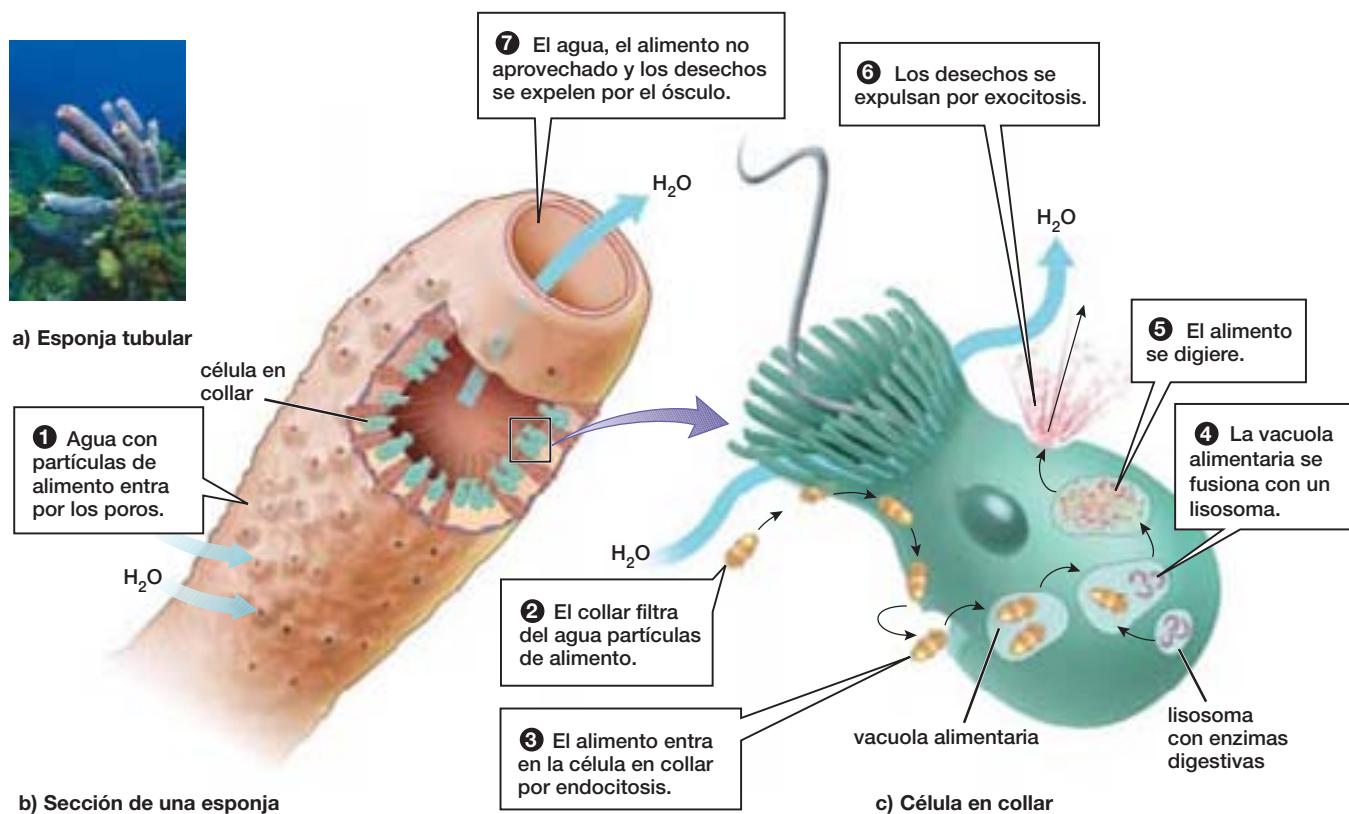
### Generalidades de la digestión

Después de una comida, es común oír que el estómago hace ruido. La causa es una de las diversas fases de la digestión. **Digestión** es el proceso de trituración física seguida del desdoblamiento químico de los alimentos. El **sistema digestivo** de los animales acepta y luego digiere las complejas moléculas de sus alimentos para convertirlas en moléculas más sencillas susceptibles de absorberse. El material que no puede aprovecharse o desdoblarse se expulsa del cuerpo.

Los animales comen los cuerpos de otros organismos, los cuales a menudo oponen resistencia a convertirse en alimento. Las plantas, por ejemplo, protegen sus células individuales con una pared de celulosa no digerible. Los cuerpos de los animales pueden estar cubiertos por pelo, escamas o plumas que tampoco pueden digerirse. Además, los complejos lípidos, carbohidratos y proteínas de los alimentos no se encuentran en una forma que se pueda utilizar directamente. Los nutrientes deben desdoblarse para que puedan absorberse y distribuirse a las células del animal que los consumió, donde se recombinan en formas singulares. Los diferentes tipos de animales enfrentan el reto de adquirir nutrientes con diferentes tipos de tractos digestivos, cada uno perfectamente adaptado a una dieta y estilo de vida característicos. No obstante, dentro de esta diversidad hay ciertas tareas que todos los sistemas digestivos deben realizar:

1. **Ingestión.** La comida se debe introducir en el tracto digestivo a través de una abertura, generalmente llamada **boca**.
2. **Desdoblamiento mecánico.** La comida se debe dividir físicamente en fragmentos más pequeños. Esto se logra con mollejas o dientes, además de la acción de batido del tracto digestivo. Las partículas producidas por el desdoblamiento mecánico presentan una mayor área superficial para el ataque eficaz de las enzimas digestivas.
3. **Desdoblamiento químico.** Las partículas de alimento deben exponerse a enzimas digestivas y otros líquidos digestivos que desdoblán las moléculas grandes en subunidades más pequeñas.
4. **Absorción.** Las moléculas pequeñas deben ser transportadas fuera de la cavidad digestiva e introducirse en las células.
5. **Eliminación.** Los materiales no digeribles se deben expulsar del cuerpo.

En los siguientes apartados exploraremos algunos de los mecanismos de los sistemas digestivos de los animales para realizar estas funciones. Desde una perspectiva simplificada, los animales son máquinas que convierten el alimento en más animales, en tanto que éste les permite renovar sus cuerpos y reproducirse. La selección natural ha producido comportamientos y adaptaciones digestivas que permiten a los animales adquirir los nutrientes de la variedad de ambientes en los que habitan y sacar provecho de casi toda fuente posible de alimento.



**FIGURA 34-4** Digestión intracelular en una esponja

Esponjas fotografiadas en el mar de las islas Vírgenes. **b)** Anatomía de una esponja simple; se muestra la dirección de flujo del agua y la ubicación de las células en collar. **c)** Ampliación de una sola célula en collar que muestra la digestión de organismos unicelulares, los cuales se filtran del agua, quedan atrapados en el exterior del collar, son engullidos y luego se digieren.

## En las esponjas la digestión se efectúa dentro de células individuales

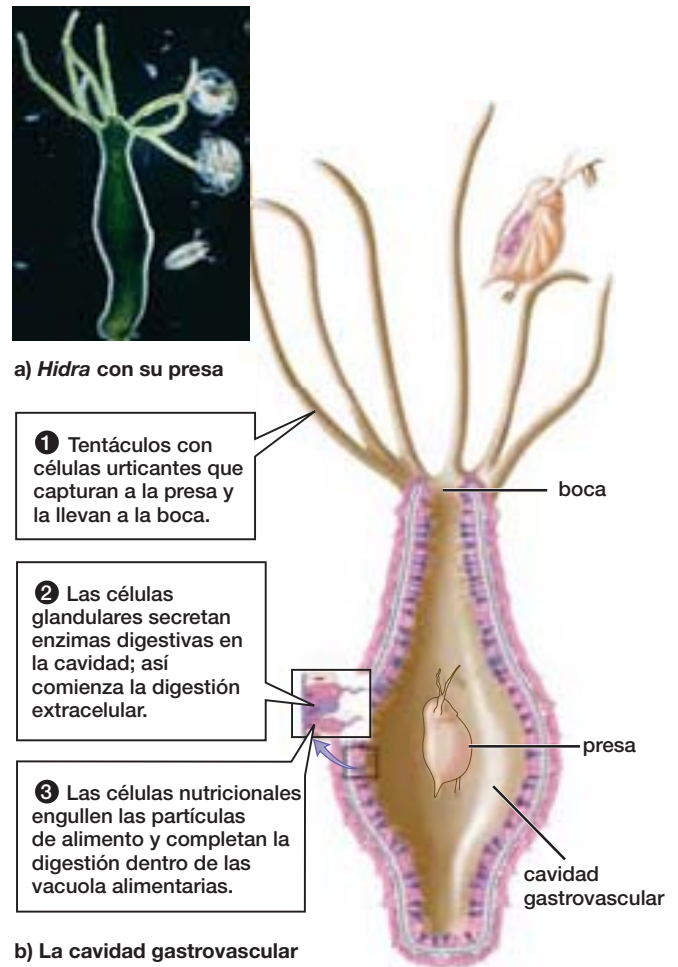
Las esponjas son los únicos animales que dependen exclusivamente de sus células individuales para digerir el alimento mediante la **digestión intracelular**. Como cabe esperar, esto limita su alimento a organismos microscópicos o partículas. Las esponjas se adhieren de forma permanente a las rocas, haciendo circular el agua del mar a través de los poros en sus cuerpos. Como se observa en la **FIGURA 34-4**, células en collar especializadas o *coanocitos* dentro de la esponja filtran organismos microscópicos del agua y los ingieren mediante el proceso de fagocitosis (término que significa “comer células”; véase el capítulo 5). Una vez ingerido por la célula, el alimento se introduce en una **vacuola alimentaria**, un espacio rodeado por una membrana que actúa como estómago temporal. La vacuola se fusiona con pequeñas vesículas que contienen enzimas digestivas llamadas **lisosomas** y el alimento se desdobra dentro de la vacuola para producir moléculas más pequeñas que el citoplasma celular puede absorber. Los residuos no digeridos permanecen en la vacuola, que finalmente expulsa su contenido al mar mediante el proceso de exocitosis.

## Una bolsa con una abertura es el sistema digestivo más simple

Los organismos más grandes y complejos desarrollaron una cámara dentro del cuerpo donde trozos de comida se desdoblaron por la acción de enzimas que actúan fuera de las células. Este proceso se llama **digestión extracelular**. Una de las más sencillas de esas cámaras se encuentra en los celentéreos (cnidarios) como las anémonas de mar, las hidras y las medusas. Estos animales poseen una bolsa digestiva llamada **cavidad gastrovascular**, con una sola abertura por la que se ingieren los alimentos y se expulsan los desechos (**FIGURA 34-5**). Los tentáculos urticantes del animal atrapan alimento (como una “pulga acuática”, que es un crustáceo) y lo llevan a través de la boca a la cavidad gastrovascular. Las células glandulares que revisten la cavidad secretan enzimas que inician la digestión de la presa. Las células nutricionales que revisten esa misma cavidad absorben los nutrientes y rodean partículas pequeñas de alimento mediante fagocitosis. La digestión ulterior es intracelular, dentro de las vacuolas alimentarias en las células nutricionales. Los residuos no digeridos se expulsan finalmente por la boca, de manera que sólo es posible procesar un alimento a la vez.

## La digestión en un tubo permite a los animales alimentarse con mayor frecuencia

Un sistema digestivo con forma de bolsa es inadecuado para animales activos que deben alimentarse con frecuencia, o para aquellos cuyo alimento ofrece tan poca nutrición que deben alimentarse continuamente. Las necesidades de estos animales se satisfacen con un sistema digestivo consistente en un tubo de una sola vía dividido en una serie de compartimientos y con una abertura en cada extremo. Un sistema digestivo tubular permite al animal comer con frecuencia, porque los desechos no interfieren con la ingesta de alimento. La mayoría de los animales, incluidos todos los vertebrados e invertebrados como las lombrices de tierra, los moluscos, artrópodos y equinodermos tienen sistemas digestivos que, en esencia, son tubos que comienzan en la boca y terminan en el ano. Además, ese sistema consta de una serie de regiones es-



**FIGURA 34-5** Digestión en una bolsa

a) Una hidra acaba de capturar e ingerir un diminuto crustáceo.  
b) Después del proceso descrito, los desechos (el material no digerido) se expulsan a través de la boca.

pecializadas que procesan los alimentos en cierto orden: primero los trituran físicamente, luego los desdoblan mediante la acción de enzimas utilizando la digestión extracelular, y después absorben los nutrientes para introducirlos en el cuerpo.

## Especializaciones digestivas

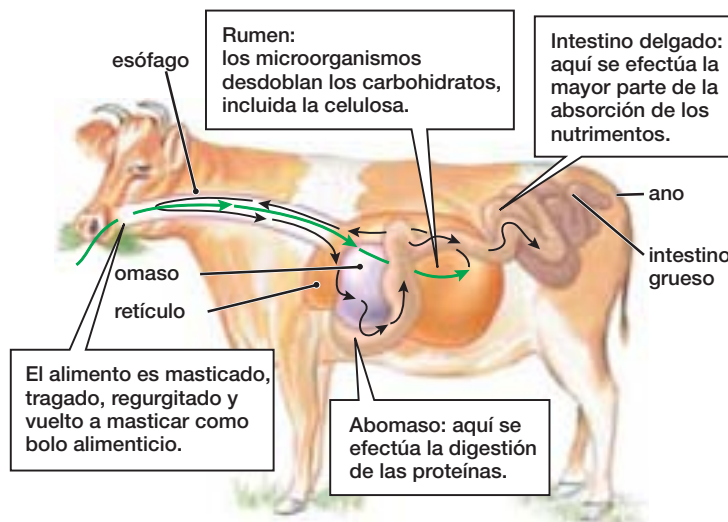
Los sistemas digestivos tubulares permiten a diferentes tipos de animales comer una amplia variedad de alimentos y extraer de ellos la máxima cantidad de nutrientes. Los **carnívoros**, como lobos, gatos, focas y aves depredadoras, se alimentan de otros animales. Los **herbívoros** se alimentan sólo de plantas; entre ellos se incluyen las aves que se alimentan de semillas, animales que pastan como los ciervos, camellos y vacas, y muchos roedores como los ratones. Los seres humanos, al igual que los osos y los mapaches, son **omnívoros** porque están adaptados para digerir alimentos tanto de origen animal como vegetal.

### Ciertas adaptaciones permiten a los rumiantes digerir la celulosa

La celulosa que rodea cada planta es potencialmente una de las fuentes de energía alimentaria más abundantes del planeta; no obstante, si los seres humanos tuviéramos una dieta res-

**FIGURA 34-6 El sistema digestivo de los rumiantes**

Las flechas indican la trayectoria del alimento en el tracto digestivo. **PREGUNTA:** Además de la capacidad para digerir celulosa, ¿qué otros beneficios nutricionales obtienen los rumiantes al tener microorganismos en sus intestinos?



tringida de pasto, como las vacas, pronto moriríamos de hambre. La celulosa, al igual que el almidón, consiste en largas cadenas de moléculas de glucosa, pero estas moléculas están unidas de forma que resisten el ataque de las enzimas digestivas animales. Los animales **rumiantes** —vacas, ovejas, cabras, camellos e hipopótamos, entre muchos otros— han desarrollado complejos sistemas digestivos que albergan microorganismos capaces de desdoblar la celulosa. La *rumia* es el proceso de regurgitación de los alimentos para volver a masticarlos y es una de diversas adaptaciones que permiten a estos animales digerir el duro material de las plantas. El estómago de los rumiantes consta de varias cámaras (**FIGURA 34-6**). La primera es el *rumen*, una gran tina de fermentación; el rumen de una vaca puede contener casi 40 galones (unos 150 litros). Esta cámara alberga muchas especies de bacterias y otros tipos de microorganismos. Además de digerir los azúcares y almidones de las plantas, estos microorganismos producen **celulasa**, una enzima que desdobla la celulosa en los azúcares que la componen. Después de procesarse en el rumen, el material vegetal entra en el *retículo* y adopta la forma de masa llamada *bolo alimenticio*. Este último es regurgitado, masticado y tragado para pasar de nuevo al rumen. La masticación adicional expone mayor cantidad de celulosa y el contenido celular a los microorganismos del rumen, los cuales lo digieren aún más. Gradualmente, el material vegetal digerido de forma parcial y los microorganismos son liberados hacia las cámaras restantes, pasa a través del estrecho *omaso* y luego al *abomaso* de mayores dimensiones, donde se efectúa la digestión de las proteínas. Aquí la vaca digiere no sólo las proteínas de la planta, sino también los microorganismos de su rumen. Luego, la vaca absorbe la mayor parte de los productos de la digestión a través de las paredes de su intestino delgado.

**La longitud del intestino delgado está correlacionada con la dieta**

nas son relativamente más fáciles de digerir y la digestión de las proteínas comienza en el estómago. El desarrollo de la rana constituye un ejemplo sorprendente de ello. El joven renacuajo es un herbívoro que se alimenta de algas y tiene un intestino largo. Cuando sufre la metamorfosis para convertirse en una rana adulta carnívora (que se alimenta de insectos), el intestino se acorta a un tercio de su longitud anterior.

#### Los dientes se adaptan a diferentes dietas

Los dientes se adaptan a la dieta. La dieta omnívora de los seres humanos ha seleccionado los incisivos delgados para morder, los colmillos o caninos para desgarrar, los premolares para triturar y los molares para moler y masticar (**FIGURA 34-7a**). Si tienes un perro, observa con atención su boca. Los carnívoros tienen pequeños incisivos, pero colmillos grandes para cortar y desgarrar la carne. Tienen un conjunto reducido de molares y premolares con orillas filosas especializadas para cortar los tendones y los huesos (**FIGURA 34-7b**). Los herbívoros como los caballos tienen caninos reducidos, y sus incisivos están adaptados para cortar hojas. También tienen premolares y molares anchos y planos capaces de triturar plantas duras que contienen celulosa (**FIGURA 34-7c**). Muchos herbívoros tienen dientes que crecen continuamente a lo largo de sus vidas para compensar el desgaste.

#### Las aves tienen mollejas para triturar el alimento

Las aves carecen de dientes y degluten su alimento entero, el cual pasa a través del esófago musculoso y tubular. En las aves que se alimentan de semillas, el alimento se almacena y se suaviza por la acción del agua en el buche expansible. Luego, el alimento pasa gradualmente al estómago dividido en dos partes (**FIGURA 34-8**). La primera secreta enzimas que digieren proteínas, mientras que la segunda está modificada en una *molleja*



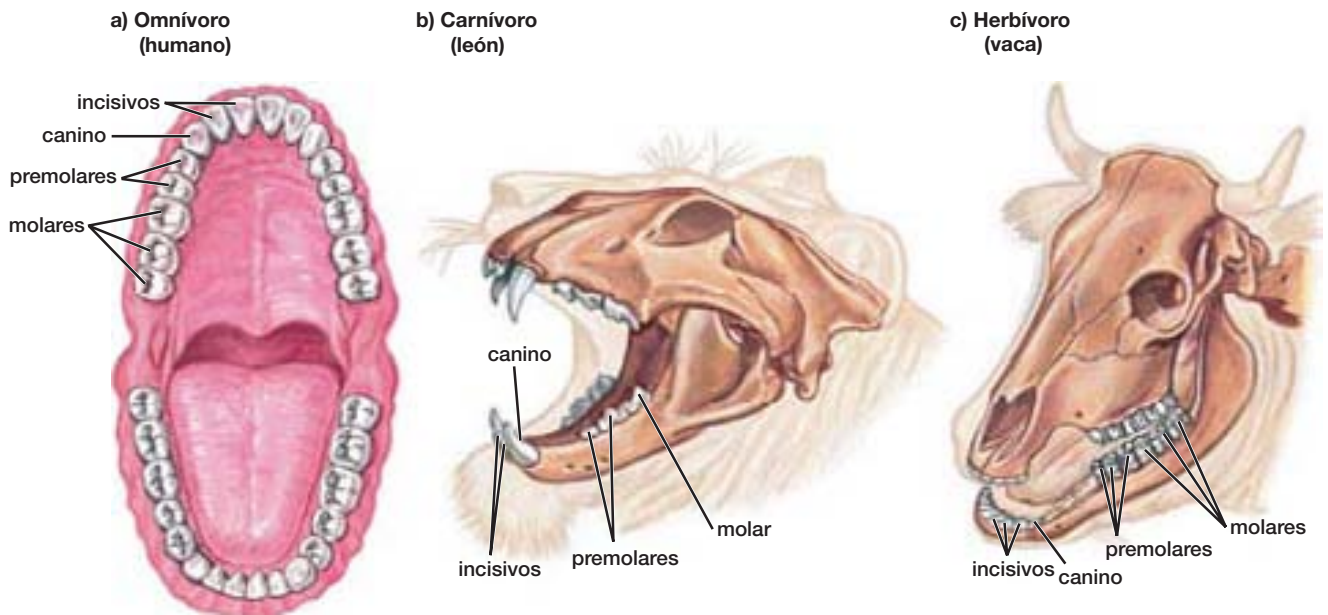


FIGURA 34-7 Los dientes evolucionaron para adaptarse a diferentes dietas

ción ocurre ahí. Los nutrimentos son absorbidos en el intestino delgado. El intestino grueso es extremadamente delgado y desemboca en la *cloaca*, una cámara para propósitos múltiples que sirve a los sistemas urinario, reproductor y digestivo.

### 34.3 ¿CÓMO DIGIEREN LOS ALIMENTOS LOS SERES HUMANOS?

El aparato digestivo humano (FIGURA 34-9), que está adaptado para procesar una amplia variedad de alimentos en nuestra dieta omnívora, es un buen ejemplo del sistema digestivo de los mamíferos. El alimento viaja por un tubo continuo desde la boca al ano; a lo largo de esta tortuosa ruta, se le somete a una serie muy bien orquestada de operaciones digestivas. Para cuando llega al final del camino, el alimento ha sido picado, molido, mezclado, revuelto y bañado por una serie de potentes sustancias químicas. Casi todo el valor nutricional se ha extraído y absorbido, en tanto que el residuo se expulsa. Este desdoblamiento por pasos de los alimentos requiere acciones coordinadas por parte del conjunto integrado de estructuras que constituyen el aparato digestivo.

#### El desdoblamiento mecánico y químico de los alimentos se inicia en la boca

Tomamos un bocado, la boca se humedece y comenzamos a masticar. Esto inicia el desdoblamiento tanto mecánico como químico del alimento. En el ser humano y otros mamíferos, los dientes realizan casi todo el trabajo mecánico. Los *incisivos*, al frente de la boca, cortan trozos de alimento; los puntiagudos *caninos* que los flanquean sirven para desgarrar los trozos; los *premolares* y *molares* en la parte posterior de la cavidad bucal tienen superficies planas para triturar el alimento y convertirlo en una pasta (véase la figura 34-7). En el ser humano adulto, 32 dientes de diversas formas y tamaños cortan y trituran el alimento para desbaratarlo.

Mientras los dientes pulverizan el alimento, se efectúa la primera fase de la digestión química cuando tres pares de

glándulas salivales secretan saliva en respuesta al olor, la sensación y el sabor de los alimentos; si tenemos hambre, se produce saliva incluso por el solo hecho de pensar en comida. Juntas, nuestras glándulas salivales producen entre 1.0 y 1.5 litros de saliva diariamente. La saliva contiene la enzima digestiva *amilasa*, que inicia el desdoblamiento de almidones en compuestos más simples como los disacáridos (tabla 34-4), aunque también tiene otras funciones: contiene anticuerpos que protegen contra infecciones y una enzima que mata bacterias. La saliva también lubrica el alimento para facilitar la deglución y disuelve algunas moléculas alimenticias, como ácidos y azúcares, llevándolas a las *papilas gustativas* de la

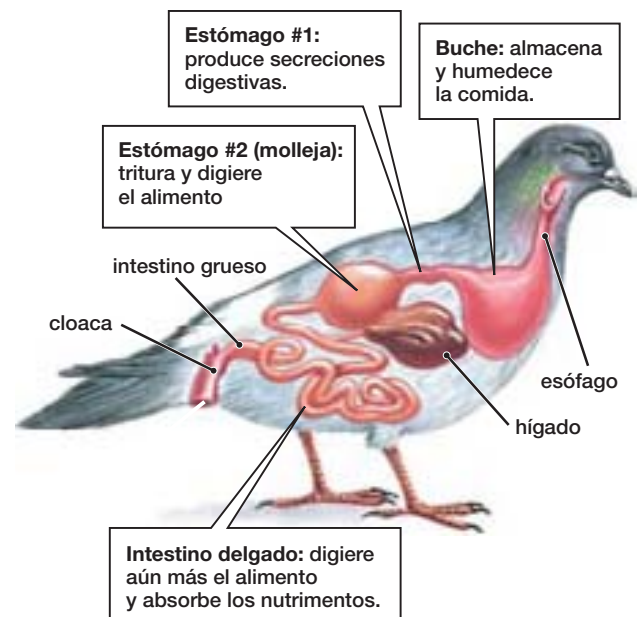
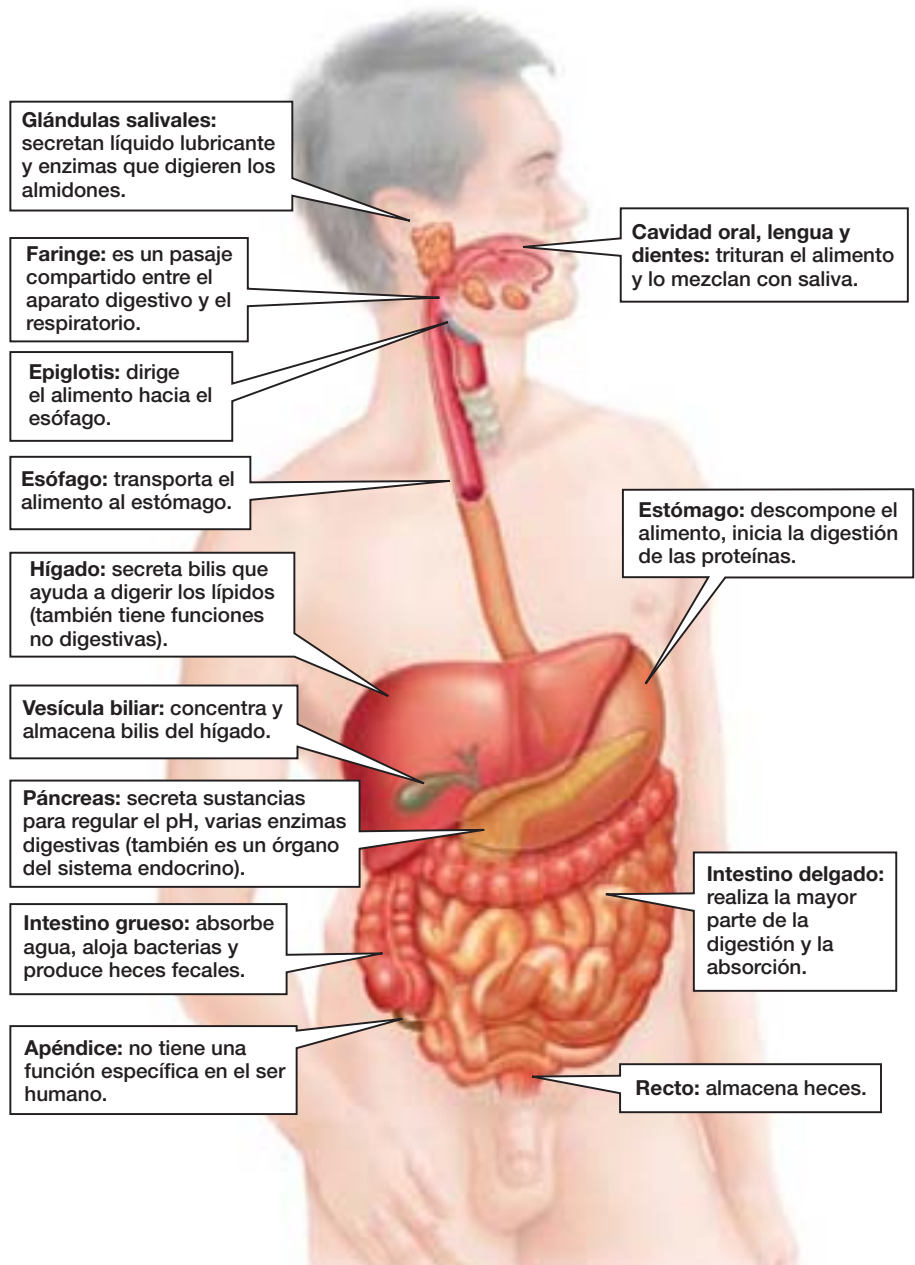


FIGURA 34-8 Adaptaciones digestivas en un ave

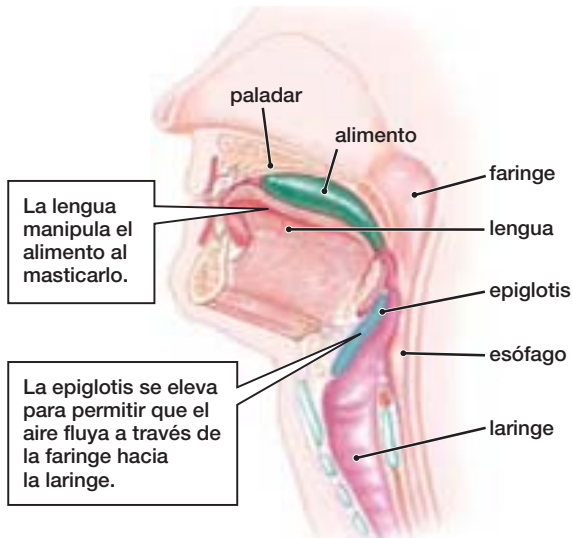
PREGUNTA: ¿Cómo pueden triturar las aves su alimento si carecen de dientes?

**FIGURA 34-9** El tracto digestivo humano



**Tabla 34-4** Secreciones digestivas y sus fuentes

Sitio de digestión	Secreción	Origen de la secreción	Papel en la digestión
Boca	Amilasa	Glándulas salivales	Desdobla el almidón en disacáridos
	Moco, agua	Glándulas salivales	Lubrica y disuelve los alimentos
Estómago	Ácido clorhídrico	Células que revisten el estómago	Permite que actúe la pepsina, mata bacterias, ayuda en la absorción de minerales
	Pepsina	Células que revisten el estómago	Desdobla proteínas en péptidos grandes
	Moco	Células que revisten el estómago	Protege al estómago de digerirse a sí mismo
Intestino delgado	Bicarbonato de sodio	Páncreas	Neutraliza el quimo ácido del estómago
	Amilasa pancreática	Páncreas	Desdobla el almidón en disacáridos
	Proteasas como la tripsina, quimiotripsina y carboxipeptidasa	Páncreas	Desdobla proteínas en dipéptidos
	Lipasa	Páncreas	Desdobla lípidos en ácidos grasos y glicerol
	Bilis	Hígado	Emulsifica lípidos
	Peptidasas	Intestino delgado	Divide péptidos pequeños en aminoácidos
	Disacaridasas	Intestino delgado	Divide disacáridos en monosacáridos
	Moco	Intestino delgado	Protege el intestino de secreciones digestivas



a) Antes de la deglución



b) Durante la deglución

**FIGURA 34-10 El reto de la deglución**

a) La deglución es un proceso complicado por el hecho de que tanto el esófago (parte del aparato digestivo) como la laringe (que pertenece al aparato respiratorio) se comunican con la faringe. b) Durante la deglución, la laringe se desplaza hacia arriba, quedando por debajo de una pequeña tapa cartilaginosa, la epiglotis. Ésta se dobla hacia abajo sobre la laringe, sella la abertura al aparato respiratorio y dirige el alimento hacia el esófago.

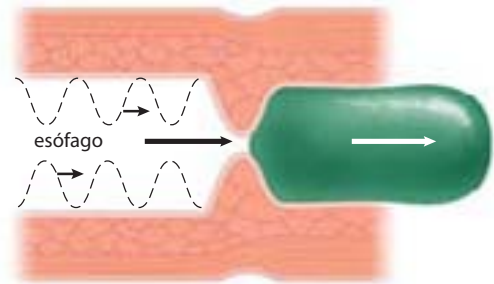
lengua. Éstas son receptores sensoriales que ayudan a identificar el tipo y la calidad del alimento.

Con la ayuda de los músculos de la lengua, se forma un bolo con el alimento, el cual se empuja hacia atrás a la **faringe**, una cavidad muscular que conecta la boca con el esófago (**FIGURA 34-10a**

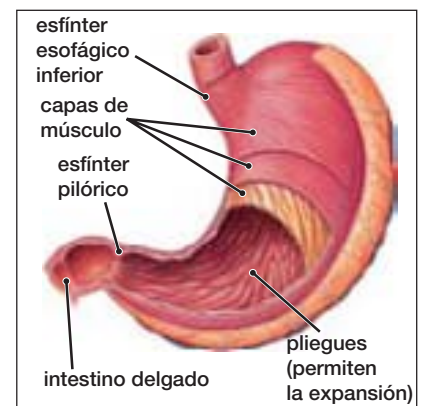
greso de alimento en la faringe) eleva la laringe de modo que se pegue a la **epiglotis**, una tapa de tejido que bloquea los conductos respiratorios dirigiendo el alimento hacia el esófago (**FIGURA 34-10b**).

**El esófago conduce los alimentos al estómago**

La deglución arrastra el alimento al esófago, un tubo muscular que impele la masa alimenticia hacia el estómago. El moco que secretan las células que revisten el esófago ayuda a protegerlo de la abrasión y también lubrica el alimento durante su paso por él. Los músculos que rodean al esófago producen una serie de contracciones que se inician justo arriba de la masa deglutida y progresan hacia el esófago, forzando al alimento hacia el estómago. Esta acción muscular, llamada **peristaltismo**, también se efectúa a lo largo de todo el tracto digestivo (**FIGURA 34-11**) ayudando a que el alimento avance por el esófago, el estómago, los intestinos y finalmente hacia fuera por el ano. El peristaltismo es tan eficaz que una persona puede deglutir alimento aunque esté de cabeza.

**FIGURA 34-11 Peristaltismo**

El **estómago** humano es una bolsa muscular expansible. Su capacidad en estado confortable es aproximadamente de un litro en un adulto, pero esto varía en función del tamaño del cuerpo. El alimento se retiene en el estómago mediante dos anillos de músculo circular (**esfínteres**). El esfínter en la unión entre el esófago y el estómago, llamado **esfínter esofágico inferior** (**FIGURA 34-12**), evita que el alimento y las secreciones estomacales ácidas suban hacia el esófago mientras el estómago se agita. Si el esfínter esofágico inferior se debilita, se produce **reflujo ácido** porque los ácidos del estómago entran al esófago y atacan su revestimiento sin protección. Un segundo esfínter, el **esfínter pilórico**, separa la porción inferior del estómago de la parte superior del intestino delgado. Este músculo regula el paso del alimento al intestino delgado, como explicaremos más adelante.



El estómago tiene tres funciones principales. La primera es almacenar el alimento y dejarlo pasar gradualmente al intestino delgado, a un ritmo apropiado para una digestión y absorción correctas. Los pliegues de la pared del estómago (véase la figura 34-12) aumentan su capacidad y permiten ingerir comidas abundantes y espaciadas. Los carnívoros llevan esta facultad hasta el extremo. Un león, por ejemplo, puede consumir unos 18 kilogramos de carne en una sola comida y dedicar los días siguientes a digerirla con calma. Una segunda función del estómago es contribuir al desdoblamiento mecánico del alimento; sus paredes musculares producen movimientos de contracción y batido, ayudando así a separar los trozos grandes de alimento.

La tercera función del estómago es el desdoblamiento químico del alimento. El revestimiento del estómago contiene grupos de células llamadas *glándulas gástricas* que incluyen varios tipos de células. Las glándulas gástricas secretan pepsinógeno, ácido clorhídrico (HCl) y moco. En el estómago se inicia la digestión de las proteínas. El *pepsinógeno* es una forma inactiva de la enzima *pepsina*. La pepsina es una **proteasa**, esto es, una enzima que desdobla las proteínas en cadenas más cortas de aminoácidos llamadas *péptidos* (véase la tabla 34-4). La pepsina se secreta en la forma de pepsinógeno para evitar que digiera las células mismas que la producen. El ácido clorhídrico, que confiere al jugo gástrico un pH de 1 a 3, convierte el pepsinógeno en pepsina, la cual funciona de manera óptima en un ambiente ácido. El ácido estomacal también promueve la absorción del calcio y el hierro; además, mata muchas bacterias presentes en los alimentos.

Como podemos ver, el estómago produce todos los ingredientes necesarios para digerirse a sí mismo. De hecho, esto es lo que sucede cuando una persona padece úlceras (véase “Guardián de la salud: Las úlceras digieren el tracto digestivo”). Sin embargo, las células que revisten el estómago normalmente producen una gran cantidad de moco espeso que cubre el revestimiento de este órgano y actúa como barrera contra la autodigestión. Esta protección no es perfecta; las células que recubren la parte interna del estómago sufren cierto grado de digestión y deben remplazarse luego de unos cuantos días.

En el estómago, los alimentos se convierten gradualmente en un líquido espeso y ácido llamado **quimo**, que consiste en alimento parcialmente digerido y secreciones digestivas. Luego, ondas peristálticas (unas tres por minuto) empujan al quimo hacia el intestino delgado. El esfínter pilórico sólo permite que pase una pequeña cantidad de quimo (aproximadamente, lo equivalente a una cucharadita) con cada contracción. Dependiendo de la cantidad de comida y del tipo de alimento ingerido, se necesitan entre dos y seis horas para vaciar totalmente el estómago después de una comida de alimentos sólidos. Los movimientos continuos de batido que realiza el estómago vacío se sienten como “retortijones de hambre”.

Sólo unas cuantas sustancias, entre ellas algunos fármacos y el alcohol, pueden ingresar en el torrente sanguíneo a través de la pared estomacal. Dado que la presencia de alimentos en el estómago hace más lenta la absorción del alcohol, la recomendación de “no beber con el estómago vacío” se basa en principios fisiológicos sólidos.

### Casi toda la digestión se efectúa en el intestino delgado

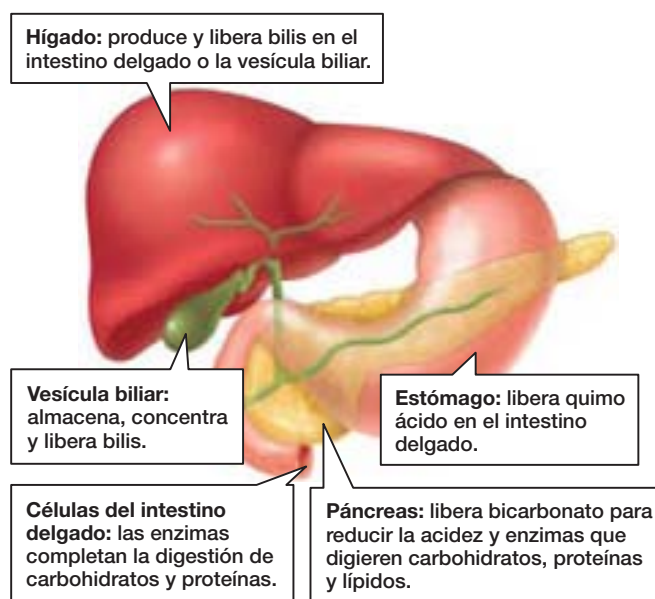
#### El intestino delgado

del tracto digestivo, pues mide unos 3 metros de longitud (los reportes de intestinos delgados de seis metros de longitud se basan en medidas de cadáveres en los que todos los músculos han perdido el tono). Las funciones del intestino delgado son digerir alimento para convertirlo en pequeñas moléculas y absorber éstas para transferirlas al torrente sanguíneo. La digestión dentro del intestino delgado se efectúa con la ayuda de secreciones digestivas de tres fuentes: el hígado, el páncreas y las células del intestino delgado mismo (**FIGURA 34-13**). El intestino delgado completa la digestión de carbohidratos que se inició en la boca y la digestión de proteínas que comenzó en el estómago. Además, toda la digestión de los lípidos se realiza en el intestino delgado.

#### **El hígado y la vesícula biliar aportan bilis, que es importante para desdoblar los lípidos**

El **hígado** es quizá el órgano más versátil del cuerpo. Entre sus muchas funciones están el almacenamiento de lípidos y carbohidratos para obtener energía, la síntesis de proteínas de la sangre, el almacenamiento de hierro y determinadas vitaminas, la conversión del amoníaco tóxico (liberado por el desdoblamiento de aminoácidos) en **urea** y la desintoxicación de otras sustancias dañinas como la nicotina y el alcohol. El papel del hígado en la digestión es la producción de **bilis**, un líquido que se almacena y se concentra en la **vesícula biliar** y se libera al intestino delgado a través de un tubo llamado **conducto biliar** (véase las figuras 34-9 y 34-13).

La **bilis** es una mezcla compleja formada por **sales biliares**, agua, otras sales y colesterol. Las sales biliares se sintetizan en el hígado a partir de colesterol y aminoácidos. Aunque ayudan a desdoblar los lípidos, las sales biliares no son enzimas. Tienen un extremo hidrofílico que es atraído por el agua, y un extremo hidrofóbico que interactúa con los lípidos. Como resultado, las sales biliares dispersan los lípidos en partículas microscópicas en el quimo acuoso, al igual que un detergente remueve la grasa de una sartén. Las partículas de lípidos son atacadas fácilmente por las **lipasas**, enzimas que el páncreas produce para la digestión de lípidos.



## GUARDIÁN DE LA SALUD

### Las úlceras digieren el tracto digestivo

Las úlceras se presentan cuando áreas localizadas de las capas de tejido que revisten el estómago o la parte superior del intestino delgado se deterioran. Las víctimas de úlcera experimentan ardor en el área del estómago, así como vómitos y náuseas; en casos graves, aparece sangre en las heces por el sangrado que se produce al destruirse el tejido (FIGURA E34-2). Anteriormente los médicos creían que las úlceras eran provocadas por la sobreproducción de ácido (que se pensaba estaba relacionada con el estrés), y trataban a sus pacientes con antiácidos y programas de reducción del estrés. Sin embargo, ahora los Centros para el Control de Enfermedades reportan que la bacteria *Helicobacter pylori* causa entre el 80 y 90 por ciento de todas las úlceras y que los antibióticos adecuados (administrados en conjunción con medicamentos que reducen la acidez) pueden curar la mayoría de las úlceras. ¿Qué provocó este cambio en nuestra comprensión de las úlceras? En 1983 J. R. Warren, un patólogo australiano, observó que muestras de tejido estomacal inflamado estaban infectadas de manera consistente con una bacteria en forma de espiral. Warren trabajaba con Barry Marshall, un médico internista, con el objetivo de aislar y cultivar la bacteria, que tiempo después se llamaría *Helicobacter pylori*. Los investigadores sugirieron que la *H. pylori* causaba inflamación que con el tiempo se convertiría en úlcera; pero la comunidad médica se mostraba escéptica. ¿Cómo era posible que las bacterias pudieran sobrevivir y, más aún, prosperar en el ambiente ácido y capaz de digerir proteínas que prevalece en el estómago? Para probar su hipótesis, Marshall y otro voluntario ingirieron un lote de bacterias y tiempo después presentaron muestras de sus propios tejidos estomacales infectados con *H. pylori*. Posteriores investigaciones y estudios epidemiológicos apoyaron la hipótesis de Warren y Marshall; finalmente, estos investigadores recibieron el Premio Nobel de Fisiología o Medicina en 2005.

Ahora los científicos saben que la *Helicobacter pylori* coloniza la capa protectora de moco que recubre la pared estomacal, así como las paredes de la porción superior del intestino delgado. En el proceso, estas bacterias debilitan la capa de mucosidad e

incrementan la producción de ácido por parte del estómago, haciendo que el recubrimiento de este último y de la parte superior del intestino se vuelva más susceptible al ataque de los ácidos y las enzimas que digieren las proteínas. La respuesta inmunitaria del cuerpo a la infección también contribuye a la destrucción de tejido. Es interesante hacer notar que, aunque aproximadamente la mitad de la población mundial alberga la *H. pylori*, la mayoría de las personas no padecen úlceras ni presentan síntomas obvios de infección.

Algunas úlceras son provocadas por otros factores, incluido el uso prolongado de analgésicos, como la aspirina o el ibuprofen, que interfieren con los mecanismos que protegen el estómago y las células intestinales de los ácidos y las enzimas digestivas. Otros factores que podrían agravar las úlceras y retardar su curación incluyen el tabaquismo, así como el consumo de cafeína y alcohol.



**FIGURA E34-2 Una úlcera**

Esta fotografía de una úlcera se tomó por medio de un dispositivo de observación a base de fibras ópticas, llamado endoscopio.

### **El páncreas suministra varias secreciones digestivas al intestino delgado**

El **páncreas** está en la curva entre el estómago y el intestino delgado (véase la figura 34-10) y consta de dos tipos principales de células. Un tipo produce hormonas que intervienen en la regulación del azúcar en la sangre (como veremos más adelante, en el capítulo 37); el otro produce una secreción digestiva llamada **juugo pancreático**

Las enzimas digestivas pancreáticas desdoblan tres tipos principales de nutrimentos (véase la tabla 34-4): la amilasa desdobla carbohidratos, las lipasas digieren lípidos y varias proteasas desdoblan proteínas y péptidos.

### **Las células de la pared intestinal completan el proceso digestivo**

La pared del intestino delgado está tapizada de células especializadas que completan el proceso digestivo y absorben las pequeñas moléculas que resultan. Estas células tienen diversas enzimas en su membrana externa, la cual constituye el revestimiento interior del intestino delgado. Entre esas enzimas se encuentran las *peptidasas*, que terminan de desdoblar los péptidos para convertirlos en aminoácidos, y *disacaridasas*, que desdoblan los disacáridos para obtener monosacáridos (véase el capítulo 3). Por ejemplo, la disacaridasa conocida como *lactasa*

que revisten el intestino delgado, esta fase final de la digestión tiene lugar *durante* la absorción de los nutrientes por las células epiteliales. Al igual que en el estómago, grandes cantidades de secreciones mucosas de células especializadas en el revestimiento del intestino delgado protegen a este último contra la autodigestión.

Tal vez conozcas a alguien que tiene y quien seguramente experimenta inflamación, espasmos y diarrea después de consumir leche. De hecho, muchos mamíferos —incluida la mayor parte de la población humana— producen grandes cantidades de lactasa durante la infancia, cuando la leche es el alimento primordial, pero producen una escasa cantidad de esta enzima cuando son adultos. Consideremos que, una vez transcurrida la infancia, la leche deja de estar disponible para los mamíferos; los seres humanos sólo comenzaron a tener acceso de nuevo a la leche luego de que domesticaron otros mamíferos. Los descendientes de europeos nórdicos y occidentales, en su mayoría y de manera inusual, continúan secretando lactasa durante la adultez.

### Casi toda la absorción se efectúa en el intestino delgado

#### El recubrimiento del intestino ofrece una enorme área superficial para la absorción

El intestino delgado no sólo es el principal lugar donde se efectúa la digestión química, también es el principal sitio de **absorción** de nutrientes a la sangre. El intestino delgado tiene numerosos pliegues y proyecciones, gracias a los cuales posee una área superficial interna unas 600 veces mayor que la de un tubo liso de la misma longitud (**FIGURA 34-14a**). Diminutas proyecciones cilíndricas llamadas **vellosidades** cubren toda la superficie plegada de la pared intestinal (**FIGURA 34-14b**). Las vellosidades, que miden aproximadamente un milímetro de longitud, hacen que a simple vista el revestimiento intestinal tenga un aspecto aterciopelado, y oscilan suavemente en el quimo que pasa por el intestino. Este movimien-

to aumenta su exposición a las moléculas que han de digerirse y absorberse. Las células epiteliales que cubren cada vellosidad tienen proyecciones microscópicas llamadas **microvellosidades** (**FIGURA 34-14d**). En conjunto, estas especializaciones del revestimiento del intestino delgado le confieren una enorme área superficial de unos 250 metros cuadrados (casi el tamaño de una cancha de tenis).

Contracciones no sincronizadas de los músculos circulares del intestino, llamadas **movimientos de segmentación**, revuelven el quimo hacia atrás y adelante, de forma que los nutrientes entren en contacto con la superficie absorbente del intestino delgado. Cuando ya no hay más que absorber, ondas peristálticas coordinadas llevan el residuo al *intestino grueso*.

#### Los nutrientes son transportados a través de la pared intestinal de diferentes maneras

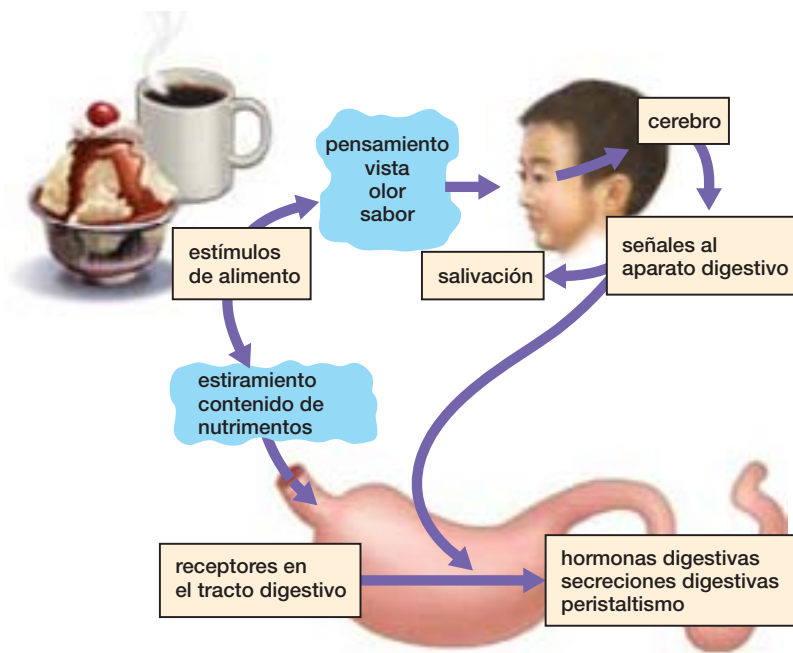
Entre los nutrientes que el intestino delgado absorbe están agua, monosacáridos, aminoácidos y péptidos cortos, ácidos grasos producidos por la digestión de lípidos, vitaminas y minerales. Los mecanismos por los que se efectúa esta absorción son variados y complejos; muchos nutrientes se desplazan por medio de proteínas portadoras, ya sea por transporte activo o por difusión facilitada (como se describió en el capítulo 5).

Cada vellosidad del intestino delgado cuenta con un abasto abundante de capilares sanguíneos y un solo capilar linfático, llamado **quilífero**, para llevarse los nutrientes absorbidos y distribuirlos por todo el cuerpo (**FIGURA 34-14c**). Casi todos los nutrientes pasan a través de las células que revisten el intestino delgado y entran en la sangre por los capilares en las vellosidades, pero el glicerol y los ácidos grasos (producidos cuando la lipasa ataca a los triglicéridos) siguen una ruta distinta. Una vez que se difunden a las células que revisten el intestino delgado, estas subunidades de triglicéridos se ensamblan en partículas llamadas *quilomicrones*, que consisten en triglicéridos, colesterol y proteínas, que luego se liberan dentro de las vellosidades. Los quilomicrones,



**FIGURA 34-14** Estructura del intestino delgado

Los pliegues macroscópicos del revestimiento intestinal están recubiertos de **b)** diminutas proyecciones cilíndricas llamadas vellosidades, que se observan en esta micrografía como salientes de la membrana plegada. **c)** Cada vellosidad contiene una red de capilares y un vaso linfático central llamado quilífero. La mayoría de los nutrientes que se digieren entran en estos capilares, pero los lípidos entran por el quilífero. **d)** La membrana plasmática de las células epiteliales que cubren cada vellosidad presentan microvellosidades. **PREGUNTA:** ¿Qué aspecto tendría la anatomía del aparato digestivo si los pliegues, vellosidades y microvellosidades del intestino delgado no hubieran evolucionado?



**FIGURA 34-15** Nervios y hormonas influyen en el aparato digestivo

demasiado grandes para entrar en los capilares, se introducen en los vasos quilíferos, cuyas paredes son más porosas. De los vasos quilíferos son transportados dentro del sistema linfático, que finalmente los vacía en una gran vena cerca del corazón, como se describe en el capítulo 32.

### En el intestino grueso se absorbe agua y se forman heces

El **intestino grueso** de un ser humano adulto mide aproximadamente 1.5 metros de largo y 7.5 centímetros de diámetro, así que es más ancho y más corto que el intestino delgado. El intestino grueso consta de dos partes: durante casi toda su extensión se le denomina **colon**, pero su compartimiento final, de unos 15 centímetros de longitud, se llama **recto**. Al intestino grueso llegan los residuos de la digestión: las paredes celulares de las verduras y frutas, pequeñas cantidades de lípidos y proteínas no digeridos, así como algunos residuos de nutrientes, incluida agua. El intestino grueso contiene una floreciente población de bacterias (aunque, entre los mamíferos, sólo los rumiantes albergan microorganismos intestinales capaces de digerir celulosa). Estas bacterias pagan su manu-

tención sintetizando vitamina B<sub>12</sub>, tiamina, riboflavina y, de manera muy importante, vitamina K, que no suele estar presente en cantidades suficientes en la dieta, por lo que no estaría en el cuerpo si no existieran estas útiles bacterias. Las células que recubren el intestino grueso absorben estas vitaminas, así como el agua y las sales remanentes.

Una vez que termina la absorción, lo que queda es la materia semisólida que conocemos como **heces**. Éstas consisten en agua, desechos indigeribles, algunos residuos de nutrientes, algunos productos desdoblados de los glóbulos rojos y bacterias muertas (estas últimas representan cerca de la tercera parte del peso seco de las heces). La materia fecal se transporta por movimientos peristálticos hasta el recto. La expansión de esta cámara estimula el deseo de defecar. La apertura del ano se controla mediante dos músculos esfínteres: uno interno que es involuntario y otro externo que puede controlarse de manera consciente. Aunque la defecación es un reflejo (como bien lo sabe cualquiera que tenga un bebé), se somete al control de la voluntad a partir de los dos años de edad, aproximadamente.

### La digestión es controlada por el sistema nervioso y ciertas hormonas

El mesero coloca una ensalada del chef frente a nosotros que, hambrientos, comenzamos a devorarla. Sin que pensemos en ello, nuestro cuerpo coordina una serie compleja de acciones que convierten la ensalada en nutrientes que circulan por nuestra sangre. No es sorprendente, entonces, que tanto nervios como hormonas coordinen las secreciones y actividades del tracto digestivo (**FIGURA 34-15** y **tabla 34-5**).

**Tabla 34-5** Algunas hormonas digestivas importantes

Hormona	Sitio de producción	Estímulo para la producción	Efecto
Gastrina	Estómago	Péptidos y aminoácidos en el estómago	Estimula la secreción ácida por las células estomacales
Secretina	Intestino delgado	Ácido en el intestino delgado	Estimula la producción de bicarbonato por el páncreas y el hígado; aumenta la producción hepática de bilis
Colecistocinina	Intestino delgado	Aminoácidos, ácidos grasos en el intestino delgado	Estimula la secreción de enzimas pancreáticas y la liberación de bilis de la vesícula
Péptido inhibitorio gástrico	Intestino delgado	Ácidos grasos y azúcares en el intestino delgado	Inhibe los movimientos estomacales y la liberación de ácido gástrico

**El alimento desencadena respuestas del sistema nervioso**

El aspecto, el olor, el sabor y a veces la idea de la comida generan señales del cerebro que actúan sobre las glándulas salivales y muchas otras partes del tracto digestivo, que se preparan para digerir y absorber el alimento. Por ejemplo, estos impulsos nerviosos hacen que el estómago comience a secretar ácido y moco protector. Conforme el alimento entra al cuerpo y se mueve a través del aparato digestivo, su volumen estimula reflejos nerviosos locales que provocan movimientos peristálticos y de segmentación.

**Las hormonas ayudan a regular la actividad digestiva**

El aparato digestivo secreta cuatro hormonas principales, las cuales entran en el torrente sanguíneo y circulan por todo el cuerpo, actuando sobre receptores específicos del tracto digestivo. Al igual que la mayoría de las hormonas, están reguladas por retroalimentación negativa. Por ejemplo, los nutrientes en el quimo, como aminoácidos y péptidos resultantes de la digestión de las proteínas, estimulan las células en el revestimiento del estómago para liberar la hormona **gastrina** en el torrente sanguíneo. La gastrina viaja de regreso a las células estomacales y estimula una mayor secreción de ácido, que promueve la digestión de proteínas. Cuando el pH del estómago alcanza un bajo nivel (es decir, cuando tiene elevada acidez), esto inhibe la secreción de gastrina, lo que, a la vez, inhibe una ulterior producción de ácido (FIGURA 34-16).

La gastrina también estimula la actividad muscular del estómago, lo que ayuda a desdoblar los alimentos y a enviar el quimo al intestino delgado.

Las células de la parte superior del intestino delgado liberan tres hormonas en respuesta al quimo. Juntas, ayudan a controlar tanto el ambiente químico dentro del intestino delgado como la rapidez con la que entra el quimo, promoviendo así una digestión y absorción óptimas de los nutrientes. Las hormonas **secretina** y **colecistocinina** estimulan la liberación de fluidos digestivos en el intestino delgado: bicarbonato y enzimas digestivas del páncreas y bilis del hígado y la vesícula biliar. El **péptido inhibidor gástrico** se produce en respuesta a la presencia de ácidos grasos y azúcares en el quimo. Esta hormona estimula al páncreas a liberar en el torrente sanguíneo la hormona insulina, que ayuda a las células del cuerpo a absorber el azúcar. El péptido inhibidor gástrico (como sugiere su nombre) también inhibe tanto la producción de ácido como el peristaltismo en el estómago. Como resultado, disminuye la rapidez con la que el quimo es bombeado hacia el intestino delgado, dando tiempo adicional para que ocurra la digestión y la absorción.



**FIGURA 34-16** Una retroalimentación negativa controla la acidez estomacal

## OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿ADELGAZAR HASTA MORIR?

tienen cinco veces más probabilidades de desarrollar ese mismo trastorno. Los problemas mentales (como ansiedad y depresión) y rasgos de personalidad (como perfeccionismo, baja autoestima y una fuerte necesidad de aceptación y logro) parecen predisponer a los individuos a los trastornos alimentarios. Muchos casos se inician durante la adolescencia, cuando los cuerpos y los cerebros de las personas experimentan rápidos cambios. Por otra parte, los anuncios en televisión, revistas e Internet bombardean a jóvenes susceptibles con el mensaje de que estar delgado es la ruta de la aceptación, la belleza y la riqueza; de esta forma, la gente intenta satisfacer estas pautas imposibles de alcanzar, lo que en ocasiones propicia una espiral fuera de control que conduce a los desórdenes alimentarios.

Por desgracia, estos trastornos son difíciles de tratar. Las víctimas por lo general reciben terapia nutricional que en ocasiones incluye hospitalización para ayudarlas a recuperarse de la desnutrición. La psicoterapia a menudo es necesaria en estos casos y, en ocasiones, también son útiles los antidepresivos. Como muchas víctimas ocultan o niegan sus problemas, y puesto que el tratamiento es caro, la mayoría de quienes padecen trastornos



**FIGURA 34-17** Una víctima de anorexia de 17 años



alimentarios reciben un tratamiento inadecuado, de manera que sólo alrededor de la mitad de las víctimas de anorexia logran una plena recuperación. Para Carré Otis, la llamada de atención vino cuando, a la edad de 30 años, necesitó cirugía para aliviar su corazón dañado por años de desnutrición. Ahora recuerda: "Necesitaba cambiar o, de otra forma, mi cuerpo no lo hubiera podido soportar.

En ese momento, finalmente me di cuenta qué tan fuera de control estaba y sabía que no estaba lista para morir. Estaba lista para embarcarme en el camino de la recuperación".

**Piensa en esto** Se ha culpado a los medios de comunicación masiva que ensalzan la delgadez de la incidencia creciente de los

trastornos alimentarios. ¿Por qué crees que la extrema delgadez se ha vuelto tan atractiva? ¿Existirán medidas adecuadas que pueda tomar una sociedad libre para revertir o limitar este mensaje?

## REPASO DEL CAPÍTULO

### RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

#### 34.1 ¿Qué nutrientes necesitan los animales?

Cada tipo de animal tiene requerimientos nutricionales específicos. Tales requerimientos incluyen moléculas que pueden desdoblarse para liberar energía, como lípidos, carbohidratos y proteínas; bloques químicos de construcción que sirven para formar moléculas complejas, como los aminoácidos que forman proteínas; y minerales y vitaminas que facilitan las diversas reacciones químicas del metabolismo.

#### Web tutorial 34.1 La digestión y absorción de alimento

#### 34.2 ¿Cómo se efectúa la digestión?

Los sistemas digestivos deben realizar cinco tareas: ingestión, desdoblamiento mecánico de los alimentos seguido de desdoblamiento químico, absorción y eliminación de desechos. Los sistemas digestivos convierten las complejas moléculas de los cuerpos de otros animales y plantas que han sido ingeridos en moléculas más simples que pueden aprovecharse. La digestión animal en su forma más simple es intracelular, como la que se efectúa en las células individuales de una esponja. La digestión extracelular, utilizada por los animales más complejos, se efectúa en una cavidad del cuerpo. La forma más simple de sistema digestivo es una cavidad gastrovascular con forma de bolsa en organismos como la *hidra*. Otros animales más complejos utilizan un compartimiento tubular con cámaras especializadas donde el alimento se procesa en una secuencia bien definida.

#### 34.3 ¿Cómo digieren los alimentos los seres humanos?

En el ser humano, la digestión comienza en la boca, donde el alimento se desdobra físicamente por masticación y la saliva inicia la

digestión química. Luego el alimento se lleva al estómago mediante ondas peristálticas del esófago. En el entorno ácido del estómago, el alimento se bate para formar partículas más pequeñas y se inicia la digestión de proteínas. Gradualmente, el alimento licuado, que ahora se llama quimo, pasa al intestino delgado donde el bicarbonato de sodio producido por el páncreas lo neutraliza. Secreciones del páncreas, el hígado y las células del intestino delgado completan el desdoblamiento de proteínas, lípidos y carbohidratos. En el intestino delgado los productos moleculares simples de la digestión se absorben al torrente sanguíneo para distribuirse a las células del cuerpo. El intestino grueso absorbe el agua restante y convierte el material indigerible en heces, que se almacenan temporalmente en el recto y se eliminan a través del ano.

La digestión es regulada por el sistema nervioso y las hormonas. El olor y el sabor de la comida, y la masticación, estimulan la secreción de saliva en la boca y la producción de gastrina en el estómago. La gastrina estimula la producción de ácido gástrico. Al ingresar el quimo en el intestino delgado, las células intestinales producen otras tres hormonas: secretina, que estimula la producción de bicarbonato de sodio para neutralizar el quimo ácido; colecistocinina, que estimula la liberación de bilis y hace que el páncreas secrete enzimas digestivas al intestino delgado; y péptido inhibidor gástrico, que inhibe la producción de ácido y el peristaltismo del estómago. Esta inhibición hace más lenta la transferencia de alimento al intestino.

### TÉRMINOS CLAVE

absorción *pág. 700*

ácido graso esencial *pág. 686*

amilasa *pág. 695*

aminoácido esencial *pág. 688*

bilis *pág. 698*

boca *pág. 692*

caloría *pág. 686*

Caloría *pág. 686*

carnívoro *pág. 693*

cavidad gastrovascular *pág. 693*

celulosa *pág. 694*

colecistocinina *pág. 702*

colon *pág. 701*

digestión *pág. 692*

digestión extracelular *pág. 693*

digestión intracelular *pág. 693*

epiglotis *pág. 697*

estómago *pág. 697*

faringe *pág. 697*

gastrina *pág. 702*

glucógeno *pág. 688*

heces *pág. 701*

herbívoro *pág. 693*

hígado *pág. 698*

índice de masa corporal *pág. 687*

intestino delgado *pág. 698*

intestino grueso *pág. 701*

intolerancia a la lactosa *pág. 700*

jugo pancreático *pág. 699*

lipasa *pág. 698*

lisosoma *pág. 693*

microvellosidad *pág. 700*

mineral *pág. 688*

movimiento de segmentación *pág. 700*

nutrimento *pág. 686*

omnívoro *pág. 693*

páncreas *pág. 699*

péptido inhibidor gástrico *pág. 702*

peristaltismo *pág. 697*

proteasa *pág. 698*

quilífero *pág. 700*

quimo *pág. 698*

recto *pág. 701*

rumiante *pág. 694*

sales biliares *pág. 698*

secretina *pág. 702*

sistema digestivo *pág. 692*

urea *pág. 698*

vacuola alimentaria *pág. 693*

vellosidades *pág. 700*

vesícula biliar *pág. 698*

vitamina *pág. 688*

## RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

Cita cuatro tipos generales de nutrimentos y describe el papel de cada uno en la nutrición.

Describe dos tipos diferentes de especializaciones del tracto digestivo, incluida su función y su relación con la dieta del animal.

Menciona y describe las funciones de las tres principales secreciones del estómago.

¿Por qué el estómago es muscular y expansible?

Menciona las sustancias que se secretan al intestino delgado y describe el origen y la función de cada una.

6. Nombra y describe los movimientos musculares que impulsan el alimento a través del tracto digestivo humano.

7. La vitamina C es una vitamina en el ser humano, pero no en el perro. Ciertos aminoácidos son indispensables para el ser humano, pero no para las plantas. Explica esto.

8. Menciona cuatro adaptaciones estructurales o funcionales del intestino delgado humano que aseguran una buena digestión y absorción.

9. Describe la digestión de proteínas en el estómago y el intestino delgado.

## APLICACIÓN DE CONCEPTOS

La etiqueta de una lata de sopa indica que el producto contiene 10 gramos de proteínas, 4 gramos de carbohidratos y 3 gramos de grasas. ¿Cuántas Calorías contiene esta sopa?

Las aves pequeñas tienen altas tasas metabólicas, tractos digestivos eficientes y dietas altas en calorías. Algunas aves consumen alimento equivalente al 34 por ciento de su peso corporal cada día. ¿Por qué crees que casi nunca comen hojas o pasto?

El control del tracto digestivo humano implica varios circuitos de retroalimentación y mensajes que coordinan las actividades en una cámara con las que se están efectuando en cámaras subsiguientes. Menciona en orden las acciones de coordinación anali-

zadas en este capítulo, desde la degustación, masticación y deglución de un trozo de carne hasta que el residuo ingresa en el intestino grueso. ¿Qué activa y desactiva cada proceso?

4. Protozoarios simbióticos en el tracto digestivo de las termitas producen celulosa que usan sus huéspedes. A cambio, las termitas brindan alimento y abrigo a los protozoarios. Imagina que la especie humana es invadida gradualmente, a lo largo de muchas generaciones, por protozoarios simbióticos capaces de producir celulosa. ¿Qué cambios evolutivos podrían presentarse simultáneamente en la estructura y la función del cuerpo para adaptarse a esto?

5. Sigue la trayectoria de un emparedado de jamón y queso con lechuga a través del aparato digestivo humano, explicando qué sucede a cada parte del emparedado al pasar por cada región del tracto digestivo.
6. Uno de los remedios comunes para el estreñimiento (dificultad para defecar) es una solución laxante que contiene sales de mag-

nesio. En el intestino grueso, la pared intestinal absorbe muy lentamente las sales de magnesio, por lo que éstas permanecen en el tracto intestinal durante mucho tiempo. Así, las sales afectan el movimiento del agua en el intestino grueso. Con base en esta información, explica la acción laxante de las sales de magnesio.

## PARA MAYOR INFORMACIÓN

Blaser, M. J. "An Endangered Species in the Stomach". *Scientific American*, febrero de 2005. Describe los beneficios y problemas asociados con la presencia de la bacteria causante de la úlcera (*Helicobacter pylori*) en el estómago.

Pennisi, E. "The Dynamic Gut". *Science*, 25 de marzo de 2005. Los sistemas digestivos de algunos vertebrados cambian para adaptarse a diferentes regímenes de alimentación.

Pennisi, E. "A Mouth Full of Microbes". *Science*, 25 de marzo de 2005. Los investigadores están aprendiendo más acerca de la comunidad bacteriana en la boca humana.

Pollen, M. "Power Steer". *New York Times Magazine*, 31 de marzo de 2002. Una excelente descripción de cómo la industria ganadera ha provocado graves problemas (incluido el desarrollo de bacterias resistentes a los antibióticos) al ignorar el tracto digestivo especializado de los rumiantes.

Raloff, J. "Still Hungry?" *Science News*, 2 de abril de 2005. La investigación arroja luz sobre las "hormonas del apetito".

Raloff, J. "Vitamin Boost". *Science News*, 9 de octubre de 2004. Se descubren nuevos beneficios de la vitamina D y algunos peligros de su deficiencia.

Trivedi, B. "Slimming for Slackers". *New Scientist*, 1 de octubre de 2005. El tipo de bacterias que viven en nuestro intestino podría determinar cuántas calorías extraemos de los alimentos.

Vogel, S. "Why We Get Fat". *Discover*, abril de 1999. Los estadounidenses están engordando por diversas razones: ambientales, genéticas y conductuales.

## El sistema urinario



Los cirujanos preparan un riñón donado para trasplante.

## DE UN VISTAZO

### ESTUDIO DE CASO: Compatibilidad perfecta

#### 35.1 ¿Cuáles son las funciones básicas de los sistemas urinarios?

#### 35.2 ¿Cuáles son algunos ejemplos de sistemas excretores de invertebrados?

- Los protonefridios filtran el líquido intersticial en los platelmintos
- Los túbulos de Malpighi filtran la sangre de los insectos
- Los nefridios de la lombriz de tierra filtran el líquido celómico

#### 35.3 ¿Qué funciones tienen los sistemas urinarios de los vertebrados?

- Los riñones de los vertebrados filtran la sangre
- La excreción de los desechos nitrogenados está adaptada al ambiente

#### 35.4 ¿Cuáles son las estructuras y funciones del aparato urinario humano?

- El aparato urinario consta de riñones, uréteres, vejiga y uretra
- La orina se forma en las nefronas de los riñones

#### De cerca: Las nefronas y la formación de orina

El filtrado se convierte en orina en el túbulo de las nefronas

#### Guardián de la salud: Cuando los riñones fallan

El asa de Henle permite la concentración de la orina

#### 35.5 ¿Cómo ayudan los riñones de los mamíferos a conservar la homeostasis?

- Los riñones regulan el contenido de agua de la sangre
- Los riñones liberan hormonas que ayudan a regular la presión arterial y los niveles de oxígeno de la sangre
- Los riñones vigilan y regulan las sustancias disueltas en la sangre
- Los riñones de los vertebrados están adaptados a diversos entornos

#### Enlaces con la vida: ¿Demasiado líquido para beber?

### OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Compatibilidad perfecta



## ESTUDIO DE CASO COMPATIBILIDAD PERFECTA

KAY BURT ES UNA SOBREVIVIENTE. Su historia comenzó en 1966, cuando apenas se iniciaban los trasplantes de riñones, y ahora comprende tres generaciones de su familia. Kay nació con riñones muy pequeños y estuvo al borde de la muerte cuando tenía 14 años. Las arcaicas máquinas de diálisis de ese tiempo no podían mantenerla viva; Kay llegó a pesar 26 kilos. Cuando su médico sugirió un procedimiento radical, el trasplante renal, su padre, quien era un donador compatible para Kay, sin dudarle ofreció uno de sus riñones. Para entonces, el trasplante renal estaba en sus etapas iniciales de desarrollo; el trasplante de Kay era apenas el quinto caso en todo el estado de Texas. El trasplante se practicó en una agotadora cirugía de 12 ho-

ras. Cuando el riñón trasplantado comenzó a funcionar normalmente en el cuerpo de Kay, parecía un milagro. El médico de Kay le advirtió que nunca debía embarazarse, pues temía que el bebé en desarrollo pudiera dañar el órgano trasplantado o sus delicadas conexiones. A pesar de esta advertencia, cinco años más tarde Kay dio a luz a una hija saludable, Cherry. Después de tres décadas de buena salud, la vida de Kay se vio amenazada de nuevo en 1998. Sólo dos semanas después del fallecimiento de su amado padre, su riñón, que había funcionado en su cuerpo durante 32 años, también falló, lo que obligó a Kay a volver a depender de la diálisis.

Cada año en Estados Unidos, decenas de miles de personas pierden sus funciones

renales. Alrededor de 16,000 recibirán un trasplante renal, unos 67,000 pacientes están en espera de un riñón para trasplante y unos 3500 mueren cada año mientras esperan un trasplante. Más de 300,000 personas que han perdido las funciones renales se mantienen vivas gracias a la hemodiálisis (a menudo conocida simplemente como "diálisis"). ¿Qué es la hemodiálisis y cómo funciona? ¿Qué otros "milagros médicos" podrían ayudar a la gente con problemas en el aparato urinario en el futuro? ¿Cómo enfrentaron Kay y su familia la recaída?

### 35.1 ¿CUÁLES SON LAS FUNCIONES BÁSICAS DE LOS SISTEMAS URINARIOS?

En este capítulo exploraremos el funcionamiento de los sistemas urinarios y descubriremos que hacen mucho más que simplemente producir *orina*. Los **sistemas urinarios** desempeñan muchas funciones cruciales relacionadas con la **homeostasis** (véase el capítulo 31), ayudando así a mantener la composición química de la sangre y el líquido extracelular dentro de los estrechos límites requeridos para el metabolismo celular. Un elemento esencial de la homeostasis es el equilibrio del agua, que resulta crucial para mantener la adecuada concentración u **osmolaridad** de los solutos (sustancias disueltas) en las células y en su ambiente extracelular. En el cuerpo las sustancias disueltas incluyen iones como el sodio ( $\text{Na}^+$ ), cloro ( $\text{Cl}^-$ ) y calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ), así como urea, azúcares, aminoácidos y proteínas, por nombrar sólo algunas. Las soluciones con osmolaridad más alta tienen más partículas disueltas que aquellas con menor osmolaridad.

Al igual que en muchos sistemas fisiológicos, el sistema urinario es un ejemplo de maestría en el desempeño de múltiples tareas. Una importante función del sistema urinario es la **excreción**, un término general que se refiere a la eliminación por parte del cuerpo de desechos o sustancias en exceso. La excreción también se realiza a través del aparato respiratorio (para el caso del dióxido de carbono) y del aparato digestivo (en el caso del material no digerido). El sistema urinario elimina muchos productos de desecho del metabolismo celular, por ejemplo, la urea producida por el desdoblamiento de aminoácidos, así como exceso de agua, exceso de ciertas vitaminas y algunos medicamentos.

Ya sea que hablemos de platelmintos, peces o seres humanos, los sistemas urinarios (conocidos también como *sistemas excretores*) desempeñan funciones similares de acuerdo con la misma secuencia básica de procesos:

Se filtra la sangre o el líquido intersticial, eliminando el agua y pequeñas moléculas disueltas.

2. Los nutrientes se reabsorben de manera selectiva a partir del filtrado.
3. El exceso de agua, el exceso de nutrientes y los desechos disueltos se excretan del cuerpo.

Es importante reconocer que los sistemas urinarios deben estar en estrecha asociación con el **líquido intersticial**, la sustancia acuosa que baña todas las células, para poder eliminar los desechos. En los animales más simples, este líquido es filtrado directamente por el sistema excretor. En animales con un sistema circulatorio, el sistema excretor filtra la sangre conforme ésta pasa por el sistema circulatorio, como se explica en los siguientes ejemplos.

### 35.2 ¿CUÁLES SON ALGUNOS EJEMPLOS DE SISTEMAS EXCRETORES DE INVERTEBRADOS?

#### Los protonefridios filtran el líquido intersticial en los platelmintos

Lo más probable es que las primeras estructuras de excreción especializadas que surgieron en el curso de la evolución animal hayan sido los **protonefridios** (que literalmente significa “antes del nefridio”), los cuales consisten en tubos que transportan líquido y desechos del poro excretor que se vacía hacia el exterior. Células huecas que contienen cilios batientes (llamados *células flamígeras*, porque son cilios que, al moverse, semejan una llama parpadeante) producen una corriente que extrae agua y desechos disueltos hacia los túbulos y los dirige hacia el exterior a través de poros excretores. Los platelmintos de agua dulce, los cuales poseen un sistema protonefridial, deben excretar grandes cantidades de agua que entra en sus cuerpos por ósmosis. Los platelmintos carecen de sistemas circulatorios, y sus dos protonefridios se ramifican por todo el cuerpo, donde recolectan el exceso de agua y algunos desechos que se llevan al exterior a través de numero-

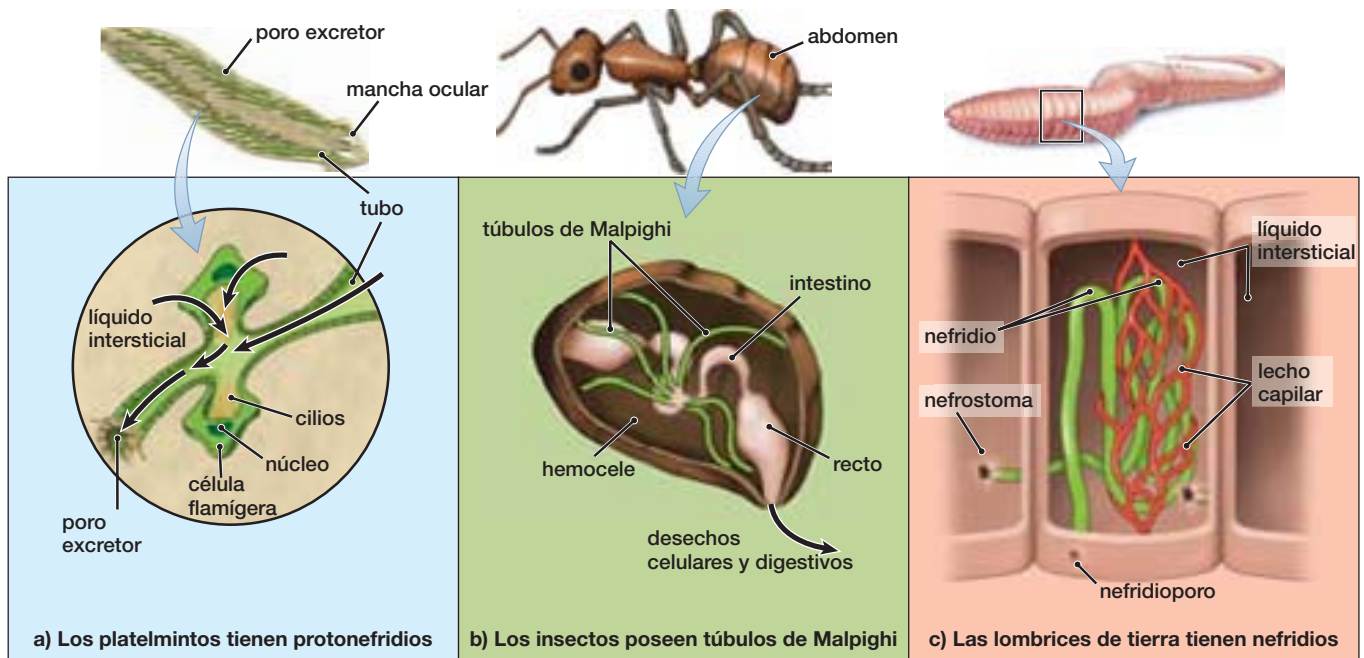


FIGURA 35-1 Sistemas excretores de algunos invertebrados

Los poros excretores (**FIGURA 35-1a**). Los platelmintos también tienen una gran superficie corporal a través de la cual sale por difusión la mayor parte de los desechos celulares.

### Los túbulos de Malpighi filtran la sangre de los insectos

Los insectos tienen un sistema circulatorio abierto, en el cual la sangre llena una cavidad corporal (el *hemocela*) y baña los tejidos directamente. Los sistemas excretores de los insectos consisten en **túbulos de Malpighi**, que son pequeños conductos que se extienden hacia fuera desde el intestino y desembocan dentro de la sangre del hemocela. Los desechos y las sales se mueven por difusión y transporte activo desde la sangre que hay alrededor hacia los túbulos, y el agua les sigue por ósmosis (**FIGURA 35-1b**). En el intestino y el recto, se secretan importantes sales de regreso hacia la sangre por transporte activo, y el agua les sigue por ósmosis. Los insectos pueden producir orina muy concentrada, que se excreta junto con las heces.

### Los nefridios de la lombriz de tierra filtran el líquido celómico

Las lombrices de tierra, los moluscos y otros invertebrados tienen sencillas estructuras llamadas **nefridios**. En la lombriz de tierra la cavidad corporal que rodea a los órganos internos (el celoma) está llena de líquido. Este líquido celómico recolecta tanto desechos como nutrientes de la sangre y los tejidos. El líquido se introduce por una abertura con forma de embudo llamado **nefrostoma** y es impulsado por cilios a lo largo de un angosto y tortuoso tubo rodeado de capilares (**FIGURA 35-1c**). Ahí, las sales y otros nutrientes disueltos se reabsorben a la sangre por los capilares, dejando atrás agua y desechos. La orina así producida se almacena en una porción ensanchada del **nefridioporo**, una abertura en la pared corporal. Cada uno de los segmentos que componen a la lombriz de tierra posee un par de nefridios. Conforme estudies los túbulos renales de los vertebrados, observa la semejanza que tienen con los nefridios.

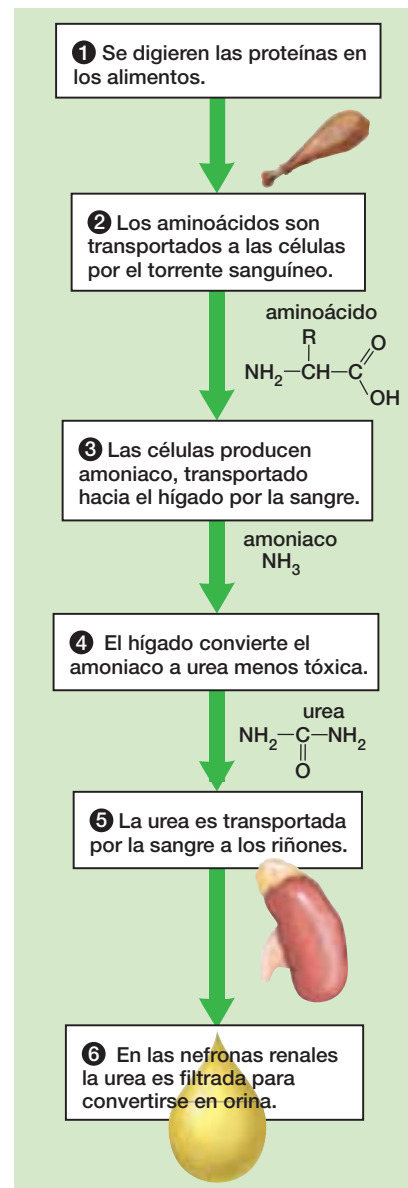
## 35.3 ¿QUÉ FUNCIONES TIENEN LOS SISTEMAS URINARIOS DE LOS VERTEBRADOS?

Los sistemas excretores de los vertebrados deben filtrar los desechos y extraerlos de la sangre mientras retienen los nutrientes y el nivel adecuado de agua.

### Los riñones de los vertebrados filtran la sangre

Los **riñones** filtran la sangre para extraer el agua y todas las moléculas disueltas en ella (excluyendo las proteínas). Luego, los riñones reabsorben agua y nutrientes importantes para reincorporarlos a la sangre, dejando atrás las sustancias tóxicas, los productos celulares de desecho, así como las vitaminas, sales, hormonas y agua. Algunos desechos adicionales son transportados activamente hacia el líquido remanente, que se convierte en **orina**. El resto del sistema urinario dirige y almacena la orina hasta que se expulsa del cuerpo. El sistema urinario de los mamíferos ayuda a mantener la homeostasis de varias maneras, a saber:

- Regula los niveles sanguíneos de iones como sodio, potasio, cloruro y calcio
- Regula el contenido de agua de la sangre
- Mantiene el pH correcto de la sangre
- Retiene nutrientes importantes como glucosa y aminoácidos en la sangre



**FIGURA 35-2** La formación y excreción de urea

**PREGUNTA:** En algunos animales el amoníaco no se convierte en urea, pero es transportado por la sangre hasta que se excreta. ¿En qué tipos de ambientes esperarías encontrar esos animales?

- Secreta hormonas como la *eritropoyetina*, que estimula la producción de glóbulos rojos
- Elimina productos celulares de desecho, como la *urea*

### La excreción de los desechos nitrogenados está adaptada al ambiente

Una función importante de los sistemas excretores es eliminar desechos celulares que son el resultado de la digestión de las proteínas. Tales desechos se denominan *desechos nitrogenados* porque contienen nitrógeno derivado de los aminoácidos de las proteínas. Los animales excretan desechos nitrogenados como *amoníaco*, *urea* o *ácido úrico*.

Cuando los aminoácidos entran en las células, algunos se utilizan directamente para sintetizar nuevas proteínas. A otros se les quita el grupo amino ( $-\text{NH}_2$ ) y se les usa como fuente de energía o para sintetizar nuevas moléculas. Los grupos amino se liberan en forma de **amoníaco** ( $\text{NH}_3$ ), que es

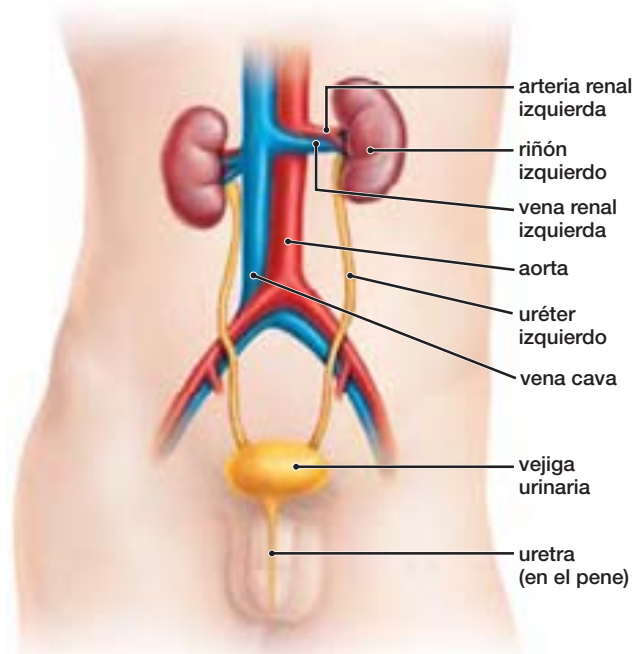
muy tóxico. Los peces excretan amoníaco, que pasa por difusión fácilmente de los capilares en sus branquias al agua que hay alrededor (véase la figura 35-8a). En los vertebrados terrestres, el amoníaco se transporta en la sangre al hígado, donde las reacciones que requieren energía lo convierten en **urea**, que es una sustancia mucho menos tóxica (FIGURA 35-2). Los riñones filtran la urea de la sangre y la excretan en la orina.

Puesto que la urea es soluble en agua, es preciso excretar algo de agua junto con la urea, aunque la pérdida de agua resulte desventajosa. Las aves y los reptiles evitan este problema: excretan los desechos nitrogenados en forma de **ácido úrico**, una molécula más compleja. El ácido úrico no es muy soluble; las aves, los reptiles y los insectos lo excretan como una pasta junto con las heces, de manera que hay muy poca pérdida de agua.

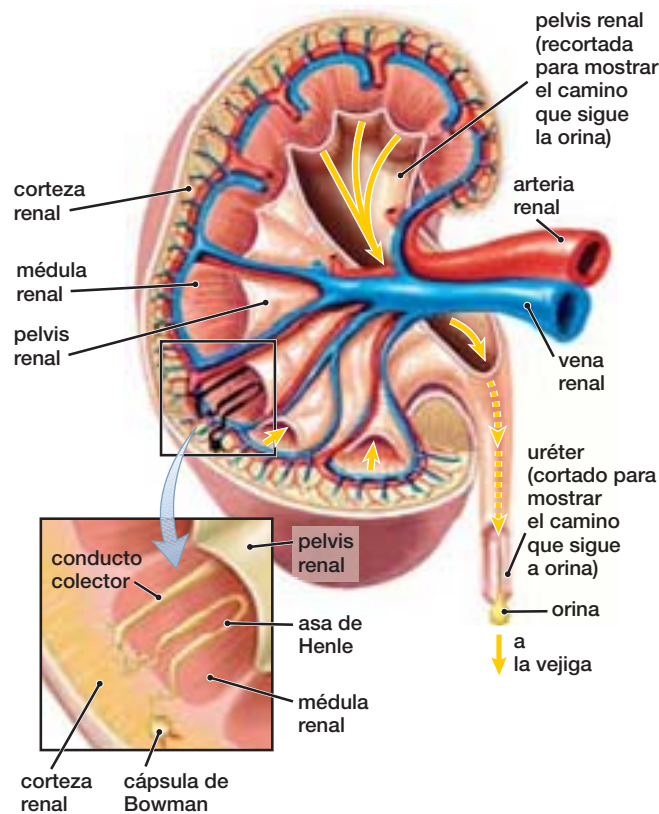
### 35.4 ¿CUÁLES SON LAS ESTRUCTURAS Y FUNCIONES DEL APARATO URINARIO HUMANO?

**El aparato urinario consta de riñones, uréteres, vejiga y uretra**

Los riñones humanos son un par de órganos situados uno a cada lado de la columna vertebral y que se extienden un poco por arriba de la cintura (FIGURA 35-3). Cada uno mide aproximadamente 13 centímetros de altura, 8 centímetros de ancho y 2.5 centímetros de espesor. Los riñones tienen la forma y el color de un frijol. La sangre con desechos celulares disueltos entra en cada riñón por una **arteria renal**. Una vez que la sangre se ha filtrado, sale por la **vena renal** (FIGURAS 35-3 y 35-4). La orina sale de cada riñón por un estrecho tubo muscular llamado **uréter**. Mediante contracciones peristálticas, los uréteres transportan orina a la **vejiga urinaria**, o simplemente **vejiga**. Esta cámara muscular hueca recolecta y acumula la orina.



**FIGURA 35-3** El aparato urinario humano  
Diagrama simplificado del aparato urinario humano y su abasto de sangre.



**FIGURA 35-4** Sección transversal de un riñón

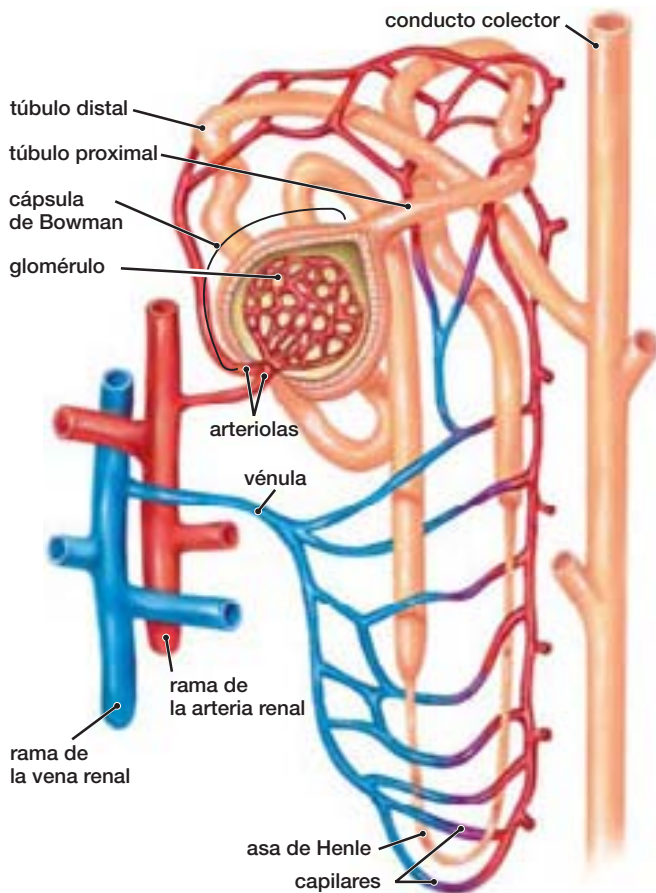
Se ha dibujado una nefrona, muy ampliada (y todavía más ampliada en el recuadro), para mostrar su ubicación en el riñón. Los conductos colectores vierten la orina en los canales que conducen a la pelvis renal, una cámara que vierte la orina en el uréter y hacia fuera del riñón.

Las paredes de la vejiga, que contienen músculos lisos, pueden expandirse considerablemente. La orina se retiene en la vejiga gracias a dos esfínteres situados justo arriba de la abertura a través de la cual vierte su contenido a la uretra. Cuando la vejiga se distiende por la orina almacenada, receptores situados en sus paredes detectan esta condición e inician contracciones reflejas. El esfínter más cercano a la vejiga, el **esfínter interno**, se abre como parte de este reflejo, pero el **esfínter externo** o inferior se controla voluntariamente, así que el cerebro puede suprimir el reflejo, a menos que la distensión de la vejiga sea extrema. La vejiga de un adulto puede contener, en promedio, 500 mililitros de orina, pero el deseo de orinar se activa con acumulaciones mucho menores. La orina termina su viaje al exterior a través de la **uretra**, un único tubo angosto con una longitud aproximada de unos 4 centímetros en la mujer y unos 20 centímetros en el hombre (ya que se extiende a lo largo del pene).

#### La orina se forma en las nefronas de los riñones

Cada riñón contiene una capa exterior sólida que consiste en la **corteza renal**, la cual cubre la **médula renal**. En esta capa exterior se forma la orina. Debajo de la corteza y la médula se encuentra la **pelvis renal**, una cámara interior subdividida que recolecta la orina y la dirige hacia el uréter (véase la figura 35-4). Un examen microscópico de la capa exterior del riñón revela una serie de diminutos filtros individuales llamados **nefronas**, con una extensa red de vasos sanguíneos. La capa exterior de cada riñón contiene más de un millón de nefronas.



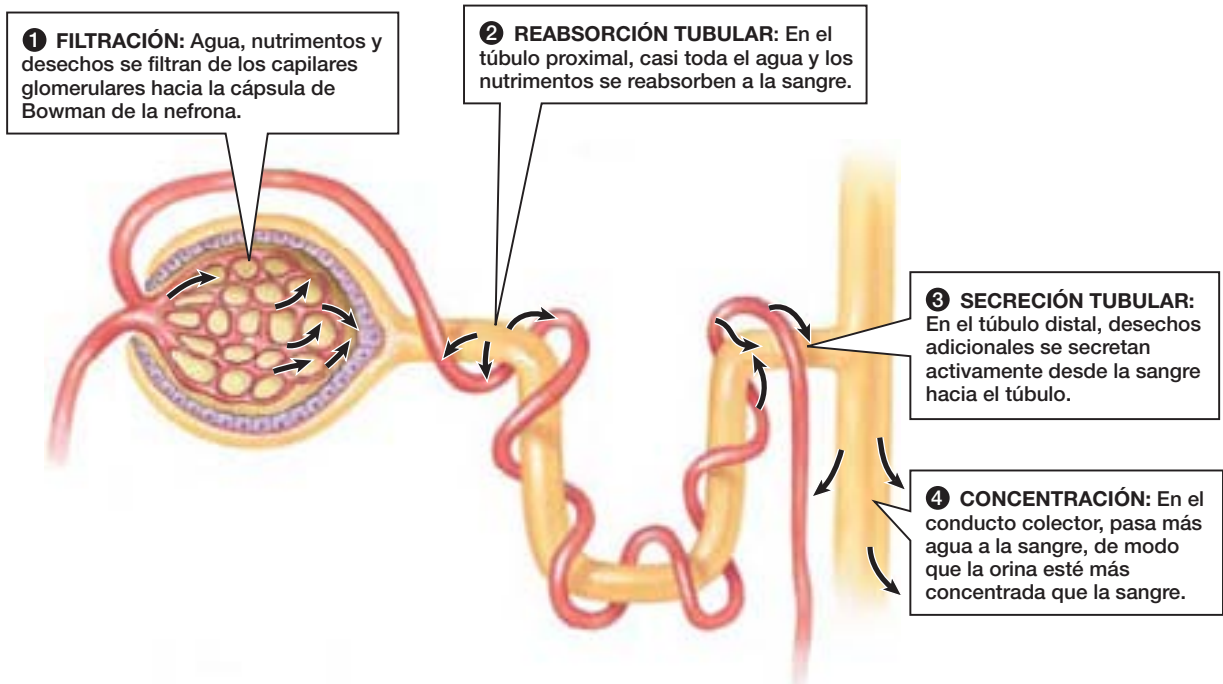


**FIGURA 35-5** Una nefrona y su abasto de sangre

Cada nefrona consta de tres partes principales: el **glomérulo**, una densa masa de capilares de los cuales se toma líquido de la sangre a través de las paredes capilares porosas; la **cápsula de Bowman**, una estructura con forma de copa que rodea el glomérulo; y un **túbulo** (“tubo pequeño”, en latín) largo y tortuoso. El túbulo se subdivide en tres partes: el *túbulo proximal*, el *asa de Henle* y el *túbulo distal*. Los **conductos colectores** son tubos más grandes que recolectan el líquido de muchas nefronas y lo conducen de la corteza a la médula y a la pelvis renal (**FIGURAS 35-5 y 35-6**). Los procesos mediante los cuales estas estructuras producen orina y ayudan a conservar la homeostasis se resumen en los siguientes apartados y se describen con más detalle en la sección “De cerca: Las nefronas y la formación de orina”.

**La sangre se filtra a través de los capilares al glomérulo**

Casi una cuarta parte del volumen de sangre bombeada por cada latido cardíaco viaja a través de los riñones, que reciben más de un litro de sangre cada minuto. Cada nefrona recibe sangre de una arteriola que se ramifica desde la arteria renal. Dentro de la cápsula de Bowman la arteriola se divide en numerosos capilares microscópicos que se entretajan en una masa llamada glomérulo (véase la figura 35-6). Las paredes de los capilares del glomérulo son sumamente permeables al agua y a las pequeñas moléculas disueltas, pero no dejan pasar a los glóbulos rojos, las gotitas de grasa ni tampoco a la mayor parte de las proteínas grandes, como la albúmina. Más allá del glomérulo, los capilares se juntan para formar una arteriola más delgada que la arteriola que entró (esto difiere de la situación habitual, en la que la sangre fluye de los capilares a las vénulas). Esta diferencia de diámetro entre la arteriola que entra y la que sale crea presión dentro del glomérulo, lo que permite la expulsión de agua y muchas sustancias disueltas en la sangre, a través de las paredes porosas de los



## DE CERCA

## Las nefronas y la formación de orina

La compleja estructura de la nefrona está perfectamente adaptada a su función. En la **FIGURA E35-1** se presenta un diagrama de una nefrona, con el fin de ilustrar los procesos que se efectúan en cada parte. Los números encerrados en círculos en la ilustración corresponden a las siguientes descripciones:

- ① **Filtración.** Agua y sustancias disueltas son expulsadas de los capilares glomerulares hacia la cápsula de Bowman y se introducen en el túbulo proximal.
- ② **Reabsorción tubular.** En el túbulo proximal, casi todos los nutrientes importantes que permanecen en el filtrado se bombean activamente hacia fuera a través de las paredes del túbulo y la sangre los reabsorbe. Estos nutrientes incluyen sales, aminoácidos, azúcares y vitaminas. El túbulo proximal es muy permeable al agua, así que ésta sigue a los nutrientes y pasa por ósmosis del túbulo a la sangre.
- ③ El asa de Henle, presente únicamente en las aves y los mamíferos, es indispensable para concentrar la orina. Mantiene un gradiente de concentración de sales en el líquido extracelular que la rodea, con la concentración más alta en la parte inferior del asa. La porción descendente del asa de Henle es muy permeable al agua, pero no a la sal ni a otras sustancias disueltas. Al pasar el filtrado por la porción descendente, el agua sale por ósmosis a medida que aumenta la concentración del líquido circundante.
- ④ La porción delgada del asa de Henle ascendente es relativamente impermeable al agua y la urea, pero es permeable a la sal, la cual sale del filtrado por difusión. ¿Por qué? Aunque las concentraciones osmóticas dentro y fuera del túbulo son casi iguales, en esta porción del asa el nivel de urea es más alto afuera, en tanto que el nivel de sal es más alto adentro. Por ello, el gradiente de concentración favorece la difusión de la sal hacia fuera. Como el agua no puede seguirla, ahora el filtrado está menos concentrado que su entorno.
- ⑤ La porción gruesa del asa de Henle ascendente también es impermeable al agua y la urea. Ahí, se extrae activamente sal del filtrado, en el cual se quedan agua y desechos.
- ⑥ El filtrado acuoso, bajo en sal pero que conserva desechos como la urea, llega a la porción distal del túbulo con osmolaridad más baja (es decir, más diluido) que cuando entró en el asa. Ahora se extrae más sal por bombeo y como esta porción es permeable al agua, ésta sigue a la sal por ósmosis. La secreción tubular es especialmente activa en el túbulo distal, donde sustancias como  $K^+$ ,  $H^+$ ,  $NH_3$ , así como algunos fármacos y toxinas se bombean activamente hacia el túbulo desde el líquido extracelular.
- ⑦ Para cuando el filtrado llega al conducto colector, queda muy poca sal y cerca del 99 por ciento del agua ha sido reabsorbida al torrente sanguíneo. Puesto que ha perdido tanto sal como agua, el líquido ahora tiene aproximadamente la misma osmolaridad que cuando entró en el asa de Henle. El conducto colector lleva la orina a través del creciente gradiente de concentración en el líquido extracelular creado por el asa de Henle. El conducto colector es muy permeable al agua cuando está presente la hormona antidiurética (ADH), así que el agua sale por ósmosis al aumentar la concentración del líquido externo. Si no hay ADH presente, el conducto colector es impermeable al agua y la orina conserva un alto contenido de agua.
- ⑧ La porción inferior del conducto recolector también es permeable a la urea. Por ello, a medida que el filtrado baja por el conducto, algo de urea sale por difusión y contribuye a incrementar la osmolaridad del líquido circundante. Cuando está presente la ADH, el agua también sale. En el caso más extremo, la osmolaridad de la orina en el conducto colector puede alcanzar el equilibrio con la alta osmolaridad del líquido externo; en los seres humanos, esto significa cuatro veces la osmolaridad de la sangre.

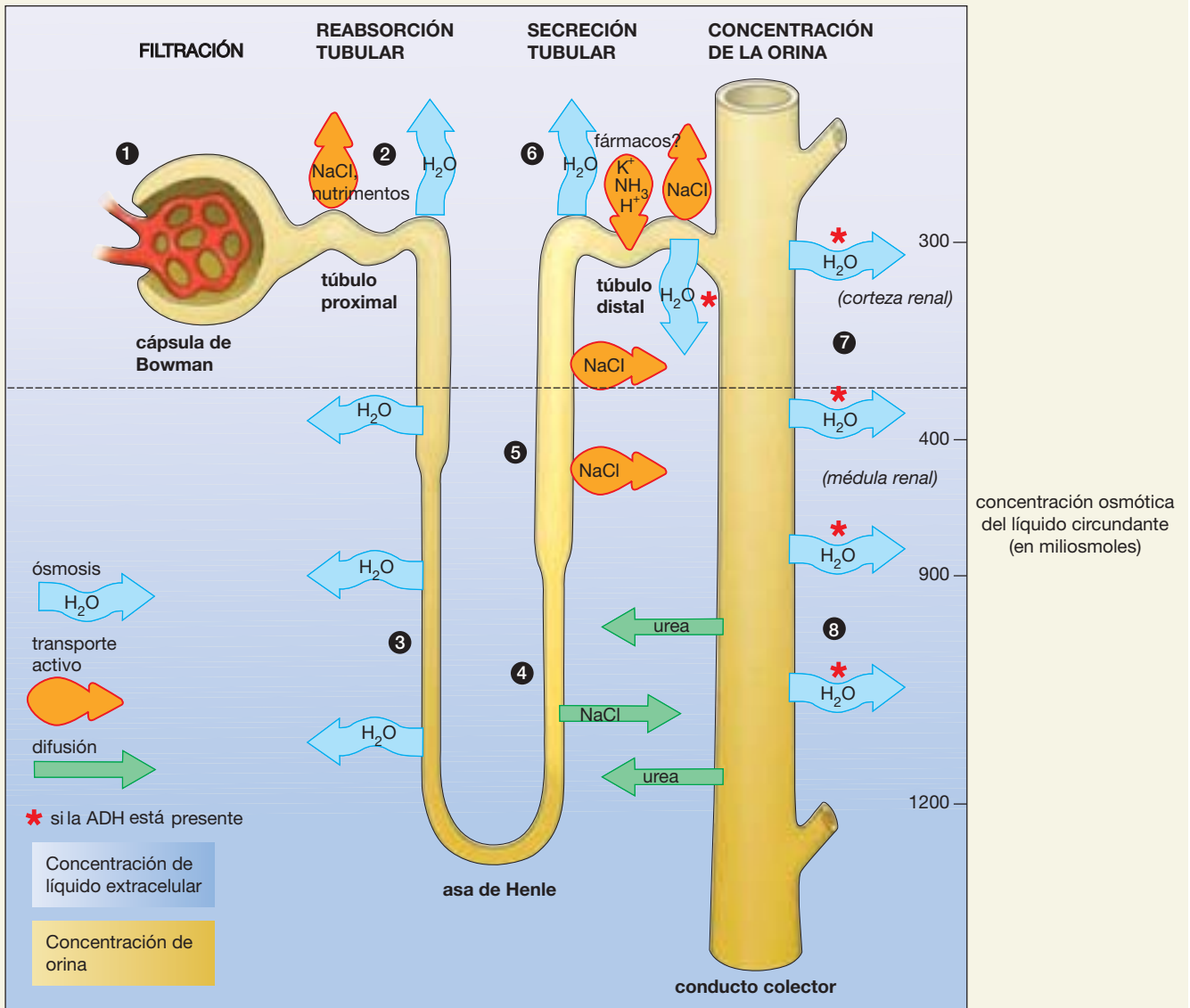
capilares. Este proceso se denomina **filtración** y el líquido resultante se llama **filtrado** (véase la figura 35-6, paso ① y figura E35-1, paso ①)

(como el que recibió Kay Burt de manera tan afortunada). Si la filtración se ve afectada, el volumen de sangre se incrementa (lo que provoca presión arterial elevada), el equilibrio de las sales y del pH se altera, y los desechos tóxicos se retienen en la sangre.

### El filtrado se convierte en orina en el túbulo de las nefronas

El filtrado que se recolecta en la cápsula de Bowman contiene una mezcla de desechos y nutrientes esenciales, además de grandes cantidades de agua. El túbulo de la nefrona debe devolver los nutrientes y casi toda el agua a la sangre, pero conservar los desechos y el exceso de agua para eliminarlos; de esta forma, el equilibrio del agua y los nutrientes que se requiere para la homeostasis se conserva. Esto se logra mediante dos procesos: la *reabsorción tubular* y la *secreción tubular*.

#### La reabsorción tubular



**FIGURA E35-1** Detalles de la formación de orina

Una nefrona individual en la que se indica el movimiento de materiales a través de las distintas regiones. La concentración de sustancias disueltas en el filtrado dentro de la nefrona aumenta de arriba abajo en este diagrama. Fuera de la nefrona, tonos más oscuros de azul representan concentraciones más altas de sales y urea en el líquido circundante. La línea punteada marca la frontera entre la corteza renal y la médula renal.

sales, aminoácidos y glucosa) a partir del filtrado, sacarlos del túbulo y conducirlos al fluido intersticial. De aquí, los nutrientes entran en los capilares adyacentes por difusión. El agua sigue pasivamente, por ósmosis, a los nutrientes que salen del túbulo hacia los capilares (véase la figura 35-6, paso ② y figura E35-1, paso ②). Conforme pasa por todo el largo del túbulo, aproximadamente el 99 por ciento del agua se reabsorbe.

**La secreción tubular**

transporte activo para secretar desechos y sustancias en exceso hacia el túbulo distal (véase la figura 35-6, paso ③, y figura E35-1, paso ⑥)

## GUARDIÁN DE LA SALUD

### Cuando los riñones fallan

Si los riñones fallan, la muerte es rápida, por lo regular en menos de dos semanas. Cada año, cerca de 90,000 estadounidenses mueren como resultado de enfermedades del aparato urinario. Las causas más comunes de la insuficiencia renal son la diabetes y la hipertensión, que dañan los capilares glomerulares; pero los riñones también son vulnerables a las infecciones y las sobredosis de algunos analgésicos. La insuficiencia renal por lo regular se trata con hemodiálisis.

Esta técnica, que se usó por primera vez en 1945, opera con base en el sencillo principio de que las sustancias se difunden de áreas de más alta concentración hacia áreas de menor concentración a través de membranas artificiales permeables. Este proceso recibe el nombre de *diálisis*. Cuando la sangre se filtra empleando este principio, el proceso se denomina **hemodiálisis**. Durante la hemodiálisis, la sangre del paciente se extrae del cuerpo y se bombea a través de tubos delgados hechos de una membrana especial de celofán y suspendidos en líquido dializante. Al igual que los capilares glomerulares, la membrana tiene poros demasiado pequeños para permitir el paso de los glóbulos y las proteínas grandes de la sangre, pero que dejan pasar moléculas pequeñas como agua, azúcar, sales, aminoácidos y urea. El líquido dializante tiene los niveles normales sanguíneos de sales y nutrimentos, sin incluir productos de desecho; de esta forma, sólo las moléculas cuya concentración sea más alta de lo normal en la sangre del paciente (como la urea, un producto de desecho) se difunden hacia el líquido dializante, que se repone continuamente para conservar su gradiente. El paciente debe permanecer conectado a la máquina de diálisis de 4 a 6 horas, tres veces por semana (**FIGURA E35-2**). La gente que depende de la diálisis puede sobrevivir muchos años, siempre y cuando su dieta y la ingesta de líquidos estén bajo estricta supervisión. Aun con diálisis, la composición de la sangre de los pacientes fluctúa y las sustancias tóxicas alcanzan niveles más altos de lo normal, entre una sesión y otra.

La *diálisis peritoneal* es una técnica menos común en la que líquido dializante se bombea a través de un tubo implantado directamente en la cavidad abdominal. Esta cavidad está revestida por una membrana natural llamada *peritoneo*. Los productos de desecho de la sangre que circula por los capilares del peritoneo se difunden gradualmente hacia el líquido de diálisis, que luego se drena por el tubo. El paciente puede efectuar es-

te procedimiento en casa, cambiando el líquido de diálisis unas cuatro veces al día, o conectando su tubo implantado a una máquina que hace circular el líquido por la cavidad abdominal durante la noche.

¿Qué posibilidades ofrecerá el futuro para las víctimas de enfermedades renales? En la Universidad de Michigan, el doctor David Humes desarrolló un prototipo de "riñón bioartificial". El dispositivo de Humes hace circular la sangre a través de un cartucho lleno con pequeños tubos revestidos con células vivas del túbulo proximal del riñón, que se cultivan a partir de las células extraídas de los riñones humanos donados. Pruebas clínicas con este dispositivo en pacientes de cuidado intensivo cuyos riñones fallaban demostraron que el riñón bioartificial, utilizado en conjunción con una máquina de hemodiálisis, mejoraba la función renal en pacientes cercanos a la muerte por problemas del aparato urinario. Humes espera usar en el futuro esta tecnología en un riñón bioartificial implantado. Los investigadores también continúan trabajando en la *xenotrasplante*, un proceso que permitirá a la gente recibir riñones de animales como los cerdos, cuyas células se hayan modificado genéticamente para evitar que el sistema inmunitario del receptor las rechace y ataque.



**FIGURA E35-2** Una paciente en diálisis

acumulan hasta alcanzar niveles tóxicos en la sangre, una condición que es mortal si no se trata por medio de diálisis o de un transplante de riñón.

#### El asa de Henle permite la concentración de la orina

Los riñones de los mamíferos y las aves pueden producir orina con una concentración de materiales disueltos más alta que la de su sangre. La orina puede volverse más concentrada porque existe un gradiente de concentración de las sales disueltas y la urea en el líquido intersticial de la médula del riñón que rodea los conductos colectores. Este gradiente es producido por el **asa de Henle**

diente de concentración que produce porque existe una mayor longitud de túbulo para sacar la sal hacia el líquido circundante (véase la figura E35-1, pasos ④ y ⑤)

resto del aparato excretor no permite el ingreso de agua ni el escape de urea, la orina se mantiene concentrada.

Es importante producir orina concentrada cuando escasea el agua, y producir orina diluida cuando hay exceso de agua en la sangre. El grado de concentración de la orina depende de la permeabilidad al agua del conducto colector. Esto se controla con la cantidad de la *hormona antidiurética*, que describiremos más adelante.

### 35.5 ¿CÓMO AYUDAN LOS RIÑONES DE LOS MAMÍFEROS A CONSERVAR LA HOMEOSTASIS?

Cada gota de sangre del cuerpo pasa por un riñón aproximadamente 350 veces al día; así, el riñón puede ajustar finamente la composición de la sangre y mantener la homeostasis. La importancia de esta tarea queda de manifiesto por el hecho de que una falla renal causa la muerte en poco tiempo.

#### Los riñones regulan el contenido de agua de la sangre

Una función importante de los riñones es la de regular el contenido de agua de la sangre. Los riñones humanos extraen por filtración media taza de líquido de la sangre cada minuto. Si no hubiera reabsorción de agua, ¡produciríamos unos 190 litros de orina al día!, por lo que necesitaríamos beber agua continuamente. La reabsorción de agua se efectúa pasivamente por ósmosis mientras el filtrado pasa por el túbulo y el conducto colector.

La cantidad de agua reabsorbida por la sangre se controla con un mecanismo de retroalimentación negativa (véase el capítulo 31) en el que interviene la cantidad de **hormona antidiurética (ADH)**; también llamada *vasopresina* que circula en la sangre. Esta hormona es producida por las células secretoras del hipotálamo y se libera en la sangre a través de la glándula hipófisis (pituitaria) posterior (véase el capítulo 37). La liberación de ADH se desencadena cuando células receptoras del hipotálamo detectan un incremento en la osmolaridad de la sangre, y cuando los receptores en el corazón detectan un decremento en la presión arterial (ambos son síntomas de escasez de agua en la sangre). La hormona antidiurética aumenta la permeabilidad al agua del túbulo distal y del conducto colector, lo que permite reabsorber más agua de la orina. En respuesta a la unión de la ADH a los receptores en sus membranas plasmáticas, las células del túbulo distal y el conducto colector introducen proteínas de *acuaporina* (“poro de agua”, en latín) a sus membranas, lo que aumenta su permeabilidad al agua (las acuaporinas se describieron en el capítulo 5).

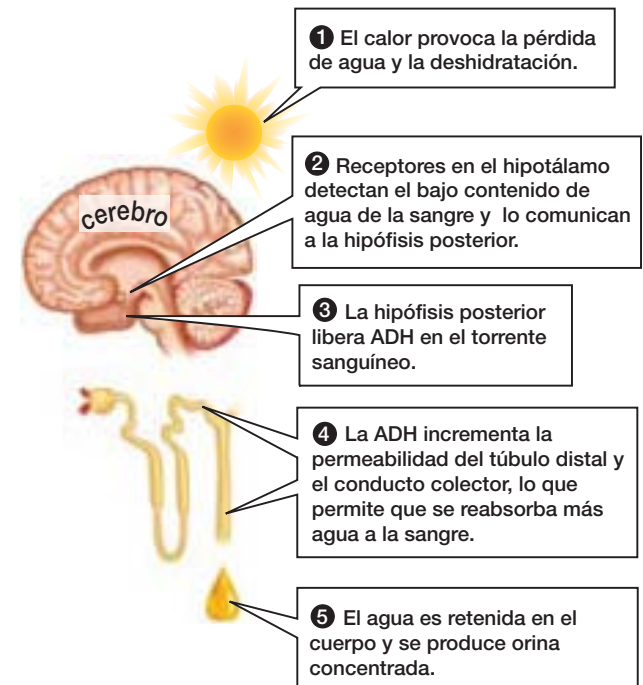
Imagínate perdido en el desierto, avanzando tambaleante bajo el Sol abrasador; transpiras copiosamente y pierdes agua con cada exhalación. Conforme baja el volumen de la sangre, su osmolaridad aumenta, activando la liberación de ADH desde la glándula hipófisis. Esto aumenta la reabsorción de agua y produce orina más concentrada (FIGURA 35-7

ductos colectores menos permeables al agua, de manera que se reabsorbe relativamente poca agua después de que la orina sale del asa de Henle. Tu vejiga ahora comienza a llenarse con orina que está más diluida que tu sangre. En casos extremos, el flujo de orina podría exceder el litro por hora. Una vez que se restablece el nivel de agua en la sangre, su mayor osmolaridad y menor volumen estimulan la producción de ADH, lo que conserva la homeostasis al mantener el contenido de agua de la sangre dentro de estrechos límites.

#### Los riñones liberan hormonas que ayudan a regular la presión arterial y los niveles de oxígeno de la sangre

Cuando la presión arterial baja, los riñones liberan **renina** al torrente sanguíneo. La renina actúa como enzima catalizando la formación de una segunda hormona, la **angiotensina**, a partir de una proteína que circula en la sangre. La angiotensina, a la vez, hace que las arteriolas se constriñan y eleven la presión arterial. La constricción de las arteriolas que llevan sangre a los riñones también reduce la rapidez de filtración de la sangre y hace que se extraiga menos agua de ella. La retención de agua produce un incremento en el volumen de la sangre y, por consiguiente, un aumento en la presión arterial.

En respuesta a niveles bajos de oxígeno en la sangre, los riñones liberan una segunda hormona, la **eritropoyetina** (véase el capítulo 32). La eritropoyetina viaja por la sangre hasta la médula ósea, donde estimula la producción de glóbulos rojos, los cuales se encargan de transportar oxígeno. Una falla en los riñones casi siempre provoca anemia porque los riñones no



**FIGURA 35-7** La deshidratación estimula la liberación de ADH y la retención de agua

**PREGUNTA:** El alcohol inhibe la liberación de ADH. Explica cómo afectará el consumo de alcohol al equilibrio de agua en el cuerpo.

producen suficiente eritropoyetina para estimular la adecuada producción de glóbulos rojos. Los médicos actuales prescriben eritropoyetina humana elaborada mediante técnicas de ingeniería genética a los pacientes que padecen anemia provocada por una deficiencia renal.

### Los riñones vigilan y regulan las sustancias disueltas en la sangre

Mientras los riñones filtran la sangre, vigilan y regulan su composición, además de ajustar la secreción tubular y la rapidez de reabsorción, con el fin de mantener un entorno interno constante. Entre las sustancias que los riñones regulan, además del agua, están nutrimentos como glucosa, aminoácidos, vitaminas, urea y diversos iones, como sodio, potasio, cloruro y sulfato. Los riñones mantienen un pH constante en la sangre regulando la cantidad de iones hidrógeno y de bicarbonato de sodio que se secretan a la orina. Estos notables órganos también eliminan sustancias potencialmente nocivas, como ciertos fármacos, aditivos de alimentos, plaguicidas y sustancias tóxicas del humo del cigarro, como la nicotina.

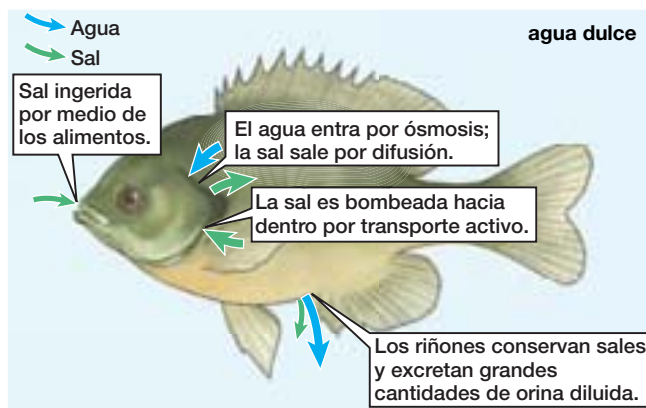
### Los riñones de los vertebrados están adaptados a diversos entornos

#### Los entornos de agua dulce y agua salada representan desafíos especiales

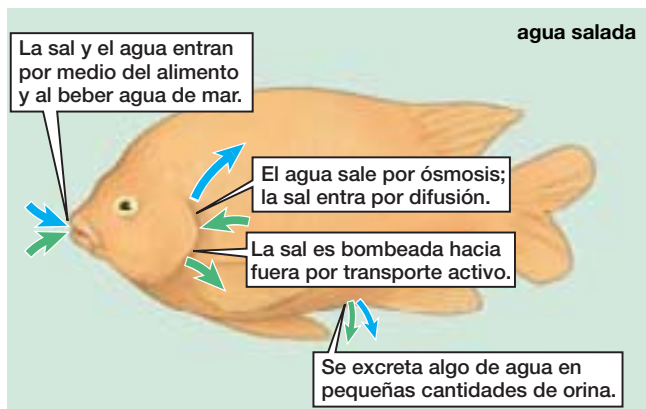
Los animales que se encuentran continuamente inmersos en una solución que tiene una osmolaridad menor o mayor que los líquidos de sus cuerpos han desarrollado mecanismos especiales para mantener el equilibrio del agua y la sal dentro de sus organismos. Este proceso se llama **osmorregulación**. Los peces de agua dulce, por ejemplo, viven en un ambiente *hipotónico*; sus cuerpos mantienen concentraciones de sustancias disueltas que son entre 4 y 6 veces la osmolaridad de su entorno de agua dulce. A medida que estos peces hacen circular el agua sobre sus branquias para intercambiar gases, algo de agua se filtra a sus cuerpos de manera continua por ósmosis, mientras las sales se expelen por difusión. Para compensar la pérdida de sales, los peces de agua dulce tienen proteínas de transporte activo en sus branquias, que utilizan energía para bombear la sal a sus cuerpos desde el entorno poco concentrado, en contra de su gradiente de concentración. Para compensar por la entrada de exceso de agua, los peces de agua dulce nunca beben, y sus riñones pueden excretar grandes cantidades de orina sumamente diluida. Su alimento también les provee sales, las cuales son reabsorbidas por los riñones mediante el transporte activo (**FIGURA 35-8a**).

Los peces de agua salada, que viven en un ambiente *hipertónico*

#### a) Pez de agua dulce (perca azul)



#### b) Pez de agua salada (garibaldi)



**FIGURA 35-8** Osmorregulación en los peces

sal que sus branquias no logran eliminar (**FIGURA 35-8b**). El continuo requerimiento de transporte activo en los peces de agua dulce y de agua salada significa que, en ambos ambientes, los peces utilizan cantidades sustanciales de energía en la osmorregulación.

La clase de peces marinos que incluye a los tiburones y las rayas tiene una forma diferente de efectuar la osmorregulación. Estos peces almacenan grandes cantidades de urea en sus tejidos, que sería suficiente para matar a casi cualquier vertebrado. La urea almacenada confiere a sus tejidos aproximadamente la misma osmolaridad del agua de mar en la que están inmersos, lo que evita la pérdida de agua por ósmosis.

#### Las asas de Henle determinan la capacidad para concentrar orina de los mamíferos

## ENLACES CON LA VIDA

## ¿Demasiado líquido para beber?

Quienes consumen alcohol seguramente han observado que el volumen de la orina que producen después de beber parece exceder el volumen de líquidos que ingirieron. ¿Por qué? Uno de los muchos efectos del alcohol es que se inhibe la liberación de ADH, y sin esta hormona, la orina es muy diluida. Como el alcohol hace excretar más orina de la necesaria para recuperar el equilibrio de agua, irónicamente, “beber demasiado líquido” en realidad puede provocar una deshidratación.

Por otra parte, muchas personas beben más agua de la que necesitan. Quizá hayas escuchado el consejo de que “Siempre hay que beber agua antes de tener sed”, o “Toma dos litros de agua cada día además de otros líquidos”. Para deleite de la industria del agua embotellada, muchos están tomando en serio estos consejos. Para la gente saludable con dietas normales, beber antes de sentir sed es completamente innecesario: la

evolución ha sincronizado nuestro deseo de beber con nuestras necesidades de líquido. Por otra parte, en casos extremos, beber demasiado líquido es peligroso. Si el cuerpo acumula agua a un ritmo más rápido que el de los riñones para eliminarla, sales importantes (particularmente el sodio) en el líquido intersticial se diluyen y un exceso de agua entra en las células por ósmosis. En el cerebro un exceso de agua provoca inflamación, que puede ser mortal. Un estudio con participantes en la Maratón de Boston en 2002 concluyó que el 13 por ciento de ellos probablemente ingirieron cantidades peligrosas de líquido en un intento equivocado por mantenerse hidratados; y trágicamente, un participante de 28 años murió como resultado de ello. La conclusión: siempre hay que poner en práctica la moderación.

colectores. Como cabe esperar, los animales que viven en climas muy secos o con altas concentraciones de sal tienen asas de Henle más largas (como los mamíferos marinos, por ejemplo, las ballenas) y los que viven en ambientes húmedos tienen asas relativamente cortas.

El castor, por ejemplo, sólo tiene nefronas de asa corta y no puede concentrar su orina a más del doble de la osmolaridad de su sangre. Los riñones humanos tienen una combinación de nefronas de asa corta y de asa larga y pueden concentrar la orina a unas cuatro veces la osmolaridad de la sangre. Los campeones de la concentración de orina son los roedores del desierto como la rata canguro, que puede producir orina con una concentración 14 veces mayor que la osmolaridad de su sangre (FIGURA 35-9). Como es de esperar, estos animales sólo tienen nefronas de asa muy larga. Gracias a su extraordinaria capacidad para ahorrar agua, no necesitan beber; dependen por completo del agua que ingieren junto con su alimento y de las reacciones metabólicas que producen agua.



**FIGURA 35-9** Una adaptación a un entorno seco

La rata canguro de los desiertos del suroeste de Estados Unidos rara vez toma agua, en parte gracias a que sus largas asas de Henle le permiten producir orina muy concentrada.

## OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO COMPATIBILIDAD PERFECTA



Cuando Cherry, la hija de Kay Burt, se enteró de que su madre sería dependiente de la hemodiálisis por el resto de su vida, inmediatamente ofreció uno de sus riñones. La extraordinaria suerte de Kay continuó; pese a que los doctores habían recomendado a Kay no tener descendencia, su hija resultó ser compatible. El segundo trasplante de Kay, 32 años después del primero, fue otro éxito; hizo historia al recibir riñones trasplantados de su padre y de su hija.

En la actualidad son comunes los trasplantes de riñones tanto de donadores vivos como fallecidos recientemente. Por fortuna,

el número de donadores vivos va en aumento, y los estudios indican que los trasplantes de donadores no emparentados, pero compatibles, tienen un elevado índice de éxito. (Una compatibilidad ideal entre donador y receptor se basa en tener el mismo tipo de sangre genéticamente determinado y de proteínas tisulares). Los receptores de riñones procedentes de donadores vivos tienen mejores tasas de supervivencia a largo plazo. Algunos centros de trasplante utilizan ahora la cirugía endoscópica para extraer los riñones de los donadores vivos. Esta técnica, en la que el cirujano ve la operación a través de una diminuta cámara insertada en el cuerpo, permite extraer el riñón a través de

una incisión de unos 7.5 centímetros de longitud, en contraste con la incisión de 23 centímetros en los métodos tradicionales. La cirugía endoscópica reduce drásticamente el dolor, el tiempo de hospitalización y el tiempo de recuperación del donador.

**Piensa en esto** Supongamos que leíste en un periódico local que una familia está buscando un donador de riñón para su hijo. No conoces a la familia. ¿Estarías dispuesto a hacerte una prueba de compatibilidad y, en caso de resultar compatible, donarías un riñón?

# REPASO DEL CAPÍTULO

## RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

### 35.1 ¿Cuáles son las funciones básicas de los sistemas urinarios?

Todos los sistemas urinarios (excretores) realizan funciones similares mediante los mismos procesos básicos. Primero se filtra la sangre u otro líquido que baña las células, eliminando el agua y pequeñas moléculas disueltas; segundo, los nutrientes se reabsorben selectivamente a partir del filtrado; y tercero, el agua restante y los desechos disueltos se excretan del cuerpo.

### 35.2 ¿Cuáles son algunos ejemplos de sistemas excretores de invertebrados?

El sencillo sistema excretor de los platelmintos consiste en una red de túbulos que se ramifican por todo el cuerpo y recolectan desechos y agua en exceso para eliminarlos por poros excretores. Los insectos usan los túbulos de Malpighi para filtrar la sangre en el hemocele de su sistema circulatorio, y liberan orina concentrada en el intestino para su eliminación. Las lombrices de tierra y los moluscos emplean nefridios, que se parecen a las nefronas de los vertebrados, para filtrar el líquido intersticial que llena la cavidad corporal. Los desechos y el exceso de agua se expulsan por el poro excretor.

### 35.3 ¿Qué funciones tienen los sistemas urinarios de los vertebrados?

Los sistemas urinarios eliminan los desechos celulares y las sustancias tóxicas mientras retienen nutrientes esenciales en la sangre. El sistema urinario desempeña un papel crucial en la homeostasis, pues regula el contenido de agua y de iones de la sangre, así como su pH. También secreta hormonas como la eritropoyetina, que estimula la producción de glóbulos rojos.

### 35.4 ¿Cuáles son las estructuras y funciones del aparato urinario humano?

El aparato urinario humano consta de riñones, uréteres, vejiga y uretra. Los riñones producen orina, que los uréteres llevan a la vejiga, un órgano de almacenamiento. La distensión de la pared muscular de la vejiga activa la micción, durante la cual la orina sale del cuerpo a través de la uretra.

Cada riñón consiste en más de un millón de nefronas individuales en una capa exterior, la cual consta de la médula renal y la corteza renal que se encuentra encima. La orina que se forma en las nefronas pasa a conductos recolectores que recorren la médula y desembocan en la pelvis renal, de donde se dirige al uréter.

Cada nefrona es abastecida por una arteriola que se ramifica de la arteria renal. La arteriola se ramifica después para formar una masa de capilares con paredes porosas llamada glomérulo. Ahí, agua y sustancias disueltas se filtran de la sangre mediante presión. El filtrado se recolecta en la cápsula de Bowman, que tiene forma de taza, y se conduce por la porción tubular de la nefrona. Durante la reabsorción tubular, se bombean activamente nutrientes hacia fuera de las paredes del túbulo. De ahí, los nutrientes entran en los capilares que rodean al túbulo y el agua los sigue por ósmosis. Algunos desechos permanecen en el filtrado; otros se bombean activamente hacia el interior del túbulo por secreción tubular. El túbulo forma el asa de Henle, que crea un gradiente de concentración de sales en derredor suyo. Después de completar su paso por el túbulo, el filtrado entra en el conducto colector, que pasa por el gradiente de concentración en la médula del riñón. Durante su paso (si la ADH está presente) el agua sale de la orina, la cual puede volverse cuatro veces tan concentrada como la sangre. En ausencia de ADH, la orina permanece diluida.

#### Web tutorial 35.1 Los riñones de los mamíferos

### 35.5 ¿Cómo ayudan los riñones de los mamíferos a conservar la homeostasis?

Los riñones son órganos importantes para la homeostasis. El contenido de agua de la sangre se regula con la hormona antidiurética (ADH) que se produce en el hipotálamo y es liberada por la glándula hipófisis posterior. La deshidratación estimula la liberación de ADH, que aumenta la absorción de agua a la sangre a través del túbulo distal y el conducto colector. Los riñones también controlan el pH de la sangre, eliminan sustancias tóxicas y regulan los iones como sodio, cloruro, potasio y sulfato. Los riñones excretan el exceso de glucosa, vitaminas y aminoácidos.

Los riñones también secretan hormonas. La renina, liberada en respuesta a una presión arterial baja, cataliza la formación de angiotensina, la cual constriñe las arteriolas y eleva la presión arterial. La eritropoyetina, liberada cuando el contenido de oxígeno de la sangre disminuye, estimula a la médula ósea para que produzca glóbulos rojos.

Los riñones de los mamíferos están adaptados a los ambientes en los que viven. Animales como los castores, que viven en lugares donde el agua abunda, tienen asas de Henle cortas y producen orina diluida, mientras que los animales del desierto presentan asas de Henle muy largas y producen orina sumamente concentrada.



## TÉRMINOS CLAVE

ácido úrico <i>pág. 710</i>	filtración <i>pág. 712</i>	nefrona <i>pág. 710</i>	secreción tubular <i>pág. 713</i>
amoníaco <i>pág. 709</i>	filtrado <i>pág. 712</i>	nefrostoma <i>pág. 709</i>	sistema urinario <i>pág. 708</i>
angiotensina <i>pág. 715</i>	glomérulo <i>pág. 711</i>	orina <i>pág. 709</i>	túbulo <i>pág. 711</i>
arteria renal <i>pág. 710</i>	hemodiálisis <i>pág. 714</i>	osmolaridad <i>pág. 708</i>	túbulos de Malpighi <i>pág. 709</i>
asa de Henle <i>pág. 714</i>	homeostasis <i>pág. 708</i>	osmorregulación <i>pág. 716</i>	urea <i>pág. 710</i>
cápsula de Bowman <i>pág. 711</i>	hormona antidiurética (ADH) <i>pág. 715</i>	pelvis renal <i>pág. 710</i>	uréter <i>pág. 710</i>
conducto colector <i>pág. 711</i>	líquido intersticial <i>pág. 708</i>	protonefridio <i>pág. 708</i>	uretra <i>pág. 710</i>
corteza renal <i>pág. 710</i>	médula renal <i>pág. 710</i>	reabsorción tubular <i>pág. 712</i>	vejiga <i>pág. 710</i>
eritropoyetina <i>pág. 715</i>	nefridio <i>pág. 709</i>	renina <i>pág. 715</i>	vena renal <i>pág. 710</i>
excreción <i>pág. 708</i>	nefridioporo <i>pág. 709</i>	riñón <i>pág. 709</i>	

## RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. Explica las dos funciones principales de los sistemas urinarios.
2. Describe la trayectoria de una molécula de urea en el cuerpo de un mamífero, comenzando con una molécula de amoníaco en el torrente sanguíneo hasta que sale del cuerpo.
3. ¿Qué función desempeña el asa de Henle? ¿El conducto colector? ¿La hormona antidiurética?
4. Describe y compara los procesos de filtración, reabsorción tubular y secreción tubular.
5. Describe el papel de los riñones como órganos de homeostasis.
6. Compara y contrasta los sistemas excretores del ser humano, la lombriz de tierra y los platelmintos. ¿En qué aspectos generales son similares? ¿En qué difieren?

## APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. Comenta las diferencias en función de los dos principales lechos de capilares de los riñones: los capilares glomerulares y los que rodean a los túbulos.
2. Explica por qué una ballena tiene nefronas con asas de Henle largas. ¿Qué esperarías acerca de las asas de Henle en una foca? ¿Y de una nutria de río?
3. Algunas dietas para “bajar rápidamente de peso” requieren la ingestión de alimentos ricos en proteínas y bajos en carbohidratos; además requieren que la persona que se somete a ellas beba más agua de la habitual. Explica por qué es importante esta agua adicional.
4. En su poema “La rima del viejo marinero”, Samuel Taylor Coleridge escribió: “Agua, agua por doquier y ni una gota para beber”. El agua de mar tiene más de cuatro veces la osmolaridad de la sangre. ¿Por qué una persona no puede evitar la muerte por sed tomando agua de mar?

## PARA MAYOR INFORMACIÓN

Graham-Rowe, D. “Army Rations Rehydrated with Urine”. *New Scientist*, 21 de julio de 2004. Una ración con un filtro especial permitirá a los soldados rehidratar la comida con agua lodosa o incluso con orina en una emergencia.

Khamsi, R. “Bio-engineered Bladders Successful in Patients”. *New Scientist*, 4 de abril de 2006. Las células del propio paciente, cultivadas en un

molde biodegradable, pueden utilizarse para reemplazar una vejiga que funciona de manera deficiente.

Seppa, N. “Homegrown Defender”. *New Scientist*, 10 de junio de 2006. Los científicos descubrieron un péptido que defiende el tracto urinario de las infecciones.

## 36

Defensas contra  
la enfermedad

Un estornudo arroja miles de gotitas microscópicas de la nariz y la boca con una rapidez de ¡320 kilómetros por hora! En un simple estornudo se liberan unas 100,000 bacterias; los virus también se esparcen de esta manera.

## DE UN VISTAZO

### ESTUDIO DE CASO: Lucha contra la gripe

#### 36.1 ¿Cuáles son los mecanismos de defensa básicos contra la enfermedad?

Los vertebrados tienen tres principales líneas de defensa  
Los invertebrados poseen las dos primeras líneas de defensa

#### 36.2 ¿Cómo funcionan las defensas no específicas?

La piel y las membranas mucosas forman barreras externas contra la invasión  
Defensas internas no específicas combaten a los microbios

#### 36.3 ¿Qué características clave tiene la respuesta inmunitaria?

Las células del sistema inmunitario reconocen al invasor  
Las células del sistema inmunitario lanzan un ataque  
Las células del sistema inmunitario recuerdan sus victorias anteriores

#### 36.4 ¿Cómo logra la atención médica mejorar la respuesta inmunitaria?

Las vacunas estimulan el desarrollo de células de memoria

Investigación científica: El descubrimiento de las vacunas  
Los antibióticos frenan la reproducción microbiana

#### 36.5 ¿Qué sucede cuando el sistema inmunitario no funciona correctamente?

Las alergias son respuestas inmunitarias mal dirigidas

Guardián de la salud: El combate a la influenza:  
¿Es inminente una pandemia de gripe aviar?

Una enfermedad autoinmune es una respuesta inmunitaria contra las moléculas del propio cuerpo

Una enfermedad de deficiencia inmunitaria incapacita al sistema inmunitario

El cáncer puede evadir o abatir la respuesta inmunitaria

### OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Lucha contra la gripe



## ESTUDIO DE CASO LUCHA CONTRA LA GRIPE

¿ALGUNA VEZ TE HA PASADO que estando en clase, la compañera de al lado estornuda estrepitosamente? Al tomar aire para decirle: "Salud", tú inhalas sin querer miles de gotitas microscópicas cargadas de "gérmenes", que pueden ser virus del resfriado común, virus de la gripe y bacterias de la floreciente población que vive en la nariz y la boca de todos nosotros. Los síntomas de un resfriado y de algunos tipos de gripe —estornudos, tos y flujo nasal— son ideales para diseminar estos microorganismos. De hecho, la selección natural favorece a los vi-

rus que causan síntomas que les ayudan a propagarse a otras víctimas.

Después de clase, la compañera que estornudó admite que se ha estado sintiendo "con el cuerpo cortado" y con fiebre. De acuerdo con tus experiencias pasadas con síntomas similares, le aconsejas que se vaya a su casa, que tome aspirina y se recueste. Te das cuenta de que el estornudo de tu compañera pudo haberte expuesto al mismo virus que causó su enfermedad. Al recordar la fuerte gripe que tuviste el año pasado, deseas fervientemente estar inmu-

nizado. ¿Deberías ir de inmediato a que te apliquen una inyección contra la gripe? ¿Acaso tendrá gripe aviar de la que tanto se habla? Si es así, ¿cuáles son sus síntomas? ¿Cuál es la probabilidad de que alguien en tu grupo la tenga? ¿Existe alguna vacuna activa para esa enfermedad? ¿Tu sugerencia de que se tomara una aspirina fue un buen consejo? ¿Cómo reaccionará tu cuerpo ante todos los microbios que inhalaste sin querer?

# Control químico del organismo animal: El sistema endocrino



En el "juego" del uso y la detección de drogas, el profesor Catlin compite con algunos de los mejores atletas del mundo. En ocasiones se frustra por esta continua batalla y por la deshonra que representa para los deportes el comportamiento de algunos atletas defraudadores. (Imagen en recuadro) Melissa Price celebra un lanzamiento de martillo que le valió el triunfo.

### ESTUDIO DE CASO: Perder por el uso de hormonas artificiales

#### 37.1 ¿Cómo se comunican las células animales?

#### 37.2 ¿Qué características tienen las hormonas animales?

- Las hormonas locales se difunden hacia las células blanco adyacentes
- El torrente sanguíneo transporta las hormonas del sistema endocrino
- Las hormonas se unen a receptores específicos en las células blanco
- Mecanismos de retroalimentación regulan la liberación de hormonas
- Las hormonas endocrinas de vertebrados e invertebrados tienen asombrosas similitudes

#### 37.3 ¿Qué estructuras y hormonas constituyen el sistema endocrino de los mamíferos?

- Los mamíferos tienen glándulas tanto exocrinas como endocrinas

El hipotálamo controla las secreciones de la glándula hipófisis (pituitaria)

Las glándulas tiroideas y paratiroides influyen en el metabolismo y en los niveles de calcio

El páncreas es una glándula tanto exocrina como endocrina

Los órganos sexuales secretan hormonas esteroides

Las glándulas suprarrenales tienen dos partes que secretan hormonas distintas

#### Guardián de la Tierra: Engaño endocrino

Otras fuentes de hormonas comprenden la glándula pineal, el timo, los riñones, el corazón, el tracto digestivo y las células grasas

#### Enlaces con la vida: Más cerca de la cura de la diabetes

#### Conexiones evolutivas: La evolución de las hormonas

### OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Perder por el uso de hormonas artificiales



## ESTUDIO DE CASO

### PERDER POR EL USO DE HORMONAS ARTIFICIALES

ERA EL VERANO DE 2003 cuando los oficiales de la Agencia Antidoping de Estados Unidos recibieron una información anónima. El informante, ahora identificado como un entrenador de pista y campo bien conocido, afirmaba que atletas profesionales estaban usando un esteroide que escapaba a las pruebas de detección. Como evidencia, el informante envió por correo una jeringa usada que aún contenía residuos de la sustancia. Los oficiales pidieron al doctor Don Catlin y a su equipo de científicos del Laboratorio Olímpico de Análisis de la UCLA que la identificaran.

En un edificio poco notorio, Catlin trabaja con un equipo de unas 40 personas. El laboratorio de gran renombre mundial cuenta con equipo de alta tecnología de millones de dólares que permite efectuar pruebas para más de 200 sustancias prohibidas por asociaciones atléticas. De éstas, probablemente las más notorias son los esteroides anabólicos. El término *esteroide anabólico* se utiliza para describir cualquiera de las docenas de fármacos que mejoran el rendimiento y cuya composición química se

asemeja a la de la hormona masculina testosterona. Los físico-constructivistas a menudo los consumen, y se ha descubierto que algunos atletas profesionales y olímpicos los utilizan ilegalmente. El rastro químico que dejan en el cuerpo se detecta en la orina incluso meses después de que una persona ha dejado de usarlos.

El profesor Catlin junto con su equipo de químicos, se dio a la tarea de analizar la pequeña cantidad de sustancia que pudo obtenerse al enjuagar la jeringa y así determinar su fórmula química. Con base en su estructura, Catlin la llamó tetrahidrogestrona o THG. La molécula era nueva para la ciencia, lo que probó que la creación de versiones de testosterona sintética que escapan a la detección es un negocio suficientemente grande como para comprometer los esfuerzos de químicos calificados. Esto también hace pensar que es muy probable que se estén desarrollando más versiones de la sustancia.

La Food and Drug Administration de Estados Unidos (FDA) prohibió de inmediato la nueva sustancia. Como los oficiales con-

servan en grandes refrigeradores y durante años las muestras de orina que se analizan para las competencias atléticas importantes, pudieron recuperarlas para volver a efectuar pruebas. Los resultados fueron alarmantes. Aunque probablemente la THG sólo se fabricaba en un laboratorio de California, la sustancia había manchado al fútbol y béisbol profesionales, al igual que a las competencias de pista y campo. Por ejemplo, la lanzadora de martillo Melissa Price (imagen en recuadro) dio resultado positivo para la THG después de ganar el Campeonato de Estados Unidos en 2003. Aunque la deportista niega haber utilizado THG, ella y otros atletas fueron despojados de sus títulos y se les prohibió participar en competencias durante dos años con base en los resultados de las pruebas de orina realizadas por Catlin.

Conforme leas este capítulo, observa los diferentes efectos que una misma hormona puede tener en el cuerpo. ¿Cuáles son los efectos de tomar esteroides anabólicos? ¿Existen riesgos de salud asociados con su uso?

### 37.1 ¿CÓMO SE COMUNICAN LAS CÉLULAS ANIMALES?

En todos los organismos multicelulares, las células individuales deben permanecer en continua comunicación entre sí (tabla 37-1). En algunos tejidos especializados, como el músculo cardíaco, las *uniones abiertas* unen directamente el interior de las células, lo que permite que fluyan los iones y las señales eléctricas. Más comúnmente, las células liberan moléculas que transmiten señales químicas y a las que se conoce como “moléculas mensajeras” que afectan otras células, ya sea adyacentes o distantes. Al igual que sucede en una conversación en una fiesta concurrida, esta comunicación se dirige hacia células “blanco” específicas (en la analogía anterior, las personas con las que platicas) y no a otras (los invitados que, aunque están cerca, sostienen sus propias conversaciones). Para asegurarse de que el mensaje químico llega a los blancos apropiados, las células tienen **receptores**, es decir, moléculas proteicas especializadas que se unen sólo con mensajeros químicos específicos. Los receptores pueden estar localizados ya sea en la membrana plasmática o en el interior de las células blanco. Al unirse con su receptor, la sustancia química activa un tipo de cambio dentro de la célula blanco.

Existen tres clases de moléculas mensajeras, cada una de las cuales utiliza un sistema de distribución diferente: las *hormonas locales* se difunden a través del líquido intersticial a las células más cercanas; las *hormonas endocrinas* se liberan en la sangre, la cual se encarga de distribuir las tanto a células circunvecinas como distantes; y los *neurotransmisores* que se liberan a través de una abertura muy estrecha (la *hendidura sináptica*) entre una región especializada de una neurona y su blanco (véase la tabla 37-1). Este capítulo se ocupa de las hormonas endocrinas y locales llamadas *prostaglandinas*. Aprenderás más acerca de los neurotransmisores en el capítulo 38.

### 37.2 ¿QUÉ CARACTERÍSTICAS TIENEN LAS HORMONAS ANIMALES?

#### Las hormonas locales se difunden hacia las células blanco adyacentes

La mayoría de las células secretan **hormonas locales** hacia sus inmediaciones; por ejemplo, las citocinas descritas en el capítulo


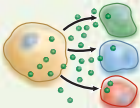
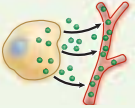

36 permiten que las células inmunitarias se comuniquen. Las **prostaglandinas**, ácidos grasos modificados que se sintetizan a partir de los fosfolípidos de las membranas, son otro tipo de hormonas locales (véase más adelante la tabla 37-2). A diferencia de casi todas las demás hormonas, que son sintetizadas por un limitado número de células especializadas, las prostaglandinas son producidas por células de todo el cuerpo. La investigación sobre este grupo diverso y potente de compuestos aún se encuentra en sus etapas iniciales; sólo se conocen algunas prostaglandinas y muchas más aún están en espera de ser descubiertas. Los investigadores descubrieron una prostaglandina que causa constricción de las arterias en el cordón umbilical durante el nacimiento, de manera que el sangrado se detiene. Otra prostaglandina trabaja en conjunción con la oxitocina durante el parto para estimular las contracciones uterinas. Algunas prostaglandinas contribuyen a la inflamación (como ocurre en las articulaciones con artritis) y estimulan a los receptores del dolor. Medicamentos como la aspirina y el ibuprofeno brindan alivio a estos síntomas al bloquear las enzimas que conducen a la síntesis de prostaglandinas. El uso de hormonas locales como las prostaglandinas para comunicarse con células circunvecinas se llama *comunicación paracrina* (el prefijo “para” significa “junto”), mientras que la *comunicación endocrina* (“endo” significa “interno”) utiliza químicos que viajan por el torrente sanguíneo, a menudo considerables distancias.

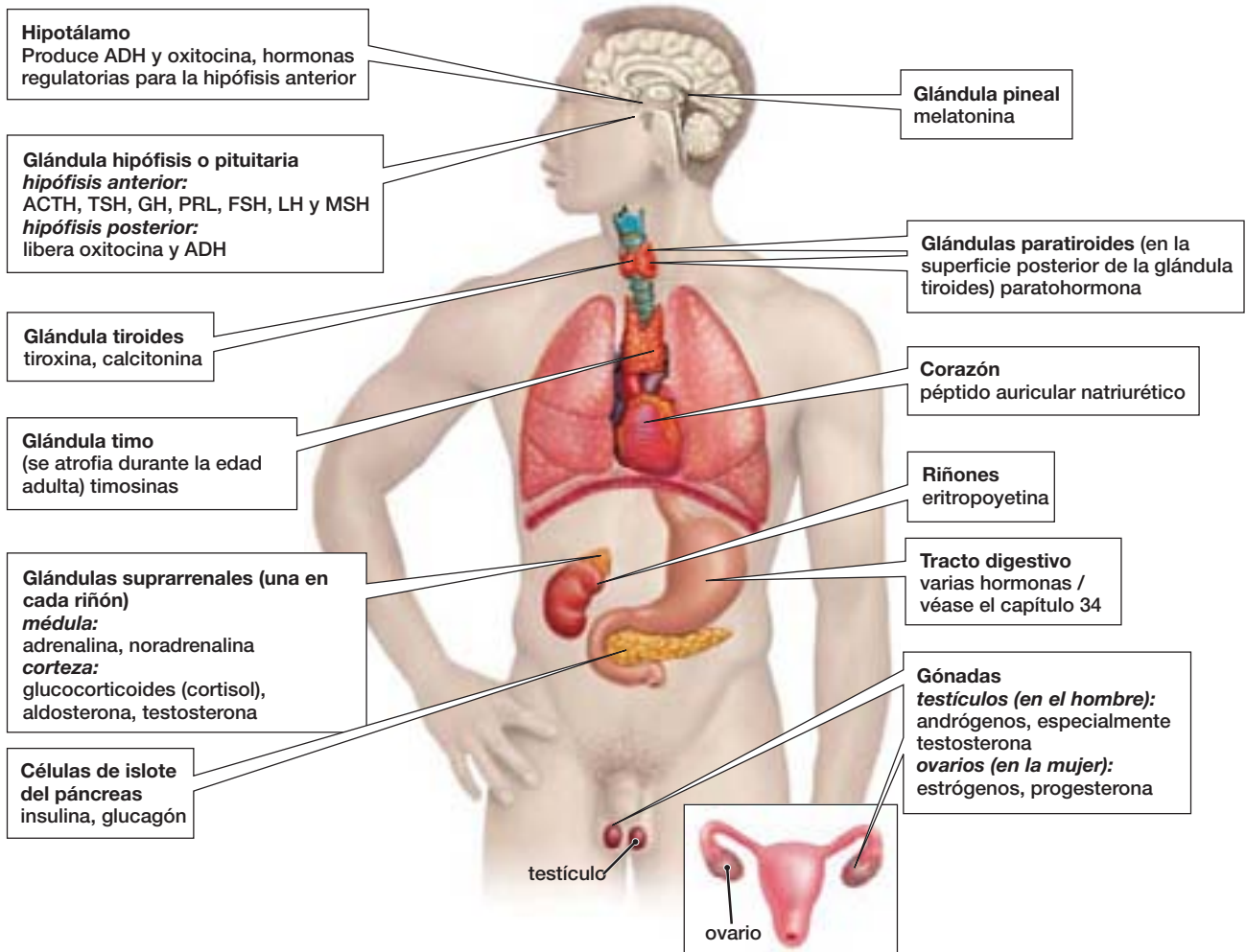
#### El torrente sanguíneo transporta las hormonas del sistema endocrino

Las **hormonas endocrinas** son mensajes químicos producidos por células especializadas; a menudo se liberan en respuesta a algunos estímulos provenientes del interior o del exterior del cuerpo. Hay tres clases de hormonas endocrinas en los vertebrados (tabla 37-2): **hormonas peptídicas**, formadas de cadenas de aminoácidos; **hormonas derivadas de aminoácidos**, las cuales se sintetizan a partir de uno o dos aminoácidos; y **hormonas esteroideas**, que se parecen al colesterol, a partir del cual se sintetizan casi todas las hormonas esteroideas.

El sistema endocrino transporta las hormonas endocrinas, las cuales influyen en células blanco que llevan receptores específicos para ellas. Los cambios inducidos por los mensajes

Tabla 37-1 Cómo se comunican las células

Comunicación	Mensajeros químicos	Mecanismo de transmisión	Ejemplos
<b>Directa</b> 	Iones, moléculas pequeñas	Movimiento directo a través de uniones abiertas que vinculan el citosol de células adyacentes	Iones que fluyen entre las células del músculo cardíaco
<b>Paracrina</b> 	Hormonas locales	Difusión a través del líquido intersticial a las células circunvecinas que llevan receptores	Prostaglandinas
<b>Endocrina</b> 	Hormonas	Se transportan en el torrente sanguíneo a células cercanas o distantes que llevan consigo receptores	Insulina
<b>Sináptica</b> 	Neurotransmisores	Difusión de una neurona a través de un espacio estrecho (hendidura sináptica) a una célula que porta receptores	Acetilcolina



**FIGURA 37-1** Principales glándulas endocrinas de los mamíferos y sus secreciones

hormonales pueden ser duraderos e irreversibles, como los que ocurren en la pubertad, o durante la metamorfosis de un renacuajo a una rana, o de una oruga a una mariposa. Lo más común es que los cambios inducidos sean transitorios y reversibles y ayuden a controlar y regular los sistemas fisiológicos que constituyen el cuerpo animal. La regulación del cuerpo requiere comunicación; en el organismo animal, las hormonas se encargan de buena parte de esa comunicación. De hecho, podría decirse que el **sistema endocrino** (que consiste en las hormonas y las diversas células que las secretan y reciben) es el “servicio postal de la fisiología”, pues lleva información e instrucciones entre células que están a cierta distancia unas de otras. Las principales glándulas endocrinas de los mamíferos se ilustran en el cuerpo humano de la **FIGURA 37-1**.

### Las hormonas se unen a receptores específicos en las células blanco

amente sobre ciertas **células blanco**, las cuales tienen receptores para moléculas hormonales específicas; las células que carecen de los receptores apropiados no responden al mensaje hormonal (**FIGURA 37-2**). Además, una hormona determinada podría tener varios efectos distintos, dependiendo de la naturaleza del receptor en la célula blanco con la que entra en contacto. Los receptores hormonales se encuentran en dos lugares generales de las células blanco: en la membrana plasmática y en el interior de la célula, dentro del citosol o del núcleo.

Muchas hormonas derivadas de péptidos y aminoácidos son solubles en agua, pero no en lípidos. Por ello, tales hormonas no pueden penetrar la bicapa fosfolipídica de la membrana plasmática. En vez de ello, la mayoría de estas hormonas se unen a los receptores en la membrana plasmática de la célula blanco (**FIGURA 37-3**). Estos *receptores de membrana* son grandes proteínas que se extienden de un lado a otro de la membrana plasmática, por lo que una hormona que se une a la porción exterior del receptor puede hacer que cambie de forma la parte de esa proteína que penetra en la célula. Esta transformación física desencadena reacciones (comenzando

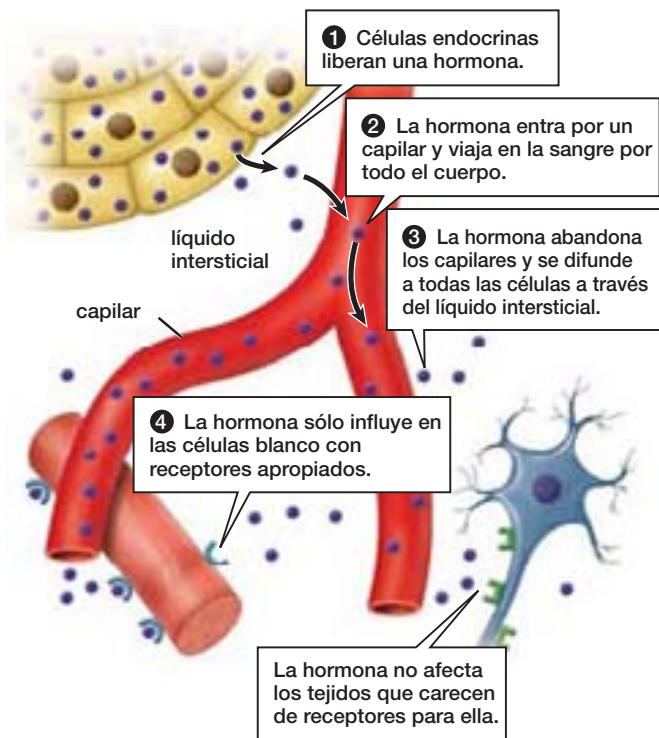


FIGURA 37-2 Una hormona llega a su destino

con una molécula llamada *proteína G* asociada con el receptor) que generan una molécula, la cual constituye un **segundo mensajero** dentro de la célula. El segundo mensajero transfiere la señal del primer mensajero (la hormona) a otras moléculas dentro de la célula, a menudo iniciando una serie de reacciones bioquímicas (véase la figura 37-3). Aunque una variedad de moléculas pueden actuar como segundos mensajeros, en muchos casos, la unión entre las hormonas y los receptores hace que el ATP se convierta en **AMP cíclico** (*cAMP*), un nucleótido que regula muchas actividades celulares (véase el capítulo 3). El AMP cíclico actúa como segundo mensajero e inicia una cadena de reacciones dentro de la célula. En cada reacción de la cadena interviene un número cada vez mayor de moléculas, lo que amplifica la señal original. El resultado final varía dependiendo de la célula blanco: se podrían abrir canales en la membrana plasmática, o se podrían sintetizar o secretar sustancias. Por ejemplo, la hormona *adrenalina* (también llamada *epinefrina*) se une a receptores de membrana del músculo cardíaco, activa la formación de *cAMP* e inicia una serie de sucesos moleculares que provocan contracciones más fuertes en el músculo cardíaco. Ésta es una de varias formas en que la adrenalina ayuda al cuerpo a prepararse para situaciones de emergencia, como veremos más adelante en este capítulo.

En contraste, las hormonas esteroideas son solubles en lípidos y, por lo tanto, pueden difundirse a través de las membranas celulares y unirse a los receptores dentro de la célula, ya sea en el citosol o en el núcleo. Una vez dentro de una hormona esteroide, estos receptores actúan regulando la actividad de los genes. Algunos receptores de hormonas esteroideas están en el núcleo; otros esperan en el citosol, donde se unen a la hormona y la transportan al interior del núcleo. Una vez en el núcleo, el complejo receptor-hormona se une al DNA y estimula genes específicos para que transcriban RNA mensajero, el cual se desplaza al citosol y dirige la síntesis de una

Tabla 37-2 La diversidad química de las hormonas de los vertebrados

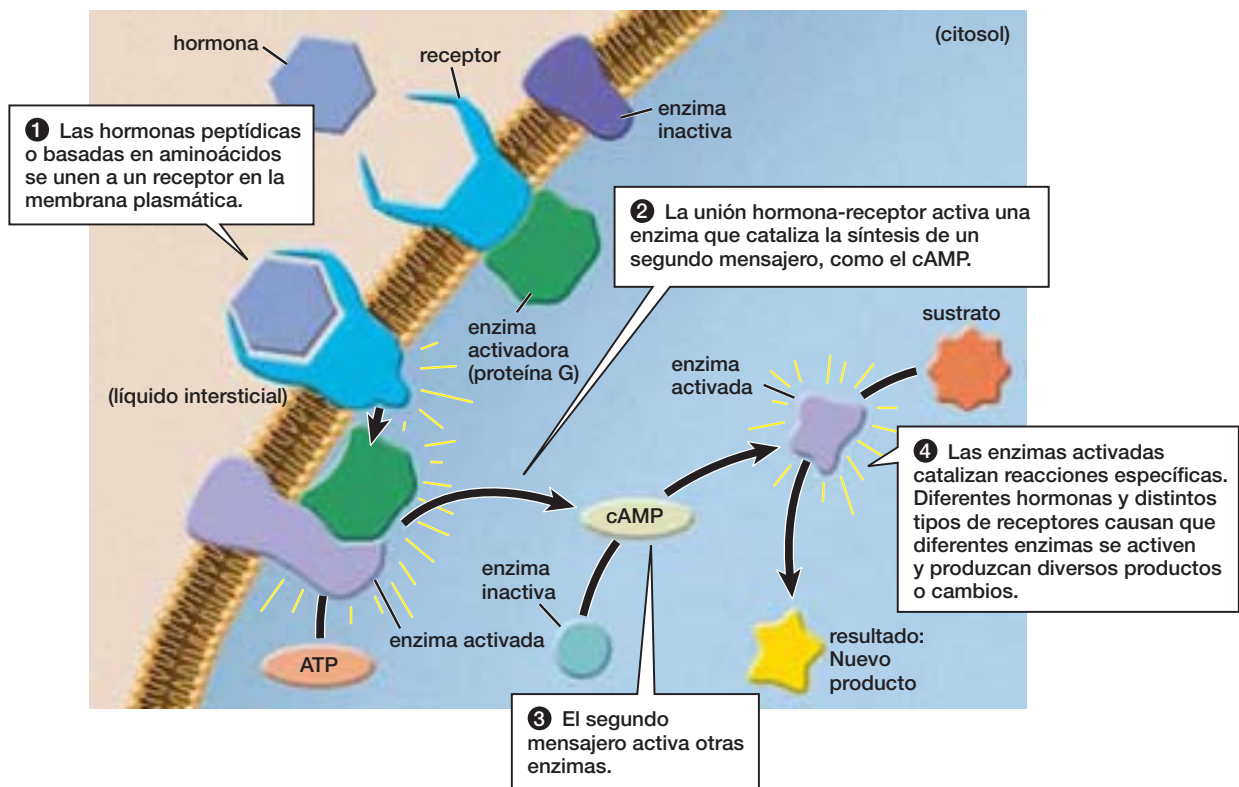
Tipo de compuesto	Ejemplos
Derivados de los aminoácidos (sintetizados a partir de uno o dos aminoácidos)	<b>noradrenalina</b> <chem>Oc1ccc(O)cc1C(O)CN</chem>
	<b>tiroxina</b> <chem>NC(Cc1cc(I)cc(Oc2cc(I)cc(I)c2)c1)C(=O)O</chem>
Péptidos y proteínas (sintetizados a partir de múltiples aminoácidos)	<b>oxitocina</b> 
	<b>testosterona</b> <chem>CC12CCC3=C1C(=O)CC4=CC(=O)CC34C2</chem>
Esteroides (sintetizados a partir del colesterol)	<b>estrógeno</b> <chem>CC12CCC3=C1C(=O)CC4=CC(=O)C=C34C2</chem>
	<b>prostaglandina E<sub>1</sub></b> <chem>CCCCCCCCC(O)C(O)C(=O)O</chem>
Prostaglandinas (sintetizadas a partir de ácidos grasos)	

proteína (FIGURA 37-4). Por ejemplo, en las gallinas, el estrógeno —una hormona esteroide— promueve la transcripción del gen de la albúmina que hace que se sintetice albúmina (proteína de la clara de huevo), la cual se incluye en el huevo para alimentar al pollito en desarrollo. Las hormonas esteroideas podrían tardar minutos o incluso días en ejercer plenamente sus efectos. Algunos investigadores también han encontrado receptores para hormonas esteroideas en la membrana plasmática; estos receptores confieren gran versatilidad a los esteroideos en cuanto a sus mecanismos de transmisión de señales.

### Mecanismos de retroalimentación regulan la liberación de hormonas

Para que una hormona sirva como control fisiológico, debe haber alguna forma de activar y apagar su mensaje. En los animales, el “interruptor” generalmente implica una retroalimentación negativa: la secreción de una hormona estimula una respuesta en las células blanco y esa respuesta inhibe la secreción ulterior de la hormona. Casi todas las hormonas ejercen efectos tan potentes sobre el cuerpo que serían perjudiciales si actuaran durante demasiado tiempo; por ello, el

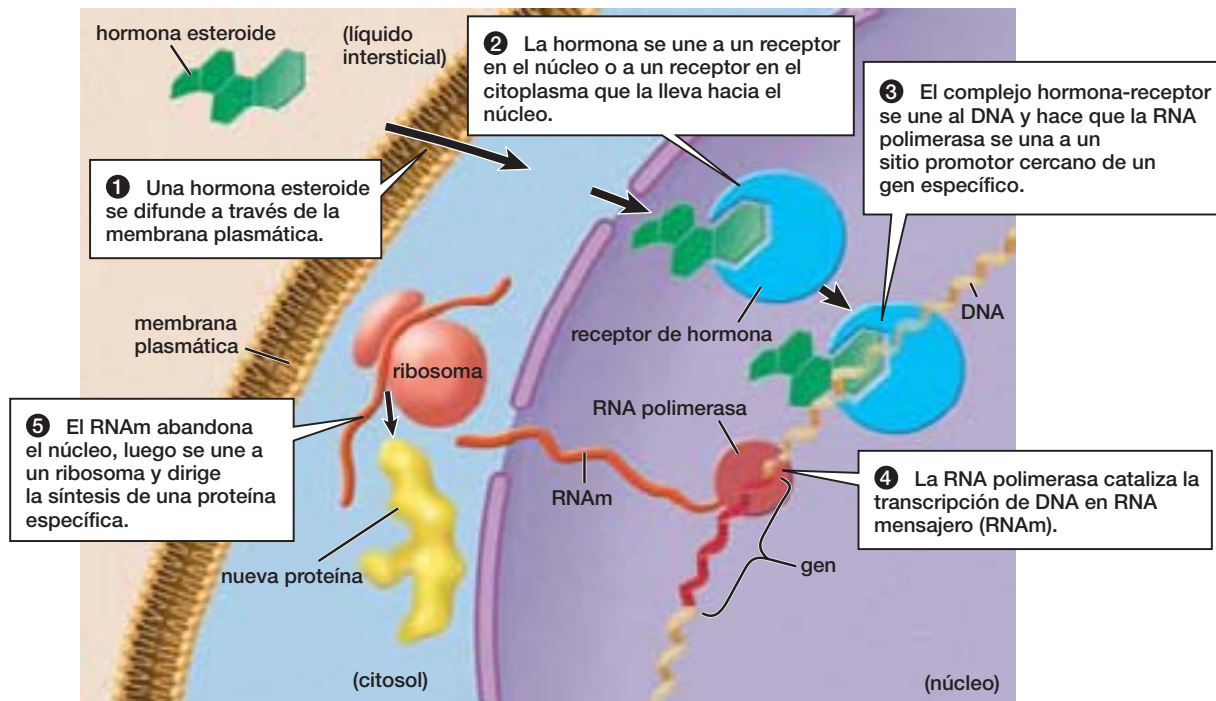




**FIGURA 37-3** Cómo influyen las hormonas derivadas de péptidos o aminoácidos en las células blanco

control de la liberación hormonal mediante retroalimentación negativa tiene importancia especial. Supongamos que una persona acaba de trotar varios kilómetros en un día soleado y caluroso y perdió medio litro de agua por la transpiración. Como respuesta, la glándula hipófisis libera *hormona antidiurética* (ADH), la cual hace que los riñones reabsorban más agua y produzcan orina muy concentrada (véase el capí-

tulo 35). Pero si esta persona llega a casa y bebe un litro de Gatorade®, repondrá con creces el agua que perdió al sudar. La retención continuada de esta agua en exceso podría elevar la presión arterial y posiblemente dañar al corazón. La retroalimentación negativa hace que la secreción de ADH se suspenda cuando el contenido de agua de la sangre regresa a la normalidad, lo que permite que los riñones comiencen a eli-



**FIGURA 37-4** Hormonas esteroideas que influyen en las células blanco

minar el agua excedente. Busca más ejemplos de retroalimentación negativa mientras lees el capítulo.

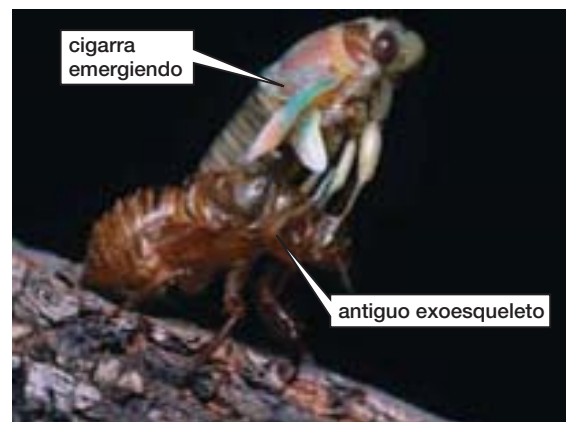
En unos cuantos casos, la liberación de una hormona se controla por retroalimentación positiva, al menos por un breve lapso. Por ejemplo, como vimos en el capítulo 31, las contracciones del útero al principio del parto hacen que el cuello de la matriz se distienda y que la hipófisis posterior libere la hormona **oxitocina**, la cual, a la vez, estimula contracciones más fuertes del útero, lo que provoca que se libere más oxitocina, creando un ciclo de retroalimentación positiva. De manera simultánea, la oxitocina hace que las células del útero liberen prostaglandinas, que intensifican aún más las contracciones uterinas. Este mecanismo es otro ejemplo de retroalimentación positiva. Pero los sistemas de retroalimentación positiva deben producir retroalimentación negativa que limite su duración. En este caso, las contracciones del útero hacen que el bebé nazca, lo que pone fin al estiramiento del cuello de la matriz y detiene el ciclo de retroalimentación positiva que propició e intensificó las contracciones uterinas.

### Las hormonas endocrinas de vertebrados e invertebrados tienen asombrosas similitudes

Aunque los invertebrados constituyen aproximadamente el 95 por ciento de todas las especies sobre la Tierra, sus hormonas no se conocen tan bien como las de los vertebrados. Una razón es que los ciclos de vida de los invertebrados y, por consiguiente, las hormonas que los regulan son mucho más diversos que los de los vertebrados. Sin embargo, los investigadores descubrieron que los invertebrados tienen tanto hormonas peptídicas como esteroides que utilizan los mecanismos de comunicación básica descritos con anterioridad. Por ejemplo, los científicos encontraron estrógeno y testosterona en los caracoles; al parecer, estas hormonas regulan la diferenciación sexual conforme los animales se desarrollan, al igual que en los seres humanos. Esto hace de los caracoles un blanco para los contaminantes conocidos como perturbadores endocrinos, como se describe en “Guardián de la Tierra: Engaño endocrino”.

### Una hormona esteroide controla el proceso de muda en los insectos

Las hormonas de los insectos se han estudiado relativamente a profundidad por su potencial uso en el control de las plagas. Los insectos tienen un esqueleto externo que les sirve de sostén y que está compuesto de cutícula inerte y rígida que deben mudar periódicamente para poder crecer. La muda es controlada por la hormona esteroide **ecdisona**, a menudo conocida como la *hormona de la muda*. Al igual que muchas hormonas esteroides de los vertebrados, la ecdisona actúa sobre los receptores localizados dentro del núcleo y afecta la transcripción de genes. A medida que la antigua cutícula se vuelve más apretada, células sensoriales estimulan la liberación de una hormona que, a la vez, estimula la secreción de ecdisona. Como ocurre con las hormonas de los vertebrados, la ecdisona afecta las células en todo el cuerpo del insecto. De esta forma se inicia un complejo proceso en el que las células epiteliales se desprenden de la antigua cutícula y secretan cutícula nueva y suave debajo de la anterior. El insecto expande su cuerpo llenándose de aire. Esto abre la antigua cutícula y extiende la nueva para dar espacio al crecimiento ulterior. Conforme el insecto emerge, deja atrás la cutícula con la forma de su cuerpo ( ). Los investigadores han apro-



**FIGURA 37-5** Insecto en proceso de muda  
Una pálida cigarra emerge de su escudo de cutícula.

vechado su conocimiento de este proceso para elaborar pesticidas que son selectivos para los insectos y bastante menos tóxicos para los vertebrados que muchos de los venenos que comúnmente se riegan en los cultivos. Estos nuevos insecticidas se unen de forma permanente a los receptores de ecdisona, estimulándolos y haciendo que los insectos larvarios muden de exoesqueleto prematuramente y mueran.

## 37.3 ¿QUÉ ESTRUCTURAS Y HORMONAS CONSTITUYEN EL SISTEMA ENDOCRINO DE LOS MAMÍFEROS?

Los endocrinólogos no saben cabalmente cómo funcionan las hormonas animales. Casi cada año se descubren nuevas hormonas, así como nuevas funciones de hormonas conocidas. No obstante, las funciones clave de las principales glándulas y órganos endocrinos se conocen desde hace muchos años. Aquí nos enfocaremos en las funciones endocrinas del complejo hipotálamo-hipófisis, las glándulas tiroideas y paratiroides, el páncreas, los órganos sexuales y las glándulas suprarrenales (véase la figura 37-1). En la **tabla 37-3** se mencionan éstas y otras glándulas, sus principales hormonas y sus funciones más importantes.

### Los mamíferos tienen glándulas tanto exocrinas como endocrinas

Existen dos tipos básicos de glándulas: exocrinas y endocrinas. Las **glándulas exocrinas** producen secreciones que se liberan hacia el exterior del cuerpo (“exo” significa “afuera” en griego) o en el tracto digestivo (un tubo hueco que es continuo con el mundo exterior). Las secreciones de estas glándulas se liberan a través de tubos o aberturas llamadas **conductos**. Entre las glándulas exocrinas están las glándulas sudoríparas y sebáceas (que producen aceites) de la piel, las glándulas lacrimales (que secretan lágrimas), las glándulas mamarias (que producen leche) y las glándulas que producen secreciones digestivas, como las salivales y algunas células del páncreas.

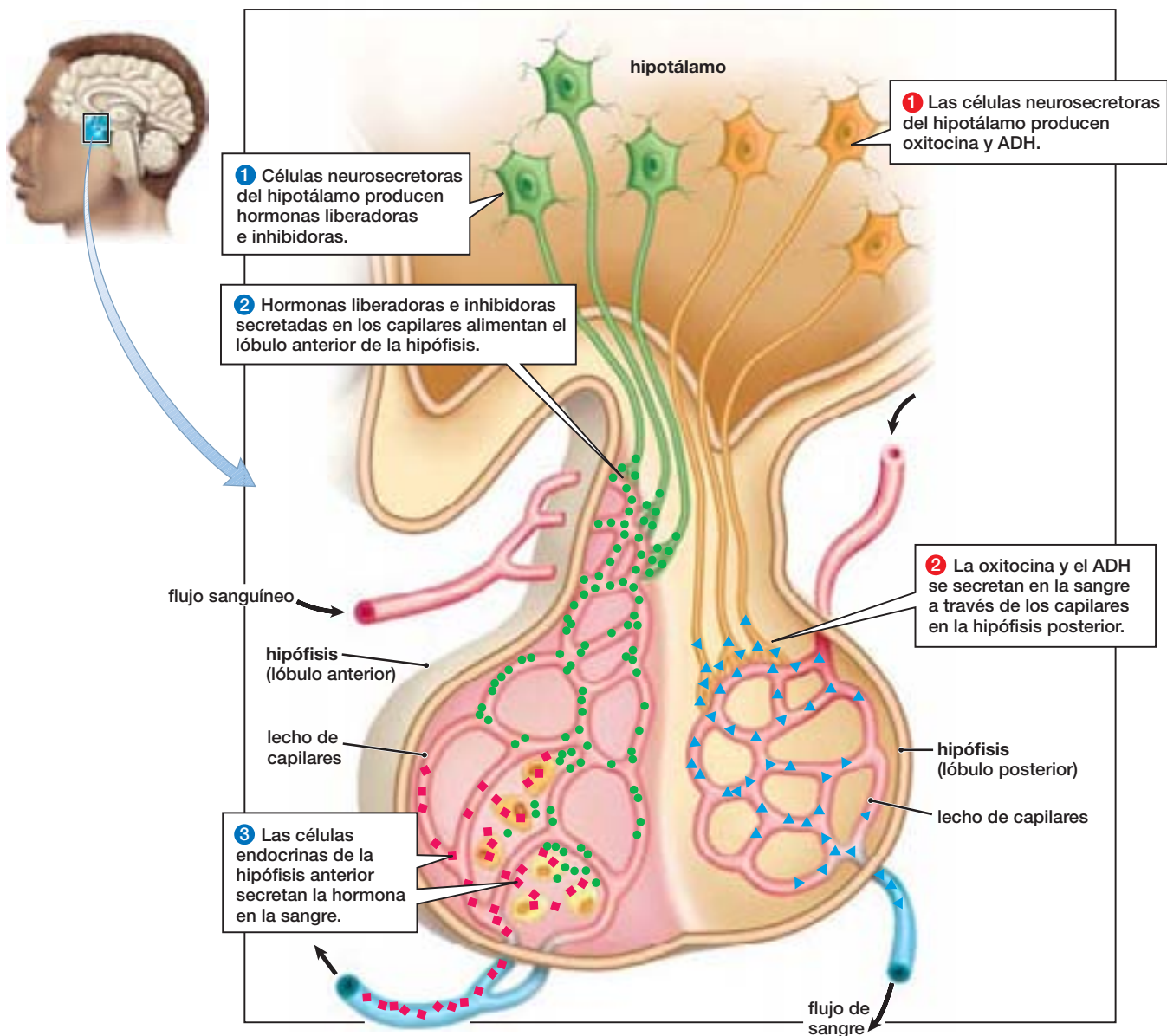
Las **glándulas endocrinas**, también llamadas *glándulas sin conductos*, liberan sus hormonas dentro del cuerpo (“endo” significa “adentro” en griego). Una glándula endocrina por lo regular consiste en cúmulos de células productoras de hormo-

**Tabla 37-3 Principales glándulas endocrinas y hormonas de los mamíferos**

Glándula endocrina	Hormona	Tipo de compuesto	Función principal
Hipotálamo (a la hipófisis anterior)	Hormonas liberadoras e inhibidoras	Péptidos	Al menos nueve hormonas; las liberadoras estimulan la liberación de hormonas de la hipófisis anterior; las inhibidoras inhiben la liberación de hormonas de la hipófisis anterior.
Hipófisis anterior	Hormona estimuladora de folículos (FSH)	Péptidos	En la <i>hembra</i> , estimula el crecimiento del folículo, la secreción de estrógeno y quizá la ovulación; en el <i>macho</i> estimula la espermatogénesis.
	Hormona luteinizante (LH)	Péptido	En la <i>hembra</i> , estimula la ovulación, el crecimiento del cuerpo lúteo y la secreción de estrógeno y progesterona; en el <i>macho</i> estimula la secreción de testosterona.
	Hormona estimuladora de la tiroides (TSH)	Péptido	Estimula a la tiroides para que libere tiroxina.
	Hormona adrenocorticotrópica (ACTH)	Péptido	Estimula a la corteza suprarrenal para que libere hormonas, especialmente glucocorticoides, como el cortisol.
	Hormona del crecimiento (GH)	Péptido	Estimula el crecimiento, la síntesis de proteínas y el metabolismo de las grasas; inhibe el metabolismo de los azúcares.
	Prolactina (PRL)	Péptido	Estimula la síntesis de leche y su secreción de las glándulas mamarias.
	Hormona estimuladora de melanocitos (MSH)	Péptido	Promueve la síntesis del pigmento marrón de la piel, la melanina.
Hipotálamo (vía la hipófisis posterior)	Hormona antidiurética (ADH)	Péptido	Promueve la reabsorción de agua de los riñones; constriñe las arteriolas.
	Oxitocina	Péptido	En la <i>hembra</i> estimula la contracción de los músculos uterinos durante el parto, la expulsión de la leche y comportamientos maternos; en el <i>macho</i> facilita la eyaculación o expulsión del semen.
Tiroides	Tiroxina	Derivado de aminoácido	Eleva la tasa metabólica de la mayor parte de las células del cuerpo; eleva la temperatura corporal; regula el crecimiento y el desarrollo.
Paratiroides	Paratohormona	Péptido	Estimula la liberación de calcio de los huesos; promueve la absorción de calcio en los intestinos y la reabsorción de calcio en los riñones.
Páncreas	Insulina	Péptido	Reduce los niveles de glucosa en la sangre, aumentando la absorción de glucosa por las células y su conversión a glucógeno, sobre todo en el hígado; regula el metabolismo de las grasas.
	Glucagón	Péptido	Convierte glucógeno en glucosa, lo que eleva los niveles de glucosa en la sangre.
Ovarios <sup>a</sup>	Estrógeno	Esteroides	Causa el desarrollo de las características sexuales femeninas secundarias y la maduración de los óvulos; promueve el crecimiento del revestimiento uterino.
	Progesterona	Esteroides	Estimula el desarrollo del revestimiento uterino y la formación de la placenta.
Testículos <sup>a</sup>	Testosterona	Esteroides	Estimula el desarrollo de los genitales y las características sexuales secundarias del macho; estimula la espermatogénesis.
Médula suprarrenal	Adrenalina (epinefrina) y noradrenalina (norepinefrina)	Derivados de aminoácidos	Eleva los niveles de azúcar y ácidos grasos en la sangre; eleva la tasa metabólica; aumenta el ritmo y la intensidad de las contracciones del corazón; constriñe algunos vasos sanguíneos.
Corteza suprarrenal	Glucocorticoides (cortisol)	Esteroides	Eleva el azúcar en la sangre; regula el metabolismo de azúcares y grasas; efectos antiinflamatorios.
	Aldosterona	Esteroides	Aumenta la reabsorción de sal en los riñones.
	Testosterona	Esteroides	Causa masculinización de las partes del cuerpo; influye en el crecimiento.
<b>Otras fuentes de hormonas</b>			
Glándula pineal	Melatonina	Derivado de aminoácido	Regula los ciclos reproductivos estacionales y los ciclos de sueño-vigilia; podría regular la aparición de la pubertad.
Timo	Timosina	Péptido	Estimula la maduración de células del sistema inmunitario.
Riñón	Renina	Péptido	Actúa sobre proteínas de la sangre para producir una hormona (angiotensina) que regula la presión arterial.
	Eritropoyetina	Péptido	Estimula la síntesis de glóbulos rojos en la médula ósea.
Corazón	Péptido auricular natriurético (ANP)	Péptido	Incrementa la excreción de sal y agua por los riñones; reduce la presión arterial.
Tracto digestivo <sup>b</sup>	Secretina, gastrina, colecistocinina y otras	Péptidos	Controlan la secreción de moco, enzimas y sales en el tracto digestivo; regulan el peristaltismo.
Células grasas	Leptina	Péptido	Regula el apetito; estimula la función inmunitaria; promueve el crecimiento de vasos sanguíneos; es necesaria para que inicie la pubertad.

<sup>a</sup> Véase los capítulos 40 y 41.

<sup>b</sup> Véase el capítulo 34.



**FIGURA 37-6** El hipotálamo controla la hipófisis o pituitaria

Las células neurosecretoras del hipotálamo controlan la liberación de hormonas en el lóbulo anterior de la hipófisis (también llamada pituitaria) produciendo hormonas liberadoras o inhibidoras (izquierda). Estas células secretan sus hormonas a una red de capilares que las lleva a la hipófisis anterior. Ahí cada hormona estimula a las células endocrinas que poseen los receptores apropiados, pero sin afectar otros tipos de células. El lóbulo posterior de la hipófisis (derecha) es una extensión del hipotálamo, por lo que se le conoce como neurohipófisis. Las células neurosecretoras del hipotálamo tienen terminaciones en un lecho capilar del lóbulo posterior de la hipófisis, donde liberan oxitocina y hormona antidiurética (ADH). **PREGUNTA: ¿Qué ventaja se obtiene al tener células nerviosas en el hipotálamo que participan en el control de la liberación de hormonas de la hipófisis?**

nas incrustados en una red de capilares. Las células secretan sus hormonas al líquido intersticial que rodea a los capilares (véase la figura 37-2). Luego, las hormonas entran en los capilares por difusión y el torrente sanguíneo las transporta por todo el cuerpo. Nos enfocaremos en las glándulas endocrinas en el resto de este capítulo.

### El hipotálamo controla las secreciones de la glándula hipófisis

Si el sistema endocrino es el servicio postal del cuerpo, el hipotálamo es la oficina central de correos. Juntas, estas estructuras coordinan la acción de muchos sistemas de mensajes

hormonales clave. El **hipotálamo** es una parte del cerebro que contiene cúmulos de células nerviosas especializadas llamadas **células neurosecretoras**, las cuales sintetizan hormonas peptídicas, las almacenan y las liberan cuando reciben un estímulo. La **glándula hipófisis** (o pituitaria) es una glándula del tamaño de un chícharo que cuelga del hipotálamo por un tallo. La hipófisis consta de dos partes distintas: la **hipófisis anterior** (adenohipófisis) y la **hipófisis posterior** (neurohipófisis) (**FIGURA 37-6**). El hipotálamo controla la liberación de hormonas de ambas partes. La hipófisis anterior es una verdadera glándula endocrina, integrada por varios tipos de células secretoras de hormonas envueltas por una red de capilares.



a)



b)

**FIGURA 37-7** La hormona del crecimiento tiene efectos en el cuerpo

a) La insuficiencia de la hormona del crecimiento, o una falta de receptores funcionales para ella, genera un tipo de enanismo. A mediados del siglo XIX "Pulgarcito" (Charles Stratton), quien alcanzó una estatura como adulto de 84 centímetros, fue todo un éxito en el circo de Barnum y Bailey. Aquí aparece al lado de P. T. Barnum. b) Demasiada hormona del crecimiento provoca gigantismo, como en el caso de Robert Wadlow, quien alcanzó una estatura de 2.72 metros. Wadlow aparece aquí con sus dos hermanos menores, quienes no sufrieron este trastorno. **PREGUNTA: ¿Por qué el gigantismo por lo regular es más difícil de tratar que el enanismo?**

La hipófisis posterior, en cambio, consiste principalmente en una red de capilares y las terminaciones de células neurosecretoras cuyos cuerpos celulares se encuentran en el hipotálamo.

#### **Las hormonas hipotalámicas controlan a la hipófisis anterior**

Las células neurosecretoras del hipotálamo producen por lo menos nueve hormonas peptídicas que regulan la liberación de hormonas de la hipófisis anterior. Estos péptidos se denominan **hormonas liberadoras** u **hormonas inhibidoras**, dependiendo de si estimulan o evitan la liberación de hormonas de la hipófisis, respectivamente. Las hormonas liberadoras e inhibidoras se sintetizan en las células nerviosas del hipotálamo, se secretan a un lecho de capilares en el tallo que conecta el hipotálamo con la hipófisis y viajan una distancia corta a través de vasos sanguíneos a un segundo lecho de capilares que rodea las células endocrinas de la hipófisis anterior. Ahí, las hormonas liberadoras e inhibidoras salen de los capilares por difusión e influyen en la secreción de hormonas hipofisiarias.

Puesto que las hormonas liberadoras e inhibidoras se secretan muy cerca de la hipófisis anterior, se producen en muy pequeñas cantidades. Por ello, no debe extrañarnos que haya sido muy difícil aislarlas y estudiarlas. Andrew Schally y Roger Guillemin, endocrinólogos estadounidenses que compartieron el Premio Nobel de Medicina en 1977 por caracterizar varias de esas hormonas, usaron el cerebro de millones de ovejas y cerdos (obtenidos de los mataderos) para extraer una cantidad suficiente de hormona liberadora y analizarla químicamente.

#### **La hipófisis anterior produce y libera diversas hormonas**

La hipófisis anterior produce varias hormonas peptídicas. Cuatro de ellas regulan la producción de hormonas en otras glándulas endocrinas. La **hormona estimuladora del folículo (FSH)** y la **hormona luteinizante (LH)** estimulan la producción de espermatozoides y testosterona en el macho, y de óvulos, estrógeno y progesterona en la hembra. Estudiaremos los papeles de la FSH y la LH más a fondo en el capítulo 40. La **hormona**

**estimuladora de la tiroides (TSH)** estimula a la glándula tiroides para que libere sus hormonas, y la **hormona adrenocorticotrópica (ACTH)** (el nombre significa "hormona que estimula la corteza suprarrenal") hace que se libere la hormona **cortisol** de la corteza suprarrenal, como se explicará más adelante.

Las demás hormonas de la hipófisis anterior no actúan sobre otras glándulas endocrinas. La **prolactina**, junto con otras hormonas, estimula el desarrollo de las glándulas mamarias (que son glándulas exocrinas dentro de las mamas y que producen leche) durante el embarazo. La **hormona estimuladora de melanocitos (MSH)** estimula la síntesis del pigmento cutáneo melanina. La **hormona del crecimiento** regula el crecimiento del cuerpo actuando sobre casi todas sus células: incrementa la síntesis de proteínas, el aprovechamiento de las grasas y el almacenamiento de carbohidratos. A medida que un vertebrado madura, la hormona del crecimiento tiene un efecto estimulante sobre el crecimiento de los huesos, lo cual influye sobre el tamaño final del organismo adulto. Gran parte de la variación normal en la estatura humana se debe a diferencias en la secreción de hormona del crecimiento por la hipófisis anterior. Una insuficiencia de hormona del crecimiento —o receptores defectuosos para ella— causa algunos casos de **enanismo**; un exceso puede causar **gigantismo** (FIGURA 37-7). Aunque en la edad adulta muchos huesos pierden su capacidad para alargarse, se sigue secretando hormona del crecimiento durante toda la vida, pues ayuda a regular el metabolismo de proteínas, grasas y azúcares.

Un importante adelanto en el tratamiento del enanismo hipofisiario se dio cuando ciertos biólogos moleculares lograron insertar el gen de la hormona humana del crecimiento en bacterias, que produjeron grandes cantidades de la sustancia. Antes, la principal fuente comercial de hormona del crecimiento eran cadáveres humanos, de los cuales se extraían cantidades diminutas a un costo muy elevado. Gracias a la nueva fuente, más económica, muchos más niños con hipófisis poco activa, que en otros tiempos habrían sido muy bajitos, ahora pueden alcanzar una estatura normal. Por eso casi no hay fo-

tografías recientes de personas con este tipo específico de enanismo.

### La hipófisis posterior libera hormonas producidas por células del hipotálamo

La hipófisis posterior contiene las terminaciones de dos tipos de células neurosecretoras cuyo cuerpo celular está en el hipotálamo. Tales terminaciones están rodeadas por un lecho de capilares en el que liberan hormonas para ser transportadas por el torrente sanguíneo (véase la figura 37-6). Dos hormonas peptídicas se sintetizan en el hipotálamo y se liberan en la hipófisis posterior: la *hormona antidiurética (ADH)* y la *oxitocina*.

La *hormona antidiurética*, cuyo nombre significa literalmente “hormona que impide la micción”, ayuda a evitar la deshidratación. Como vimos en el capítulo 35, al aumentar la permeabilidad al agua de los conductos recolectores de las nefronas renales, la ADH hace que se reabsorba agua de la orina y se retenga en el cuerpo. Resulta interesante que el alcohol inhibe la liberación de ADH y aumenta considerablemente la producción de orina, de manera que un bebedor de cerveza en realidad podría deshidratarse.

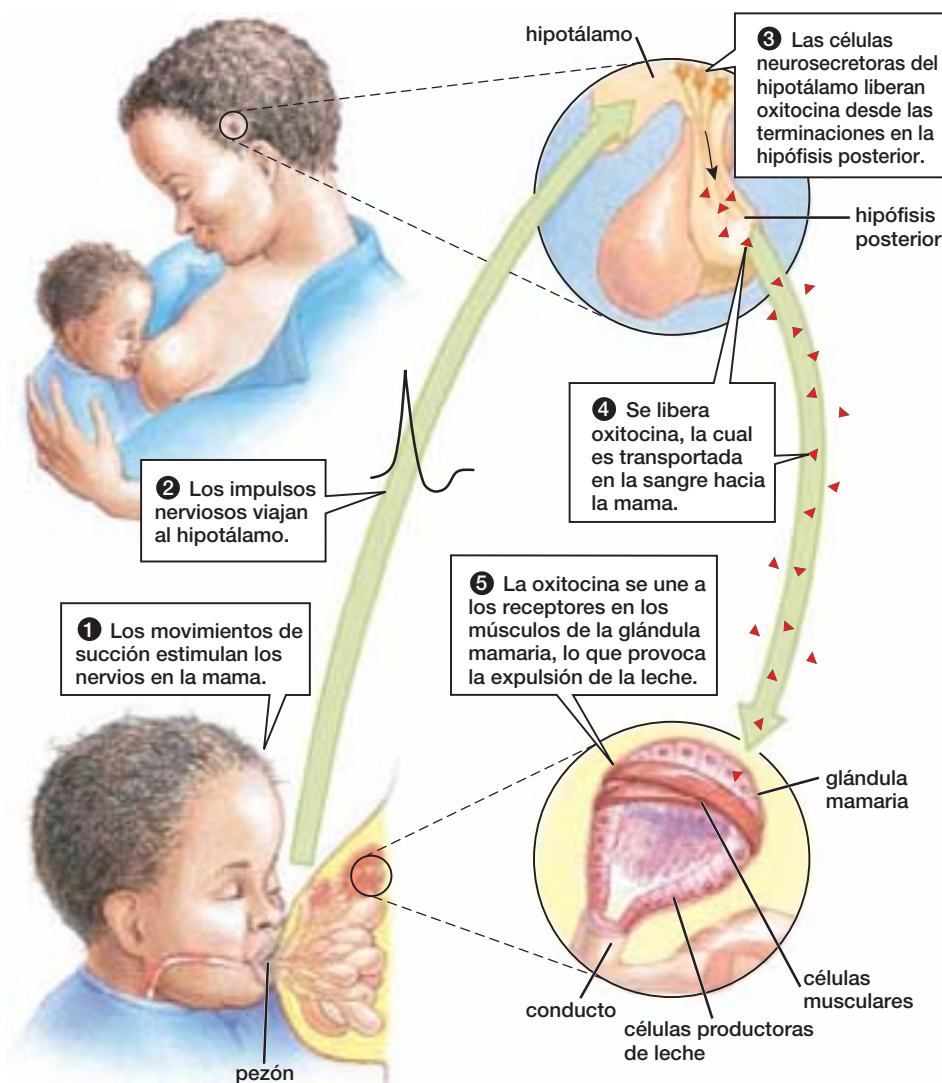
La oxitocina provoca contracciones de los músculos de la matriz durante el parto. También activa el “reflejo de secreción de leche” en las madres que amamantan, al hacer que los tejidos musculares de las mamas (glándulas mamarias) se contraigan en respuesta a la estimulación que produce el bebé al succionar. Este reflejo expulsa leche de las glándulas productoras, que tienen forma de bolsas, hacia los pezones (FIGURA 37-8).

Estudios recientes con animales de laboratorio indican que la oxitocina también tiene efectos sobre el comportamiento. En las ratas, por ejemplo, inyecciones de oxitocina hacen que hembras vírgenes exhiban una conducta maternal, como construir un nido, lamer las crías de otras hembras y recuperar aquellas que se han alejado del nido. La

oxitocina también podría desempeñar un papel en el comportamiento reproductor del macho, al estimular el movimiento de los espermatozoides a través del tracto reproductivo y haciendo que las ratas macho eyaculen más fácilmente.

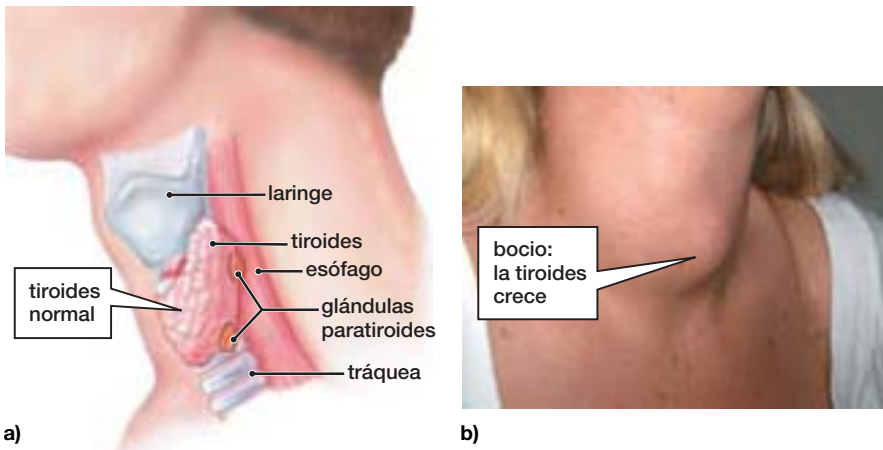
### Las glándulas tiroides y paratiroides influyen en el metabolismo y en los niveles de calcio

La *glándula tiroides*, que está en la parte delantera del cuello, situada bajo la laringe (FIGURA 37-9a), produce dos hormonas: *tiroxina* y *calcitonina*. La calcitonina es un péptido importante en la regulación de los niveles de calcio en la sangre en varios tipos de mamíferos, pero parece desempeñar un papel menor en los humanos. En ocasiones se administra como medicamento para reducir la osteoporosis. La *tiroxina*, también llamada hormona tiroidea, es un aminoácido modificado que contiene yodo. Como no puede difundirse a través de las membranas, hay algunas proteínas portadoras que se encargan de introducirla en las células. La tiroxina trabaja uniéndose a los receptores nucleares que regulan la actividad de los genes. Influye en la mayoría de las células del cuerpo, ya que eleva su tasa metabólica y estimula la síntesis de enzimas que descomponen la glucosa y suministran energía. En los adultos, los niveles de tiroxina determinan la tasa metabólica



**FIGURA 37-8** Hormonas y lactancia

El control de la secreción de leche por la oxitocina durante la lactancia se regula por retroalimentación entre un bebé y su madre. Este ciclo continúa hasta que el bebé queda satisfecho y deja de succionar. Al cesar la estimulación del pezón, se suspende la liberación de oxitocina, los músculos se relajan y el flujo de leche se interrumpe.



**FIGURA 37-9** Las glándulas tiroides y paratiroides

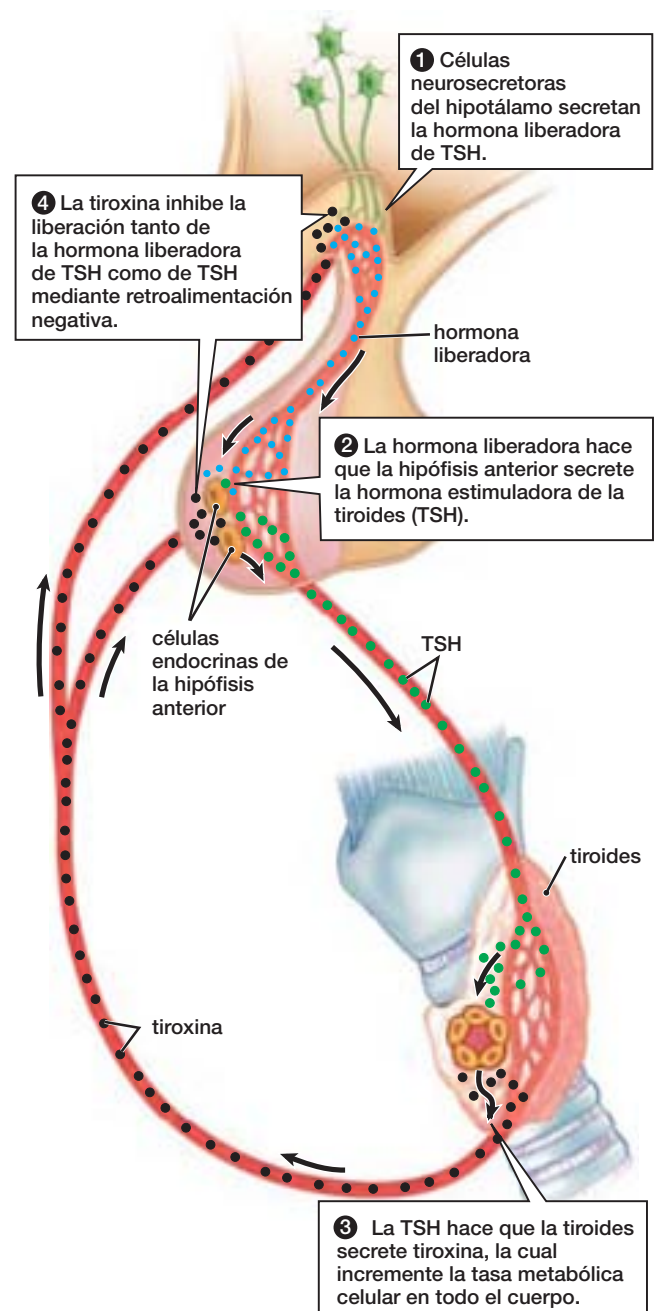
a) La tiroides, que incluye pequeñas glándulas paratiroides, envuelve la parte frontal de la laringe en el cuello. b) El bocio, una condición en la que la glándula tiroides crece desmesuradamente, se debe a una dieta deficiente en yodo.

general, esto es, la tasa en reposo del metabolismo celular. Se requiere de niveles normales de tiroxina para que la mente esté alerta. Bajos niveles de tiroxina hacen que las personas se sientan cansadas física y mentalmente; podrían perder el apetito, pero aún así engordar; también es posible que se vuelvan menos tolerantes al frío (el cuerpo genera menos calor cuando su tasa metabólica es baja). Un exceso de tiroxina produce nerviosismo e irritabilidad, aumento en el apetito e intolerancia al calor.

En los animales jóvenes, incluidos los seres humanos, la tiroxina ayuda a regular el crecimiento, estimulando tanto la tasa metabólica como el desarrollo del sistema nervioso. Una secreción insuficiente de hormona tiroidea durante la primera infancia causa *cretinismo*, una condición caracterizada por retraso mental y enanismo. Por fortuna, un diagnóstico temprano y complementos de tiroxina pueden revertir esta condición. Por otra parte, una secreción excesiva de tiroxina en los vertebrados en desarrollo puede causar un desarrollo precoz. En 1912, en una de las primeras demostraciones de la acción hormonal, un fisiólogo descubrió que la tiroxina puede inducir una metamorfosis temprana en renacuajos (véase “Conexiones evolutivas: La evolución de las hormonas”).

Los niveles de tiroxina en la sangre se regulan mediante retroalimentación negativa. La liberación de tiroxina es estimulada por la hormona estimuladora de la tiroides (TSH), producida por la hipófisis anterior, la cual, a su vez, es estimulada por una hormona liberadora producida por el hipotálamo. La cantidad de TSH liberada por la hipófisis se regula mediante retroalimentación negativa. Niveles adecuados de tiroxina en el torrente sanguíneo inhiben la secreción tanto de la hormona liberadora (del hipotálamo) como de TSH (de la hipófisis anterior); de esta forma se inhibe una liberación ulterior de tiroxina por parte de la glándula tiroides (**FIGURA 37-10**).

Una dieta deficiente en yodo reduce la producción de tiroxina y activa un mecanismo de retroalimentación que trata de restaurar los niveles normales de las hormonas, aumentando drásticamente el número de células productoras de tiroxina. Este mecanismo de compensación produce un crecimiento



**FIGURA 37-10** Retroalimentación negativa en la función de la glándula tiroides

**PREGUNTA:** Una prueba común para indagar el funcionamiento de la glándula tiroides es medir la cantidad de hormona estimuladora de la tiroides que circula por la sangre. ¿Qué concluirías si tal prueba revelara un nivel anormalmente elevado de TSH?

excesivo de la tiroides; la glándula crecida puede abultar el cuello, produciendo una condición llamada **bocio** (véase la figura 37-9b). El bocio solía ser común en algunas regiones de Estados Unidos, donde los niveles de yodo son bajos en el suelo y en el agua, pero la generalización del uso de sal yodada prácticamente ha eliminado esta condición en los países desarrollados.

Los cuatro discos pequeños de las **glándulas paratiroides** están incrustados en la parte trasera de la tiroides (véase la figura 37-9a). Las paratiroides secretan la **paratohormona (PTH)** que controla la concentración del calcio en la sangre y en el líquido intersticial. El calcio es indispensable en muchos procesos, como la función muscular y nerviosa, por lo que es preciso mantener la concentración de este ion en los líquidos corporales dentro de límites estrechos. Los huesos sirven como un “banco” en el que se puede depositar o del que se puede retirar calcio cuando es necesario. Si los niveles de calcio en la sangre bajan, la paratohormona provoca la liberación de algo de calcio de los huesos. También hace que los riñones reabsorban más calcio conforme se elabora orina. Un mayor nivel de calcio en la sangre inhibe la posterior liberación de paratohormona en un ciclo de retroalimentación negativa (FIGURA 37-11).



**FIGURA 37-11** La retroalimentación negativa regula los niveles de calcio en la sangre

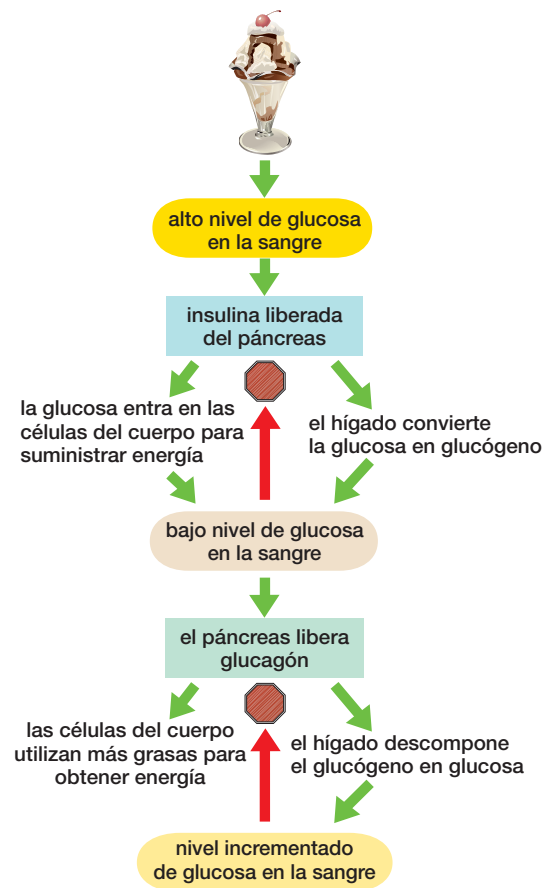
**El páncreas es una glándula tanto exocrina como endocrina**

El **páncreas** es una glándula que produce secreciones tanto exocrinas como endocrinas. La porción exocrina sintetiza secreciones digestivas que se liberan al *conducto pancreático* y fluyen hacia el intestino delgado (véase el capítulo 34). La porción endocrina consiste en cúmulos de células llamadas **células de islote** que producen hormonas peptídicas. Un tipo de células de islote produce la hormona **insulina**; otro tipo produce la hormona **glucagón**.

La insulina y el glucagón tienen funciones opuestas que regulan el metabolismo de los carbohidratos y las grasas: la insulina reduce el nivel de glucosa en la sangre, en tanto que el glucagón lo eleva (FIGURA 37-12). Juntas, las dos hormonas ayudan a mantener casi constante el nivel de glucosa de la sangre. Cuando ese nivel se eleva (por ejemplo, después de comer), se libera insulina, la cual hace que las células del cuerpo absorban glucosa y la metabolicen para obtener energía o la conviertan en *grasa o glucógeno* (un polisacárido constituido de cadenas largas de moléculas de glucosa) para almacenarla. Cuando bajan los niveles de glucosa de la sangre (por ejemplo, si omitimos el desayuno o corrimos una carrera de 10 kilómetros), se libera glucagón, el cual activa una enzima hepática que descompone el glucógeno (que primordialmente está almacenado en el hígado) y libera glucosa a la sangre. El glucagón también promueve la descomposición de lípidos

para liberar ácidos grasos que pueden metabolizarse para obtener energía.

Una deficiencia en la producción de insulina o una falla en las células blanco que deben responder a ella produce **diabetes mellitus**. Hay varias causas de la diabetes; pero en todos los casos, los niveles de glucosa en la sangre son elevados y fluctúan con la ingesta de alimento. Por razones que aún no se comprenden del todo, la diabetes provoca una amplia variedad de problemas circulatorios que dan por resultado hipertensión, aterosclerosis y niveles elevados de colesterol LDL (malo). La diabetes indirectamente provoca infartos al miocardio, ceguera y deficiencias renales. Los científicos han insertado el gen humano de la insulina en bacterias y otras células que pueden cultivarse en laboratorios en grandes cantidades, para tener insulina humana fácilmente disponible. Un novedoso tratamiento para esta enfermedad se describe en “Enlaces con la vida: Más cerca de la cura de la diabetes”.



**FIGURA 37-12** El páncreas controla los niveles de glucosa en la sangre

Las células de islote en el páncreas producen insulina y glucagón, los cuales cooperan en un ciclo de retroalimentación negativa de dos partes que controla las concentraciones de glucosa en la sangre. **PREGUNTA:** ¿Cómo resultará afectado el nivel de glucosa en una persona que nació con una mutación que impide que los receptores de glucagón se unan a este último?

**Los órganos sexuales secretan hormonas esteroides**

Los órganos sexuales hacen mucho más que producir espermatozoides u óvulos. Los



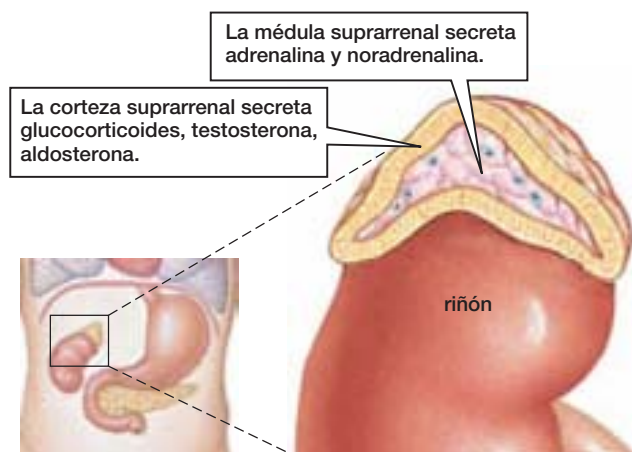
en la hembra, son órganos endocrinos importantes (véase la figura 37-1). Los testículos secretan varias hormonas esteroideas, llamadas colectivamente **andrógenos**, de las cuales la más importante es la **testosterona**. Los ovarios secretan dos tipos de hormonas esteroideas: **estrógeno** y **progesterona**. El papel de las hormonas sexuales en la producción de espermatozoides y óvulos, en el ciclo menstrual, el embarazo y el desarrollo se describe en los capítulos 40 y 41.

Las hormonas sexuales también desempeñan un papel clave en la *pubertad*, la fase de la vida en la que los aparatos reproductores de uno y otro sexo maduran y se vuelven funcionales. La pubertad va acompañada de cambios conductuales que hacen que resulte una etapa tan interesante para los adolescentes y sus padres. La pubertad se inicia cuando, por razones que aún no se comprenden del todo, el hipotálamo comienza a secretar cantidades cada vez mayores de hormonas liberadoras que a la vez estimulan a la hipófisis anterior para que secreta más hormona luteinizante (LH) y hormona estimuladora del folículo (FSH) al torrente sanguíneo. Tanto la LH como la FSH estimulan a células blanco en los testículos u ovarios para que produzcan niveles más altos de hormonas sexuales. La elevación resultante en las hormonas sexuales en circulación afecta finalmente a tejidos de todo el cuerpo que poseen los receptores apropiados. En los individuos de uno y otro sexo aparece el vello púbico y en las axilas. La testosterona, secretada por los testículos en los hombres, estimula el desarrollo de caracteres sexuales masculinos secundarios, como vello en el cuerpo y la cara, crecimiento muscular y una laringe más grande (“manzana de Adán”), lo que hace más grave la voz. La testosterona también promueve la producción de espermatozoides. El estrógeno de los ovarios en las mujeres estimula el crecimiento de las glándulas mamarias y la maduración del aparato reproductor femenino, incluyendo la producción de óvulos maduros. La progesterona, secretada por los ovarios durante el embarazo, prepara al tracto reproductivo para recibir y nutrir el óvulo fecundado. Aunque hay un aumento repentino de producción de hormonas sexuales durante la pubertad, las hormonas sexuales están presentes desde la etapa fetal. Estas hormonas influyen en el desarrollo de uno y otro sexo y continúan afectando el comportamiento y la función cerebral durante toda la vida.

En las últimas décadas, investigaciones realizadas sobre una amplia variedad de animales, así como algunos estudios de poblaciones humanas, han revelado que contaminantes ambientales comunes procedentes de las actividades agrícolas e industriales alteran los sistemas hormonales. Esto es particularmente cierto en el caso de las hormonas sexuales, como se describe en “Guardián de la Tierra: Engaño endocrino”.

### Las glándulas suprarrenales tienen dos partes que secretan hormonas distintas

Imaginemos cómo se siente nuestro cuerpo cuando nos sobresaltamos, nos asustamos o nos enojamos. Estas reacciones físicas son resultado de hormonas producidas por las glándulas suprarrenales, que actúan en colaboración con el sistema nervioso simpático que nos prepara para enfrentar situaciones de emergencia. Al igual que la hipófisis y el páncreas, las **glándulas suprarrenales** o **adrenales** (ambos términos significan “sobre los riñones”) son dos glándulas en una: la *médula suprarrenal* y la *corteza suprarrenal* (FIGURA 37-13). La *médula suprarrenal*



**FIGURA 37-13** Las glándulas suprarrenales

Encima de cada riñón hay una glándula suprarrenal. La corteza consta de células endocrinas que secretan hormonas esteroideas. La médula interna, derivada de tejido nervioso durante el desarrollo, secreta adrenalina y noradrenalina.

derivadas de tejido nervioso durante el desarrollo; su secreción hormonal está bajo el control directo del sistema nervioso. La médula suprarrenal produce dos hormonas en respuesta a las tensiones: **adrenalina** y, en cantidades mucho menores, **noradrenalina** (también llamadas *epinefrina* y *norepinefrina*, respectivamente). Estas hormonas, que son derivados de aminoácidos, preparan al cuerpo para acciones de emergencia: elevan los ritmos cardíaco y respiratorio, hacen que suban los niveles de glucosa en la sangre y dirigen el flujo de sangre lejos del tracto digestivo y hacia el cerebro y los músculos. También hacen que los conductos de aire de los pulmones se expandan para que el intercambio de gases sea más eficiente. Por eso se administran sustancias que imitan la acción de la adrenalina a los asmáticos, cuyas vías respiratorias se constriñen durante los ataques que sufren. El sistema nervioso simpático activa a la médula suprarrenal y prepara al cuerpo para responder a emergencias, como veremos en el capítulo 38.

La capa exterior de la glándula suprarrenal forma la **corteza suprarrenal**, que secreta tres tipos de hormonas esteroideas, llamadas **glucocorticoides**. ACTH de la hipófisis anterior estimula la liberación de glucocorticoides, en respuesta a una hormona liberadora del hipotálamo. Los niveles hormonales están controlados por retroalimentación negativa; la circulación de los glucocorticoides inhibe la liberación tanto de la hormona liberadora del hipotálamo como de ACTH.

El glucocorticoide **cortisol**

## GUARDIÁN DE LA TIERRA

## Engaño endocrino

Las actividades humanas han introducido una enorme cantidad y variedad de sustancias ajenas en el entorno. Ahora esas sustancias están presentes en el agua, el aire y los alimentos, y todos estamos expuestos a ellas todos los días. Algunas han perturbado varios aspectos de la función reproductora en animales silvestres expuestos a niveles altos. Estos compuestos son muy diversos en cuanto a estructura química y tienen una gama muy amplia de orígenes que incluyen plaguicidas (DDT, metoxiclor), plásticos (bisfenol A, ftalatos), detergentes (nonilfenilo, etoxilato) y procesos industriales (con policloruro de bifenilo, PCB). La preocupación por estos **perturbadores endocrinos** se basa en estudios con animales de laboratorio, cultivos celulares y animales silvestres expuestos que se han observado en su hábitat natural. Algunos provocan una reducción en la hormona tiroidea; otros imitan o bloquean las hormonas reproductoras, dependiendo del sitio de acción o de la especie.

Los científicos han identificado una amplia variedad de efectos nocivos causados por los perturbadores endocrinos; entre ellos están la feminización de los machos, la masculinización de las hembras, cánceres del aparato reproductor, malformaciones en los órganos sexuales, niveles alterados de hormonas en la sangre y reducción de la fertilidad. Cuando una planta química cerca del Lago Apopka en Florida descargó al agua grandes cantidades de varios tipos conocidos de perturbadores de estrógeno, los biólogos que estudiaban la fauna notaron una alarmante disminución en la población de caimanes del lago. Se observó que muchos huevos no estaban eclosionando. Los machos tenían niveles altos de estrógeno, niveles bajos de testosterona, penes más pequeños de lo normal y testículos anormales. Las hembras por lo regular presentaban niveles excepcionalmente altos de estrógeno y ovarios anormales. En otro estudio, los investigadores descubrieron que peces macho de agua dulce que viven corriente abajo de las descargas de aguas negras tanto en Estados Unidos como en Inglaterra producen una proteína de la yema de huevo que normalmente se encuentra sólo en las hembras. Los investigadores sospechan que esta feminización de los machos es causada por los estrógenos humanos (tanto naturales como sintéticos, estos últimos provenientes de las píldoras anticonceptivas) que se excretan en la orina de las mujeres. Hay una creciente preocupación en torno a dos nuevas formas de control natal: los parches anticonceptivos y los anillos vaginales, los cuales retienen altos niveles de estrógeno sintético después de utilizarse y se tiran en el retrete o terminan en los vertederos de basura, de donde el estrógeno se dirige hacia los ríos o las aguas subterráneas.

Algunos de los perturbadores endocrinos más devastadores, como el DDT y los PCB, se han prohibido en los países desarro-

llados (aunque permanecen en el aire, el agua o el suelo), pero muchos otros todavía se usan ampliamente y son muy persistentes en el entorno. Conforme se realiza más investigación sobre sustancias químicas, se descubre que algunos de ellos son perturbadores endocrinos. El atrazín, un compuesto utilizado ampliamente en Estados Unidos para exterminar la maleza, causa una disminución en los niveles de testosterona así como anomalías sexuales en las ranas en concentraciones que son comunes en los ríos y que están muy por debajo de los niveles máximos permitidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. El atrazín y otros perturbadores endocrinos podrían estar contribuyendo a una disminución en la población mundial de anfibios y a la reciente extinción de varias especies.

Es probable que los efectos de los perturbadores endocrinos se extiendan a los seres humanos. Los científicos están investigando un posible vínculo entre los herbicidas, que se encuentran dispersos en ríos y aguas subterráneas en la zona central norte de Estados Unidos, y una menor calidad del semen en los seres humanos. Recientemente los éteres difenílicos polibromados (PBDE), que se utilizan como retardadores de flamas en productos manufacturados como computadoras, plásticos, alfombras y muebles, se han filtrado al aire, agua y a productos que sirven de alimento al ser humano; por eso se les encuentra en la leche materna. Aunque los niveles de estas sustancias en las personas son ínfimos, los efectos en los seres humanos aún se desconocen; la investigación con animales revela que la toxicidad es similar a la que provocan los PCB, que causan daño en el sistema nervioso y defectos congénitos tanto en animales como en seres humanos. Se cree que tanto los PCB como los PBDE alteran las funciones de la tiroides.

Aunque se sabe que los niveles altos de perturbadores endocrinos son nocivos, nadie sabe qué efectos tendrá sobre las poblaciones humanas y de otros animales la exposición a largo plazo a niveles bajos de estas sustancias (por sí solas y en diversas combinaciones), en especial durante las primeras y más vulnerables etapas del desarrollo. ¿Cuántos de los miles de compuestos industriales de uso común actúan como perturbadores endocrinos? ¿Cómo actúan? ¿Qué niveles de exposición experimentan diversas poblaciones humanas y animales? ¿Existe un umbral de exposición más allá del cual se presentan efectos tóxicos? ¿La exposición a múltiples perturbadores endocrinos produce efectos más graves que los que provocan esas mismas sustancias químicas por separado? Las respuestas a estas preguntas nos ayudarán a formular controles apropiados para su uso. Por desgracia, las preguntas son complejas y difíciles y, mientras buscamos las respuestas, cada vez más y más de estas sustancias están ingresando en el entorno.

quemar glucosa. Por ello, no puede permitirse que los niveles de glucosa de la sangre bajen demasiado, pues en poco tiempo las células del cerebro experimentarían inanición y esto daría pie a pérdida del conocimiento y la muerte.

La corteza suprarrenal también secreta la hormona **aldosterona**

nes y las glándulas sudoríparas retengan el sodio. Entonces la sal y otras fuentes de sodio de la dieta elevan los niveles de este último en la sangre y detienen la secreción de aldosterona (un ejemplo de retroalimentación negativa).

La corteza suprarrenal también produce la hormona sexual masculina testosterona, tanto en hombres como en mujeres, aunque normalmente en cantidades mucho más bajas que la que producen los testículos. Los tumores de la médula suprarrenal pueden causar una liberación excesiva de testosterona, causando masculinización en las mujeres. Muchas de las “mujeres barbudas”, que solían exhibirse en las atracciones secundarias de los circos, probablemente padecían esta condición.

### Otras fuentes de hormonas comprenden la glándula pineal, el timo, los riñones, el corazón, el tracto digestivo y las células grasas

La **glándula pineal** se encuentra entre los dos hemisferios del cerebro, justo arriba y atrás del hipotálamo (véase la figura 37-1). Esta glándula, cuyo nombre se debe a su parecido con los conos de los pinos, es más pequeña que un chícharo. En 1646 el filósofo René Descartes la describió como “la sede del alma racional”. Desde entonces, los científicos han aprendido más acerca de esta glándula, pero todavía no se conocen bien muchas de sus funciones.

La glándula pineal produce la hormona **melatonina**, un derivado de aminoácido. La melatonina se secreta en un ritmo diario, que en los mamíferos está regulado por los ojos. En algunos vertebrados, como la rana, la glándula misma contiene células fotorreceptoras y el cráneo arriba de ella es delgado, de manera que la pineal puede detectar la luz solar y, por lo tanto, la duración del día. Se cree que la glándula pineal, al responder a las duraciones del día características de las distintas estaciones, regula los ciclos reproductivos estacionales de muchos mamíferos. Pese a años de investigaciones, no se ha aclarado completamente la función de la glándula pineal y de la melatonina en el ser humano; pero se sabe que la oscuridad incrementa la producción de melatonina, mientras que la luz la inhibe. Una hipótesis es que la glándula pineal y la secreción de melatonina influyen en los ciclos de sueño-vigilia. La melatonina se vende como ayuda para conciliar el sueño. Una sobreproducción de melatonina podría contribuir a generar la depresión que algunas personas experimentan durante los días cortos del invierno, conocida como *trastorno afectivo estacional* (*seasonal affective disorder*, SAD). Sentarse frente a una serie de luces brillantes en la mañana ayuda a aminorar los síntomas del SAD en muchos casos.

El **timo** se encuentra en la cavidad torácica detrás del esternón (véase la figura 37-1). Además de producir glóbulos blancos, el timo produce la hormona **timosina**, que estimula el desarrollo de glóbulos blancos especializados (células T), los cuales desempeñan un papel importante en el sistema inmunitario (véase el capítulo 36). El timo es extremadamente grande en los niños, pero, por influencia de las hormonas sexuales, comienza a encogerse después de la pubertad.

Los riñones, que desempeñan un papel central en el mantenimiento de la homeostasis de los líquidos del cuerpo, son también importantes órganos endocrinos. Cuando baja el contenido de oxígeno de la sangre, los riñones producen la hormona que incrementa la producción de gló-

bulos rojos (véase el capítulo 32). Los riñones también producen una segunda hormona, la **renina**, en respuesta a una presión arterial baja, como la causada por una hemorragia. La renina es una enzima que cataliza la producción de la hormona **angiotensina** a partir de proteínas de la sangre. La angiotensina eleva la presión arterial construyendo las arteriolas; también estimula la liberación de aldosterona por la corteza suprarrenal, la cual hace que los riñones retengan sodio, lo que a la vez aumenta la osmolaridad. Una osmolaridad alta atrae y retiene agua, lo que incrementa el volumen de la sangre.

Si bien parece poco probable que el corazón sea un órgano endocrino, en 1981 se descubrió que una sustancia que se extraía del tejido de las aurículas del corazón y se inyectaba en ratas causaba un incremento en la producción de sal y agua por los riñones. Esta sustancia es el **péptido auricular natriurético (ANP)**. Las células de las aurículas liberan este péptido cuando el volumen sanguíneo aumenta y hace que el corazón se distienda excesivamente. El péptido auricular natriurético produce entonces una reducción en el volumen sanguíneo al inhibir la liberación tanto de ADH como de aldosterona, permitiendo que los riñones excreten más sal y agua.

El estómago y el intestino delgado producen diversas hormonas peptídicas que ayudan a regular la digestión. Entre ellas están la **gastrina**, **secretina** y **colecistocinina**, de las que hablamos en el capítulo 34.

¿Las células adiposa pueden constituir un órgano endocrino? En 1995 ciertos investigadores describieron la hormona peptídica **leptina** (derivada de la palabra griega “leptos”, que significa delgado) liberada por células adiposas (de grasa). Los ratones a los que les falta el gen de la leptina se vuelven obesos (**FIGURA 37-14**), e inyecciones de leptina hacen que pierdan peso. Los investigadores postularon que el tejido adiposo, al liberar leptina, indica al cuerpo cuánta grasa ha almacenado y, por ende, cuánto debe comer. Por desgracia, los resultados de las pruebas realizadas con leptina como ayuda para que las personas pierdan peso no son alentadores. Muchas personas obesas tienen niveles altos de leptina, pero al parecer son relativamente insensibles a ella. No obstante, se están descubriendo nuevas y sorprendentes funciones de la leptina y se están encontrando receptores de leptina en lugares inesperados, como en vasos sanguíneos y glóbulos blancos. Al parecer, la leptina estimula el crecimiento de nuevos capilares y acelera la cicatrización de heridas. También estimula al sistema inmunitario y parece ser necesaria para el inicio de la pubertad.



**FIGURA 37-14** La leptina ayuda a regular la grasa corporal. El ratón de la izquierda se alteró por ingeniería genética, de manera que carece del gen para la hormona leptina.

## ENLACES CON LA VIDA

## Más cerca de la cura de la diabetes

En la forma más común de diabetes, conocida como *tipo 2*, el páncreas produce algo de insulina, pero no la suficiente, o bien, las células de la víctima pierden su capacidad para responder a ella (condición conocida como resistencia a la insulina). Si bien las causas aún no se comprenden del todo, existe una clara correlación entre la diabetes tipo 2, caracterizada por resistencia a la insulina, y la obesidad. Los índices de obesidad se han duplicado desde 1980, y la incidencia de la diabetes tipo 2 se ha duplicado desde 1970. Esta forma de diabetes por lo general se presenta en personas mayores de 40 años; pero cada vez más niños reciben un diagnóstico de diabetes, en paralelismo con el incremento de la obesidad durante la niñez.

Mientras que la diabetes tipo 2 a menudo puede controlarse mediante mejoras en la dieta y el estilo de vida, la diabetes tipo 1 se presenta cuando el sistema inmunitario de una persona ataca y mata las células de islote que producen insulina en el páncreas. Esta forma de diabetes a menudo se manifiesta muy temprano en la vida, y sus víctimas rara vez son longevos. Sus vidas nunca son normales, pues tienen que practicarse múltiples pruebas de sangre y aplicarse inyecciones de insulina todos los días. Para el millón de personas en Estados Unidos que sufren de este tipo de diabetes, el trasplante de células de islote representa un rayo de esperanza. Un equipo de investigado-

res encabezado por James Shapiro en la Universidad de Alberta, Canadá, retiró el páncreas del cuerpo de donadores recientemente fallecidos e implantó las células de islote extraídas en una vena que alimentaba el hígado de víctimas de diabetes. Algunas de estas células se aposentaron en los receptores y comenzaron a secretar insulina. Cinco años después, la mayoría de estas personas aún requieren de insulina, pero en menores dosis, y sus niveles de azúcar en la sangre son más estables. Por desgracia, deben tomar medicamentos inmunosupresores de manera continua para evitar el rechazo de tejidos.

Sólo unos 3000 donadores de páncreas están disponibles cada año en Estados Unidos, y la mayoría de los trasplantes exitosos de células de islote requieren de dos donadores de páncreas porque estas frágiles células se dañan al almacenarse en lugares fríos y durante el tiempo de transporte. Recientemente, los médicos realizaron el primer trasplante de células de islote procedentes de un donador vivo; una mujer donó parte de su páncreas a su hija adulta. Las células trasplantadas comenzaron a fabricar insulina de inmediato, lo que dio a los médicos esperanza de que las células de los donadores vivos, que suelen ser sanas, puedan dar un mejor resultado que las procedentes de cadáveres. Sólo el tiempo lo dirá.

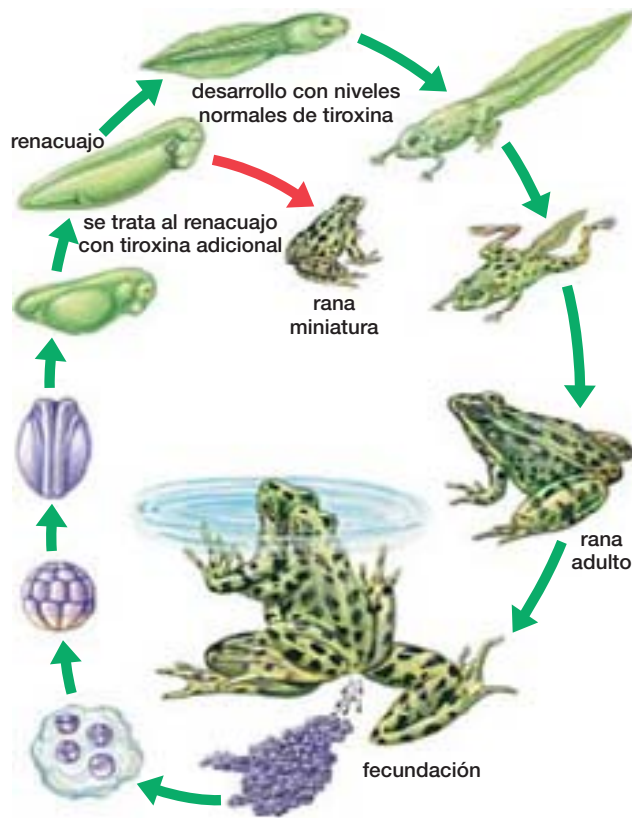
Las investigaciones siguen expandiendo nuestra comprensión de los múltiples efectos de las hormonas y de la amplia variedad de órganos y células que las producen. Con el tiempo, esta comprensión dará origen a un sinnúmero de nuevos tratamientos médicos, pero también deberá aumentar nuestro respeto por estas sustancias y nuestra conciencia de que cualquier hormona que tomemos podría influir en sistemas fisiológicos de todo nuestro cuerpo.

## CONEXIONES EVOLUTIVAS

## La evolución de las hormonas

en el agua salada, el pez tiende a perder agua. Por consiguiente, las migraciones del salmón requieren una readaptación total del control de la sal y el agua. En el salmón, una de las funciones de la tiroxina es generar los cambios metabólicos necesarios para pasar de la vida en ríos y arroyos a la vida en el océano, y de regreso.

En los anfibios la tiroxina tiene el impresionante efecto de activar la metamorfosis. En 1912, en una de las primeras demostraciones de la acción de cualquier hormona, se alimentó a renacuajos con tiroides de caballo picada. El resultado fue que los renacuajos sufrieron una metamorfosis prematura para convertirse en ranas adultas miniatura (**FIGURA 37-15**



### FIGURA 37-15 La tiroxina controla la metamorfosis en los anfibios

El ciclo de vida de la rana inicia con la fecundación de los óvulos (abajo). El huevo fecundado se convierte en un renacuajo acuático semejante a un pez, que crece y finalmente sufre metamorfosis para convertirse en una rana adulta. La metamorfosis se activa con un aumento en la producción de tiroxina por la glándula tiroides del renacuajo. Si se inyecta tiroxina adicional a un renacuajo joven, sufrirá una metamorfosis anticipada para convertirse en una rana adulta en miniatura. **PREGUNTA:** ¿Qué sucedería si se administrara a los renacuajos una sustancia que bloquea la producción de tiroxina?

## OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO

### PERDER POR EL USO DE HORMONAS ARTIFICIALES



Los atletas dispuestos a engañar se sienten atraídos por los esteroides anabólicos porque, al igual que la testosterona natural, aumentan la masa muscular. Las hormonas han evolucionado hasta poder ejercer su efecto en las actuales cantidades minúsculas, en los momentos adecuados y en un cuerpo que se desarrolla y funciona normalmente. Tomar dosis relativamente grandes de esteroides anabólicos puede significar un problema porque, como sucede con muchas hormonas, ejercen sus efectos en todo el cuerpo.

En los hombres, niveles artificialmente aumentados de esteroides anabólicos generan un efecto de retroalimentación negativa que puede reducir la producción natural de testosterona, reducir el tamaño de los testículos y el conteo de espermatozoides, así como provocar el crecimiento del pecho. En las mujeres, los esteroides anabólicos interfieren con los periodos menstruales y aumentan el vello facial. En ambos sexos, los esteroides provocan acné e inhiben el fun-

cionamiento del sistema inmunitario. Los cambios continuos de humor y la agresividad repentina son tan comunes en quienes consumen esteroides anabólicos, que en inglés existe el término "roid rage" ("rabia por esteroides") para designar esta condición. Los esteroides anabólicos se han vinculado con aumentos en la presión sanguínea y con una disminución del colesterol bueno (HDL); ambos son factores de riesgo para sufrir infartos al miocardio y accidentes cerebrovasculares. Con base en una gran encuesta, los Centros para el Control de Enfermedades (CDC) concluyeron que aproximadamente un 6 por ciento de los estudiantes de preparatoria en Estados Unidos habían utilizado esteroides anabólicos alguna vez. Como los esteroides anabólicos pueden causar que el crecimiento de los huesos se interrumpa prematuramente, los jóvenes que abusan de estas sustancias quizá no alcancen nunca su máxima estatura.

Jugadores profesionales de fútbol y béisbol han deshonrado sus actividades deportivas tomando THG. El Tour de Francia de

2006 perdió buena parte de su brillo cuando nueve ciclistas fueron expulsados antes de que comenzara la carrera, con base en indicios de que habían tomado fármacos para mejorar el desempeño. Algunos participantes en justas olímpicas han sido despojados de sus medallas. Para Catlin, quien está a cargo del Laboratorio Olímpico de Análisis, la profanación de los Juegos Olímpicos es especialmente trágica. Y afirma: "La imagen que tengo de los Juegos Olímpicos es la del más puro y limpio evento que haya habido jamás. La gente en todos los países del mundo puede competir y el mejor hombre o la mejor mujer cruza la línea final antes que todos. ¿Qué podría ser peor que pensar que su comportamiento es deshonesto?"

**Piensa en esto** De acuerdo con lo que sabes acerca de los esteroides y otras hormonas, ¿crees que los atletas de los niveles de preparatoria y universidad deberían someterse rutinariamente a pruebas, al igual que lo hacen los atletas olímpicos? Explica tu respuesta.

## REPASO DEL CAPÍTULO

### RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

#### 37.1 ¿Cómo se comunican las células animales?

Dentro de los organismos multicelulares, la comunicación entre células ocurre a través de las uniones abiertas que unen células

directamente, por difusión de sustancias químicas a las células circunvecinas (hormonas locales y neurotransmisores), y por transporte de sustancias en el torrente sanguíneo (hormonas en-

doctrinas). Los mensajeros químicos extracelulares actúan selectivamente sobre células blanco que llevan consigo receptores específicos para esa sustancia.

### 37.2 ¿Qué características tienen las hormonas animales?

La mayoría de las células liberan hormonas locales, como las prostaglandinas, para comunicarse con las células vecinas. El sistema endocrino es un conjunto de glándulas y órganos que liberan hormonas endocrinas, las cuales son transportadas en el torrente sanguíneo a otras partes del cuerpo; ahí, afectan la actividad de células blanco específicas que llevan consigo receptores para las hormonas. Las hormonas son sintetizadas ya sea a partir de aminoácidos (hormonas derivadas de aminoácidos y péptidos) o a partir de lípidos (hormonas esteroides).

Casi todas las hormonas actúan sobre sus células blanco en una de dos maneras. Las hormonas peptídicas y derivadas de aminoácidos se unen a receptores en la superficie de las células blanco y activan a segundos mensajeros intracelulares, como el AMP cíclico, que a la vez alteran el metabolismo de la célula. Las hormonas esteroides se pueden unir a receptores superficiales o bien atravesar por difusión la membrana plasmática de su célula blanco y unirse a receptores en el citosol o el núcleo. El complejo hormona-receptor se dirige al núcleo y promueve la transcripción de genes específicos dentro del núcleo. Las hormonas tiroideas también penetran la membrana plasmática y entran en el núcleo, donde se

unen a receptores asociados a los cromosomas e influyen en la transcripción de genes.

La acción hormonal generalmente se regula por retroalimentación negativa, un proceso en el que una hormona causa cambios que inhiben la secreción ulterior de esa hormona.

### 37.3 ¿Qué estructuras y hormonas constituyen el sistema endocrino de los mamíferos?

Las hormonas son producto de las glándulas endocrinas: cúmulos de células incrustadas en una red de capilares. Las hormonas se secretan al líquido extracelular y se difunden al interior de los capilares. Las principales glándulas endocrinas del cuerpo humano son el complejo hipotálamo-hipófisis, las glándulas tiroideas y paratiroides, el páncreas, los órganos sexuales y las glándulas suprarrenales. Las hormonas secretadas por estas glándulas y sus acciones se resumen en la tabla 37-3. Otras estructuras que producen hormonas son la glándula pineal, el timo, los riñones, el corazón, el estómago, el intestino delgado y las células grasas.

**Web tutorial 37.1** El control que ejerce el hipotálamo sobre la hipófisis

**Web tutorial 37.2** Cómo influyen las hormonas en las células blanco

## TÉRMINOS CLAVE

adrenalina <i>pág. 753</i>	glándula hipófisis <i>pág. 748</i>	hormona esteroide <i>pág. 742</i>	oxitocina <i>pág. 746</i>
aldosterona <i>pág. 754</i>	glándula paratiroides <i>pág. 752</i>	hormona estimuladora de la tiroides (TSH) <i>pág. 749</i>	páncreas <i>pág. 752</i>
AMP cíclico <i>pág. 744</i>	glándula pineal <i>pág. 755</i>	hormona estimuladora de melanocitos (MSH) <i>pág. 749</i>	paratohormona (PTH) <i>pág. 752</i>
andrógeno <i>pág. 753</i>	glándula suprarrenal <i>pág. 753</i>	hormona estimuladora del folículo (FSH) <i>pág. 749</i>	péptido auricular natriurético (ANP) <i>pág. 755</i>
angiotensina <i>pág. 755</i>	glándula tiroides <i>pág. 750</i>	hormona inhibidora <i>pág. 749</i>	perturbador endocrino <i>pág. 754</i>
bocio <i>pág. 752</i>	glucagón <i>pág. 752</i>	hormona liberadora <i>pág. 749</i>	progesterona <i>pág. 753</i>
célula blanco <i>pág. 743</i>	glucocorticoide <i>pág. 753</i>	hormona local <i>pág. 742</i>	prolactina <i>pág. 749</i>
célula de islote <i>pág. 752</i>	hipófisis anterior <i>pág. 748</i>	hormona luteinizante (LH) <i>pág. 749</i>	prostaglandina <i>pág. 742</i>
célula neurosecretora <i>pág. 748</i>	hipófisis posterior <i>pág. 748</i>	insulina <i>pág. 752</i>	receptor <i>pág. 742</i>
colecistocinina <i>pág. 755</i>	hipotálamo <i>pág. 748</i>	leptina <i>pág. 755</i>	renina <i>pág. 755</i>
conducto <i>pág. 746</i>	hormona adrenocorticotrópica (ACTH) <i>pág. 749</i>	médula suprarrenal <i>pág. 753</i>	secretina <i>pág. 755</i>
corteza suprarrenal <i>pág. 753</i>	hormona antidiurética (ADH) <i>pág. 750</i>	melatonina <i>pág. 755</i>	segundo mensajero <i>pág. 744</i>
cortisol <i>pág. 753</i>	hormona del crecimiento <i>pág. 749</i>	noradrenalina <i>pág. 753</i>	sistema endocrino <i>pág. 743</i>
diabetes mellitus <i>pág. 752</i>	hormona derivada de aminoácido <i>pág. 742</i>	ovario <i>pág. 752</i>	testículos <i>pág. 752</i>
ecdisona <i>pág. 746</i>	hormona endocrina <i>pág. 742</i>		testosterona <i>pág. 753</i>
eritropoyetina <i>pág. 755</i>			timo <i>pág. 755</i>
estrógeno <i>pág. 753</i>			timosina <i>pág. 755</i>
gastrina <i>pág. 755</i>			tiroxina <i>pág. 750</i>
glándula endocrina <i>pág. 746</i>			
glándula exocrina <i>pág. 746</i>			

## RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. ¿Cuáles son los tres tipos de moléculas que se usan como hormonas en los vertebrados? Cita un ejemplo de cada uno.
2. ¿Qué diferencia hay entre una glándula endocrina y una exocrina? ¿Qué tipo libera hormonas?
3. Cuando una hormona peptídica se une a receptores de la célula blanco, ¿qué sucesos celulares tienen lugar? ¿Cómo se comportan las hormonas esteroides?
4. Traza un diagrama del proceso de retroalimentación negativa y da un ejemplo en el control de la acción hormonal.
5. ¿Cuáles son las principales glándulas endocrinas del cuerpo humano y dónde están?
6. Describe la estructura del complejo hipotálamo-hipófisis. ¿Qué hormonas de la hipófisis son neurosecretoras? ¿Qué funciones tienen?
7. Describe cómo las hormonas liberadoras regulan la secreción de hormonas por las células de la hipófisis anterior. Menciona las hormonas de la hipófisis anterior e indica una función de cada una.
8. Describe cómo las hormonas del páncreas colaboran para regular la concentración de glucosa en la sangre.
9. Compara la corteza y la médula suprarrenales contestando estas preguntas: ¿Dónde se encuentran dentro de la glándula suprarrenal? ¿Qué hormonas producen? ¿Qué órganos son el blanco de sus hormonas?

## APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. Una estudiante decide hacer un proyecto de ciencia sobre el efecto de la tiroidea en la metamorfosis de las ranas. Ella prepara tres acuarios con renacuajos y agrega tiroxina al agua de uno de ellos, añade el fármaco tiouracilo al segundo, y no añade nada al tercero. El tiouracilo reacciona con la tiroxina en los renacuajos y produce un compuesto inactivo. Suponiendo que la estudiante usa concentraciones fisiológicamente apropiadas, pronostica lo que sucederá.
2. Si tuvieras diabetes severa tipo 1, ¿considerarías el trasplante de células de islote? ¿Qué ventajas y desventajas le encuentras?
3. Sugiere una hipótesis acerca del sistema endocrino para explicar por qué muchas aves ponen sus huevos en la primavera y por qué los avicultores mantienen las luces encendidas durante la noche en el lugar donde albergan a sus aves ponedoras.
4. Algunos padres interesados en becas deportivas universitarias para sus hijos están pidiendo a los médicos prescribir tratamientos con hormona del crecimiento, aun cuando sus hijos tienen estatura normal. ¿Qué problemas biológicos y éticos supone esto para los padres, hijos, médicos, entrenadores y consejos de becas universitarias?
5. Presenta argumentos en favor y en contra de prohibir o restringir el uso de perturbadores endocrinos comunes, como los plastificantes y ciertos plaguicidas. ¿Qué acuerdos puedes sugerir al respecto?

## PARA MAYOR INFORMACIÓN

Ashley, S. "Doping by Design". *Scientific American*, febrero de 2004. Nuevos tipos de "esteroides diseñados" son difíciles de detectar.

Christensen, D. "Transplanted Hopes". *Science News*, 2 de septiembre de 2000. El autor describe trasplantes exitosos de células de islote en pacientes diabéticos.

Raloff, J. "Common Pollutants Undermine Masculinity". *Science News*, 3 de abril de 1999. Varios artículos de investigaciones recientes reportan efecto de feminización de los perturbadores de estrógeno en animales de laboratorio.

Schubert, C. "Burned by Flame Retardants?" *Science News*, 13 de octubre de 2001. Los retardadores de flama de televisores, computadoras, cortinas y sofás se están acumulando en nuestros cuerpos.

Vogel, G. "A Race to the Starting Line". *Science*, 30 de julio de 2004. Este artículo describe la competencia entre los atletas que toman fármacos y los químicos que idean formas de detectarlos.