



Biología

OCTAVA EDICIÓN

LA VIDA EN LA TIERRA

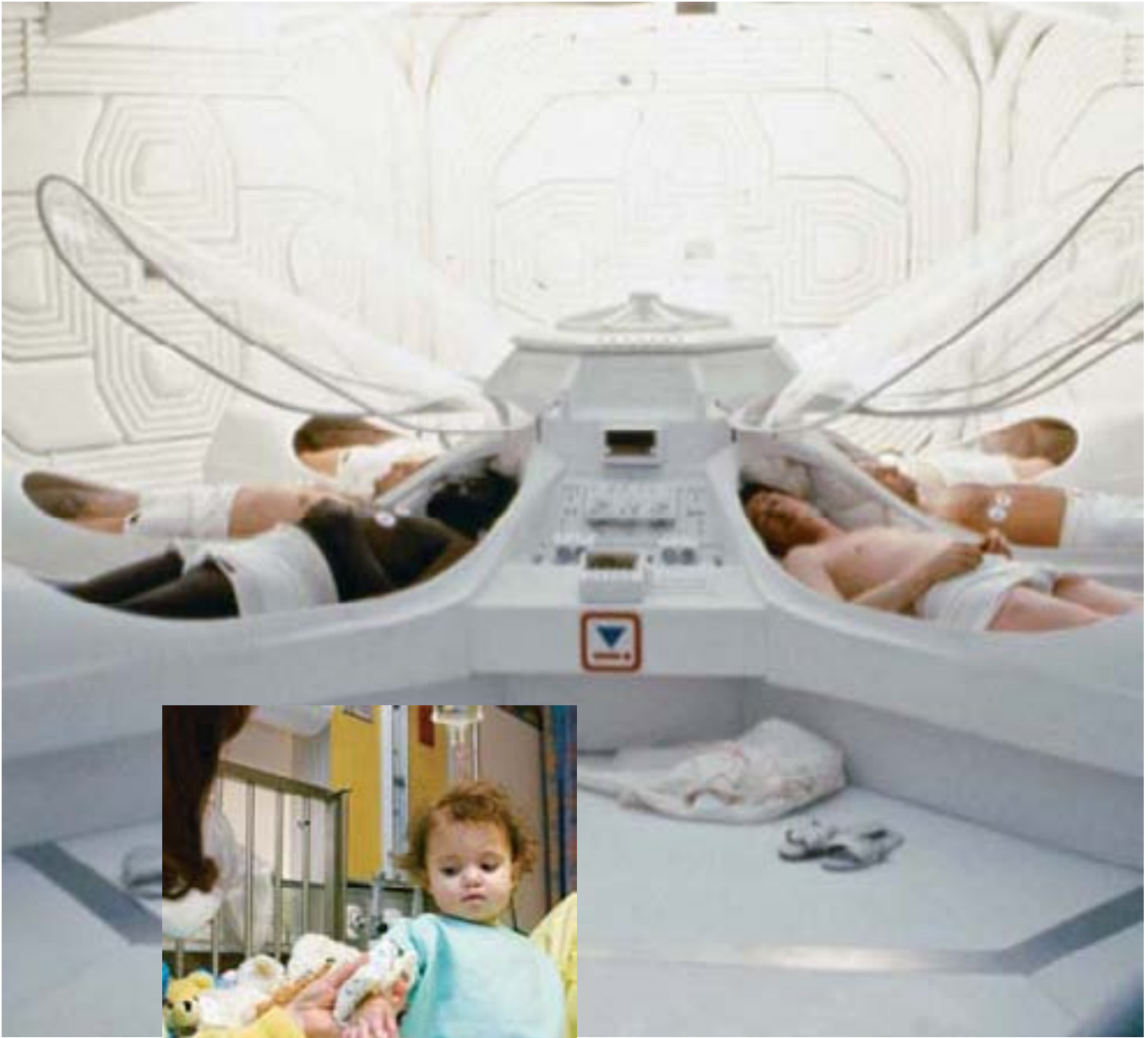


AUDESIRK

AUDESIRK

BYERS

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.

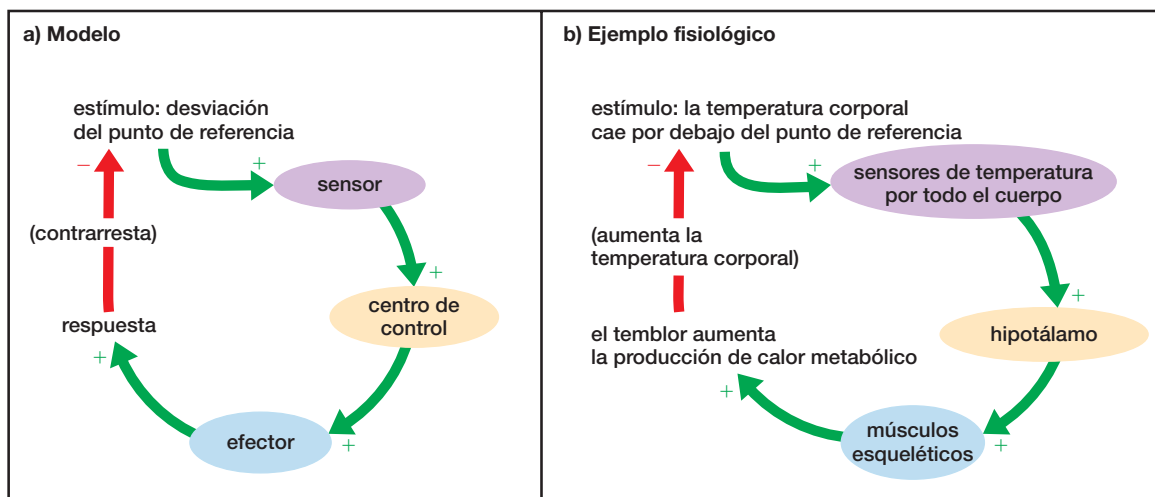


FIGURA 31-2 La retroalimentación negativa mantiene la homeostasis

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:






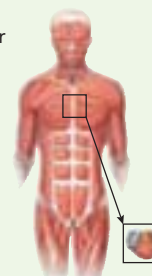




células → tejidos → órganos → sistemas de órganos

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 nutrientes 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

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.

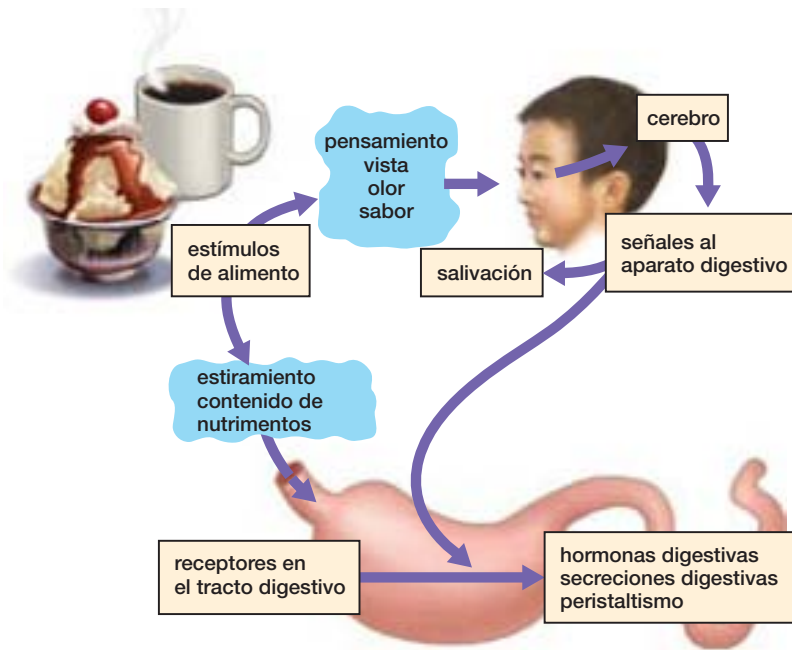


FIGURA 34-15 Nervios y hormonas influyen en el aparato digestivo

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 B₁₂, 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

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

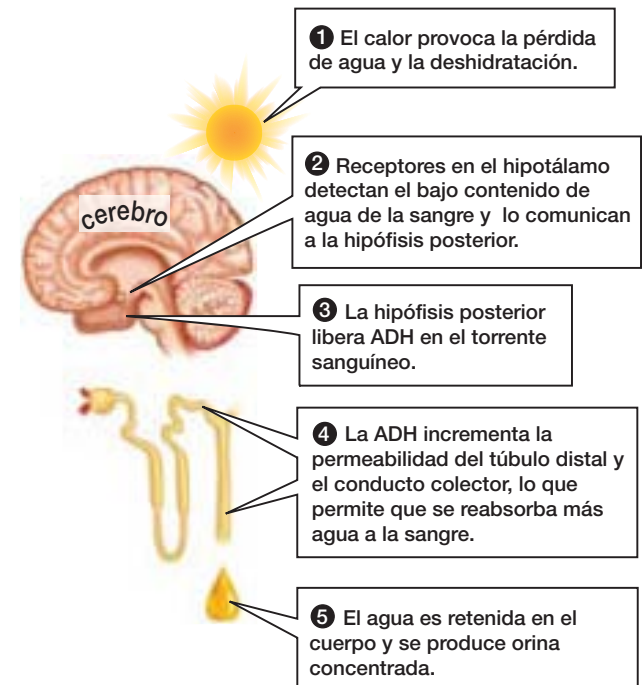


FIGURA 35-7 La deshidratación estimula la liberación de ADH y la retención de agua

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

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 distribuirlas 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


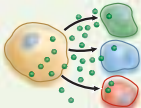
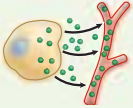

36 permiten que las células inmunitarias se comuniquen. Las **prostaglandinas**, ácidos grasos modificados que se sintetizan a partir de los fosfolípidos de las membranas, son otro tipo de hormonas locales (véase más adelante la tabla 37-2). A diferencia de casi todas las demás hormonas, que son sintetizadas 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
Directa 	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
Paracrina 	Hormonas locales	Difusión a través del líquido intersticial a las células circunvecinas que llevan receptores	Prostaglandinas
Endocrina 	Hormonas	Se transportan en el torrente sanguíneo a células cercanas o distantes que llevan consigo receptores	Insulina
Sináptica 	Neurotransmisores	Difusión de una neurona a través de un espacio estrecho (hendidura sináptica) a una célula que porta receptores	Acetilcolina

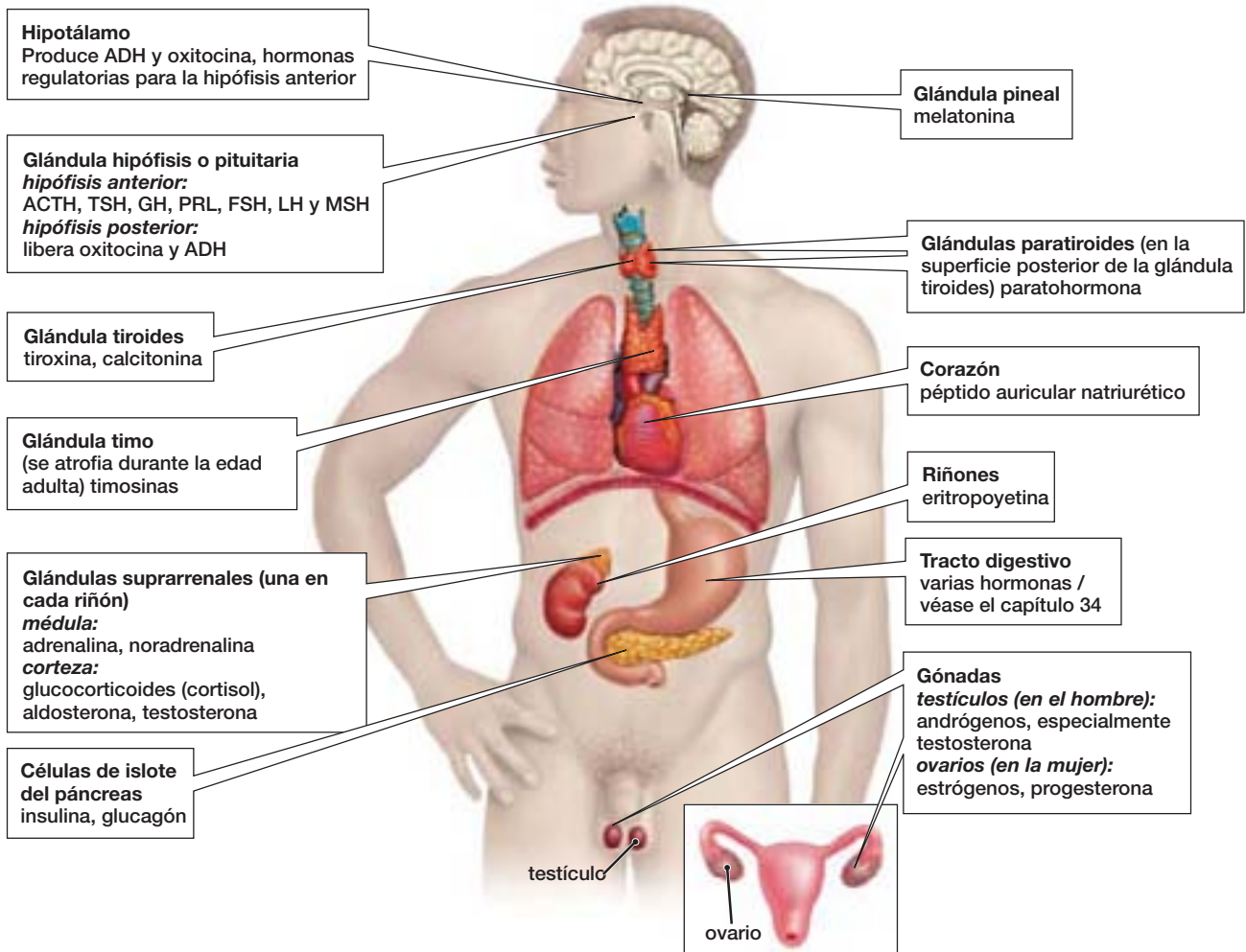


FIGURA 37-1 Principales glándulas endocrinas de los mamíferos y sus secreciones

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

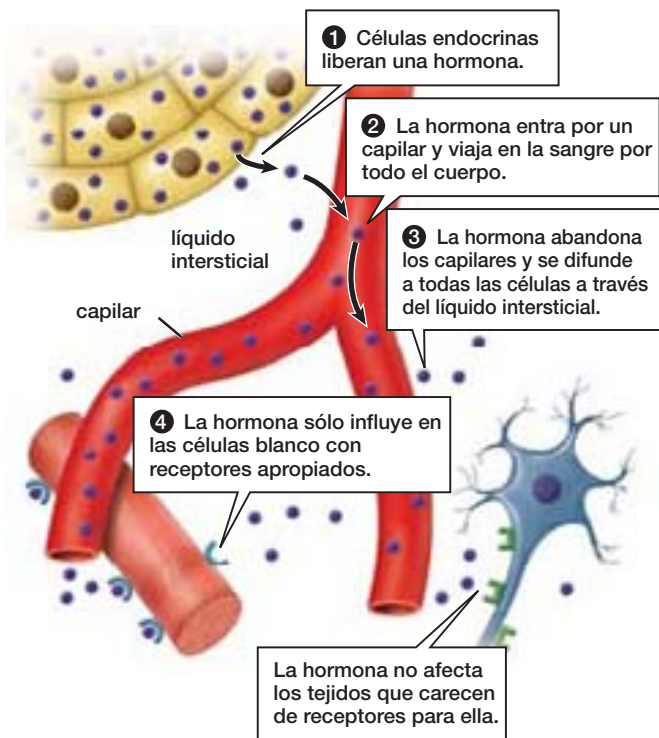


FIGURA 37-2 Una hormona llega a su destino

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)	noradrenalina <chem>Oc1ccc(O)cc1C(O)CN</chem>
	tiroxina <chem>NC(Cc1cc(I)cc(Oc2cc(I)cc(I)c2)cc1)C(=O)O</chem>
Péptidos y proteínas (sintetizados a partir de múltiples aminoácidos)	oxitocina
Esteroides (sintetizados a partir del colesterol)	testosterona <chem>CC12CCC3=C(C)CC(=O)CC4=CC(=O)CC341</chem>
	estrógeno <chem>CC12CCC3=C(C)CC(=O)CC4=CC(=O)CC341O</chem>
Prostaglandinas (sintetizadas a partir de ácidos grasos)	prostaglandina E₁ <chem>CCCCCCCCC(O)C(=O)C1=CC(O)C(O)C1</chem>

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

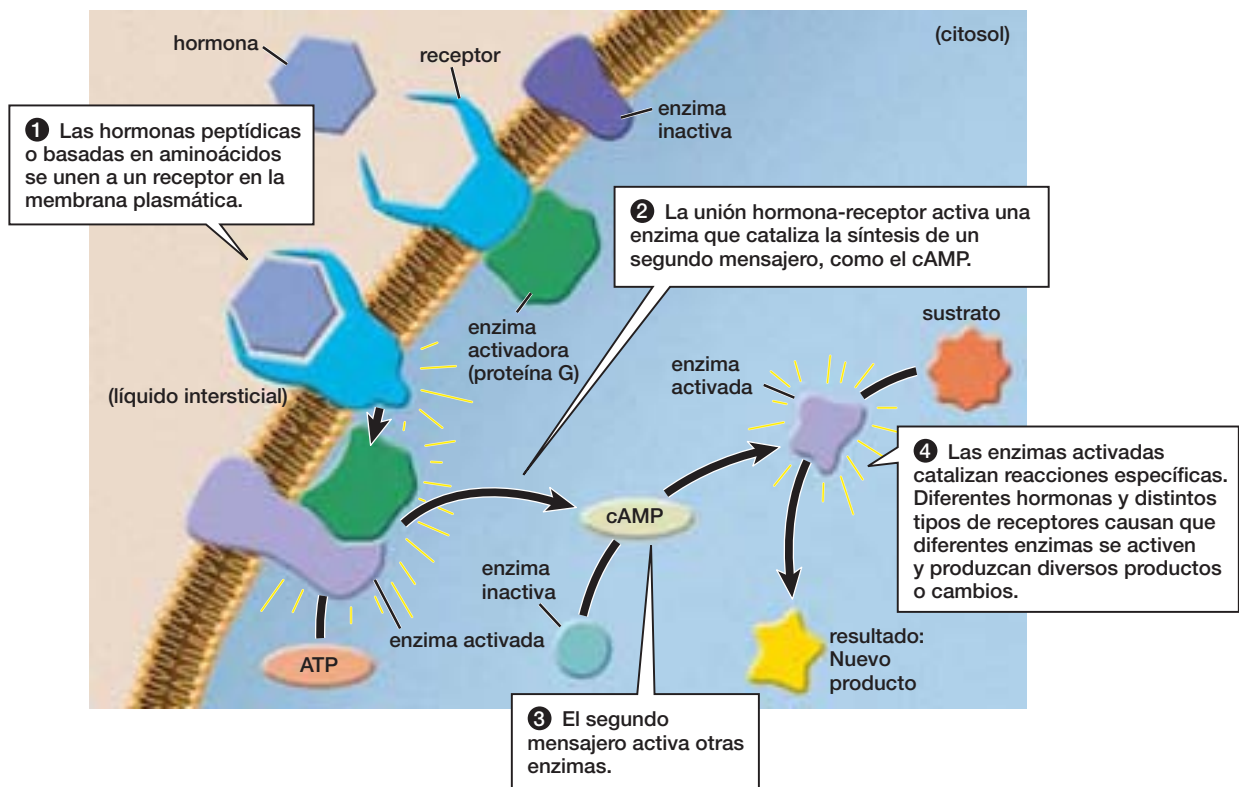


FIGURA 37-3 Cómo influyen las hormonas derivadas de péptidos o aminoácidos en las células blanco

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-

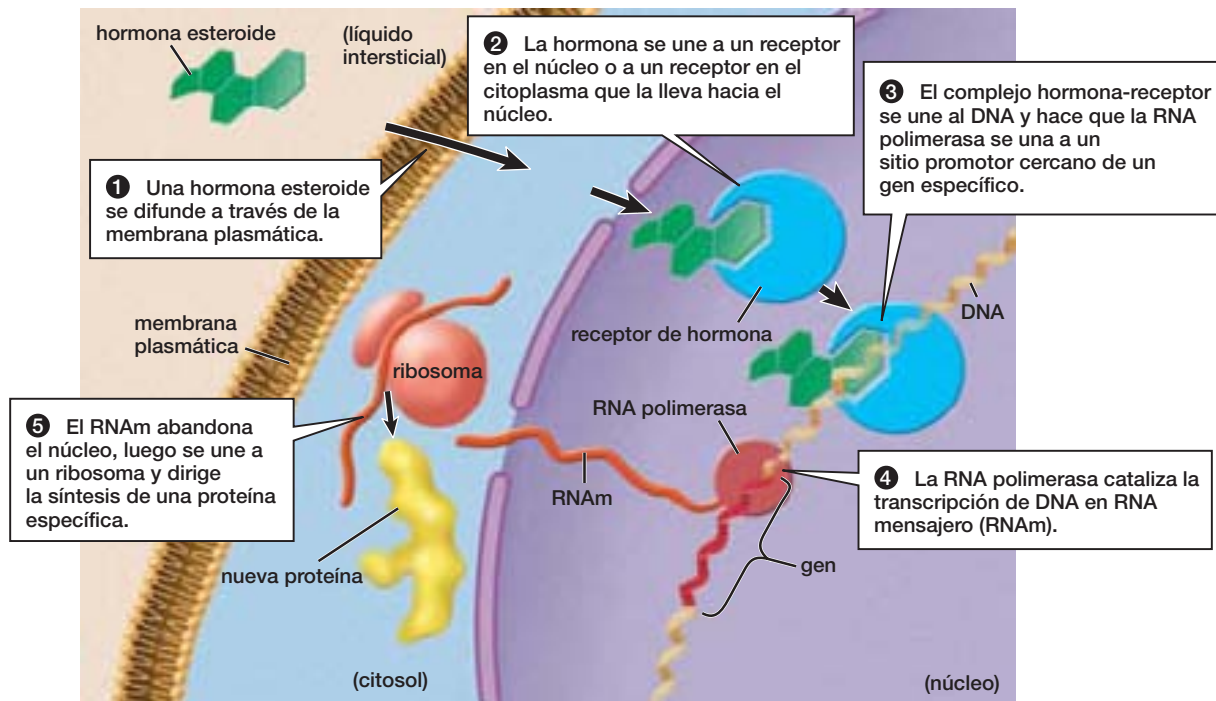


FIGURA 37-4 Hormonas esteroideas que influyen en las células blanco

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-

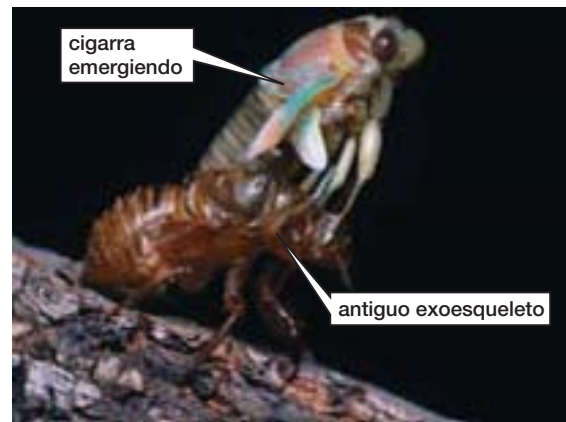


FIGURA 37-5 Insecto en proceso de muda
Una pálida cigarra emerge de su escudo de cutícula.

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 ^a	Estrógeno	Esteroide	Causa el desarrollo de las características sexuales femeninas secundarias y la maduración de los óvulos; promueve el crecimiento del revestimiento uterino.
	Progesterona	Esteroide	Estimula el desarrollo del revestimiento uterino y la formación de la placenta.
Testículos ^a	Testosterona	Esteroide	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)	Esteroide	Eleva el azúcar en la sangre; regula el metabolismo de azúcares y grasas; efectos antiinflamatorios.
	Aldosterona	Esteroide	Aumenta la reabsorción de sal en los riñones.
	Testosterona	Esteroide	Causa masculinización de las partes del cuerpo; influye en el crecimiento.
Otras fuentes de hormonas			
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 ^b	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.

^a Véase los capítulos 40 y 41.

^b Véase el capítulo 34.

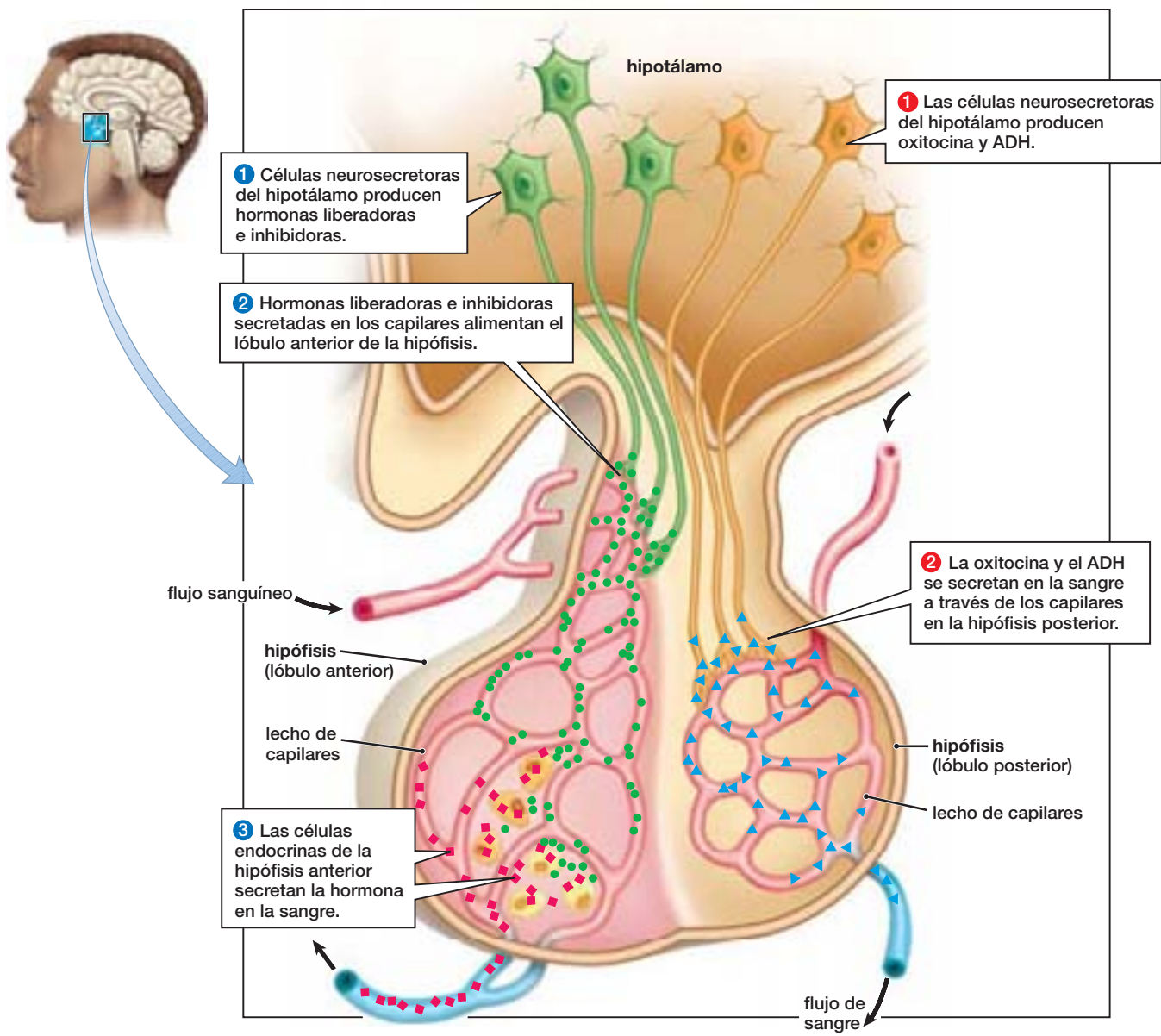


FIGURA 37-6 El hipotálamo controla la hipófisis o pituitaria

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

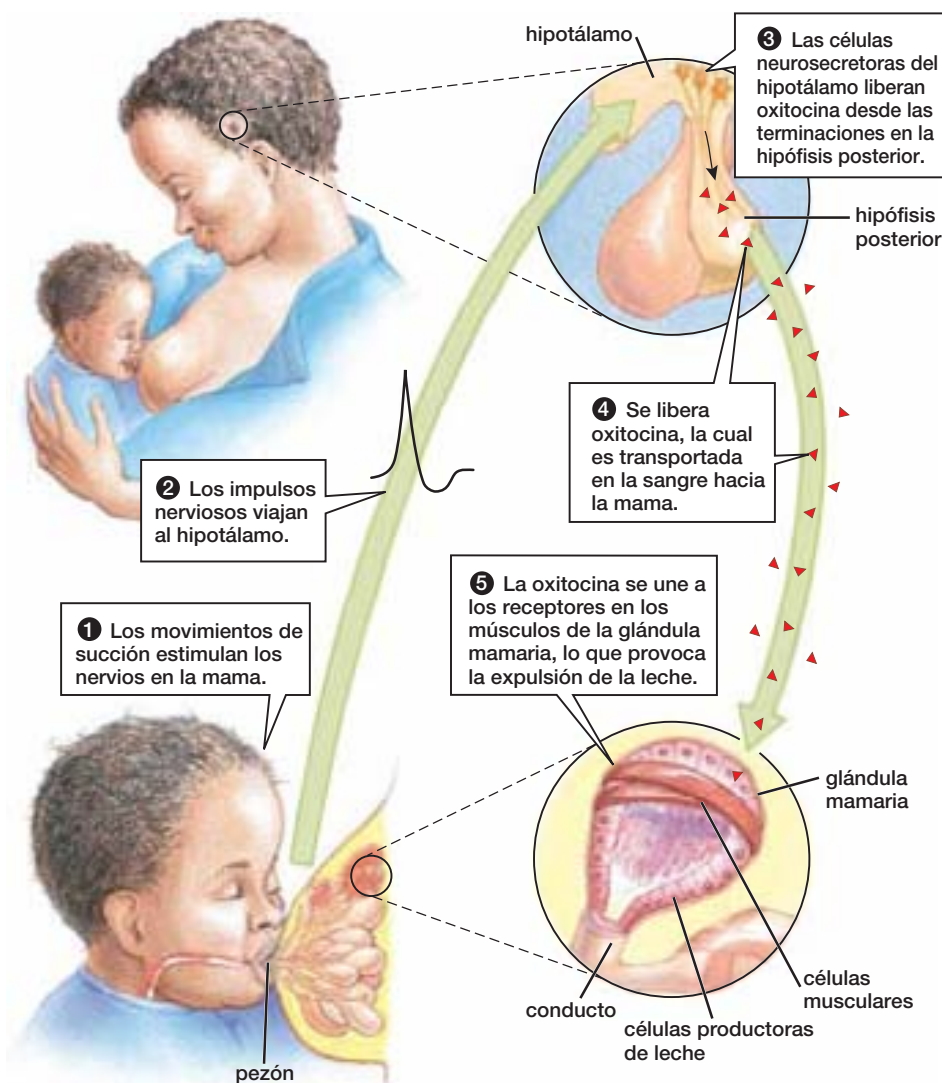


FIGURA 37-8 Hormonas y lactancia

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.

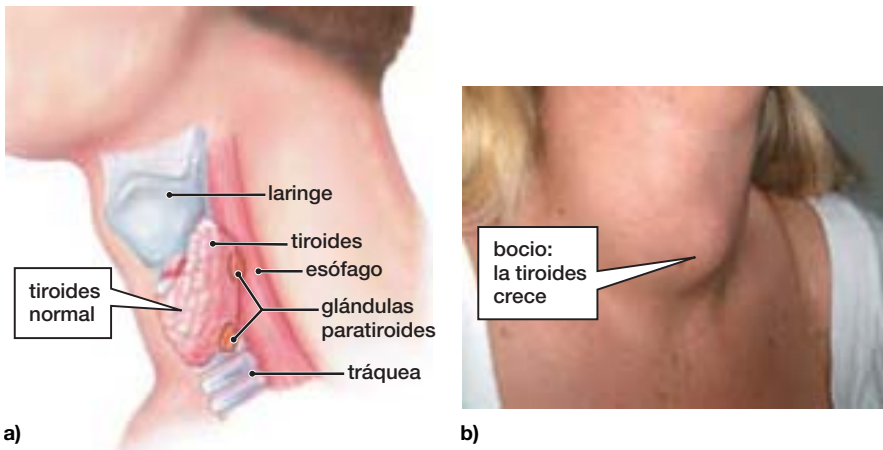


FIGURA 37-9 Las glándulas tiroides y paratiroides

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

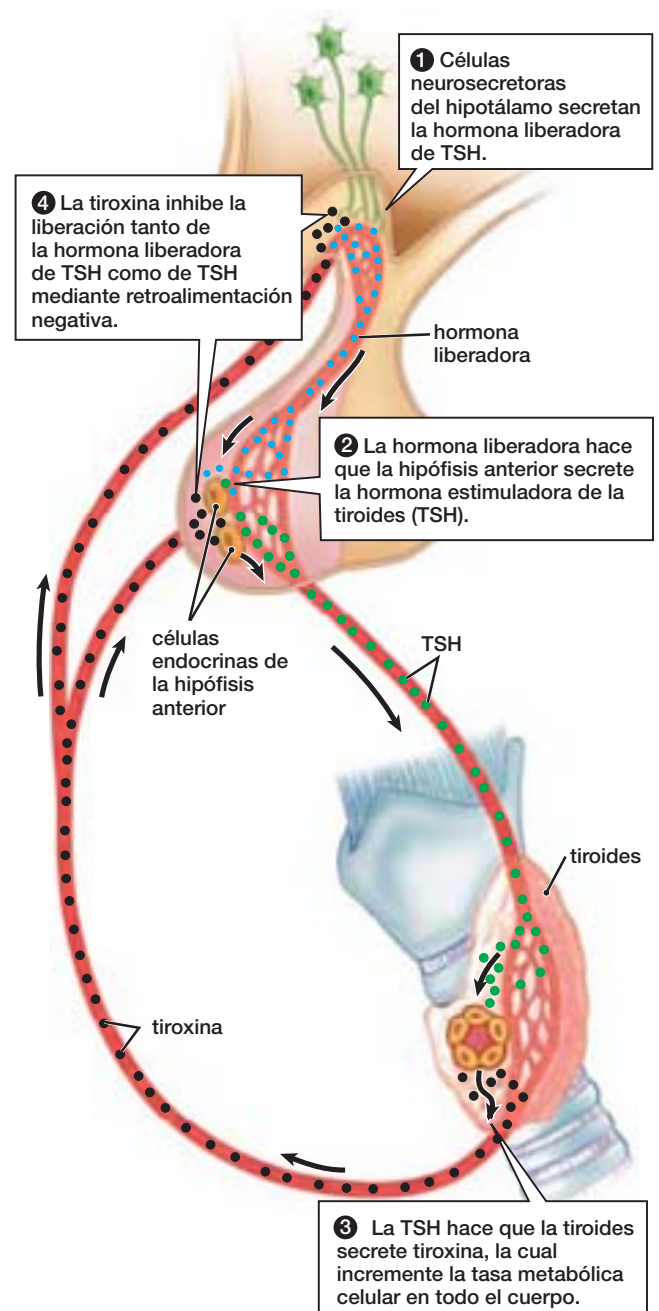


FIGURA 37-10 Retroalimentación negativa en la función de la glándula tiroides

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”.

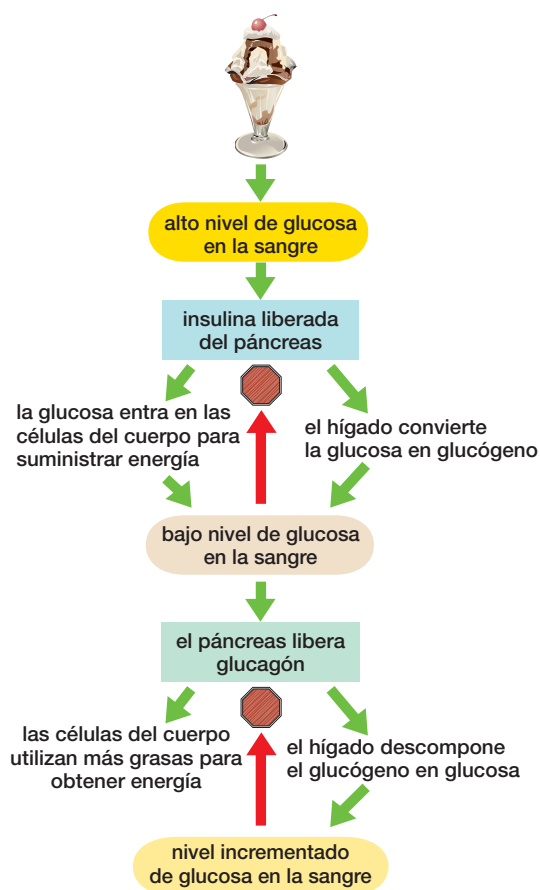


FIGURA 37-12 El páncreas controla los niveles de glucosa en la sangre

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*

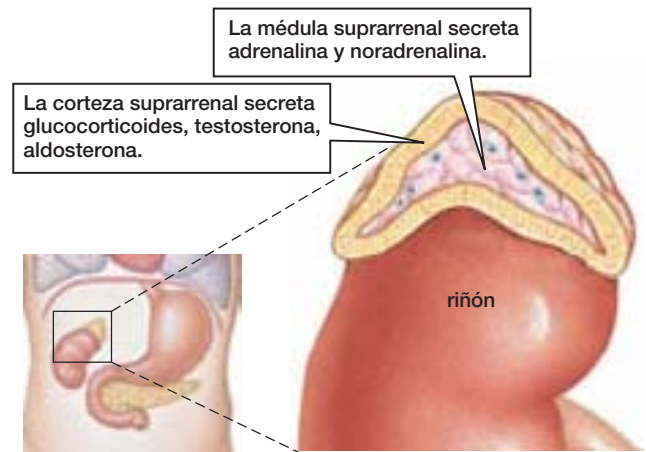


FIGURA 37-13 Las glándulas suprarrenales

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**

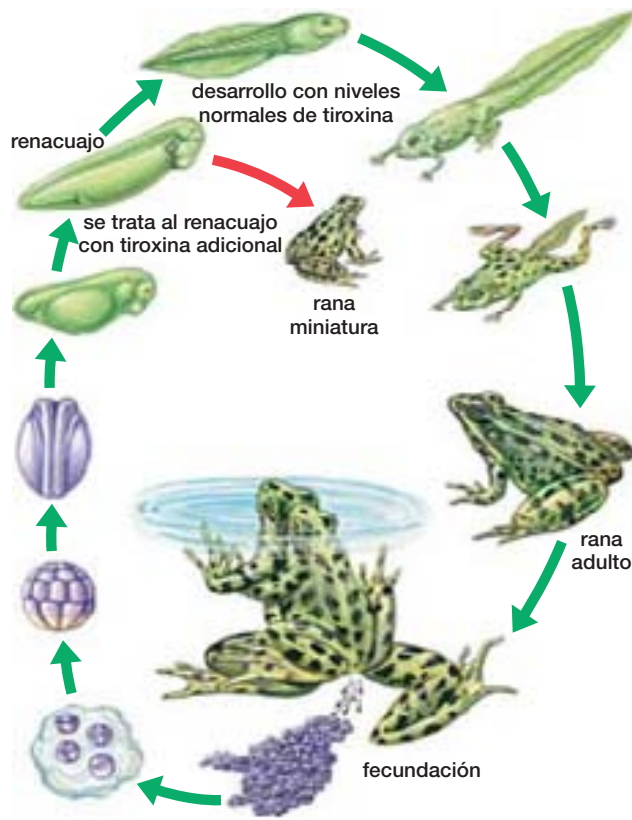


FIGURA 37-15 La tiroxina controla la metamorfosis en los anfibios

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>			