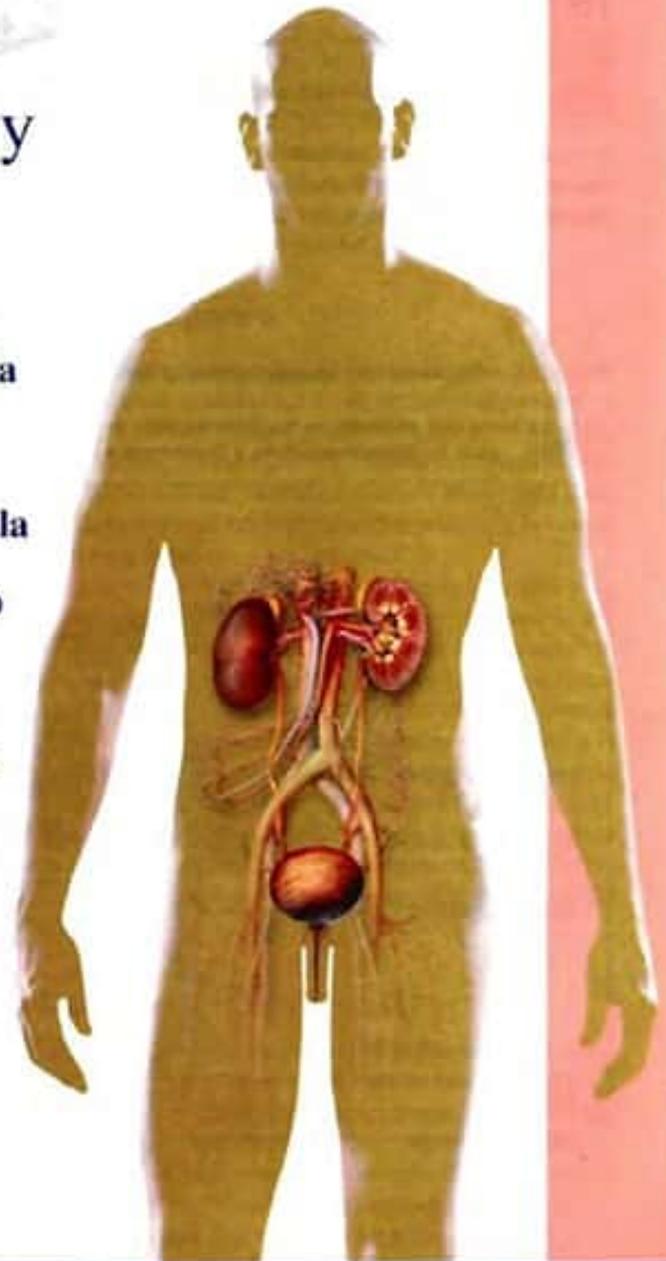


El aparato urinario

El aparato urinario y la homeostasis

El aparato urinario contribuye a la homeostasis modificando la composición, el pH, el volumen, y la presión de la sangre; manteniendo su osmolaridad, excretando los desechos y las sustancias extrañas y produciendo hormonas.





El **aparato urinario** está constituido por los dos riñones, los dos uréteres, la vejiga y la uretra (fig. 26-1). Una vez que los riñones filtran el plasma sanguíneo, devuelven la mayor parte del agua y los solutos al torrente sanguíneo. El agua y los solutos restantes constituyen la **orina**, que pasa por los uréteres y se almacena en la vejiga urinaria hasta que es evacuada a través de

la uretra. La **nefrología** (nefro-, de *nephros*, riñón, y -logía, de *lógos*, estudio) es el estudio científico de la anatomía, fisiología y patología de los riñones. La rama de la medicina que estudia los aparatos urinarios masculino y femenino y el aparato reproductor masculino es la **urología** (uro-, de *urona*, orina). El médico que se especializa en esta rama de la medicina es el **urólogo**.

GENERALIDADES DE LA FUNCIÓN RENAL

▶ OBJETIVO

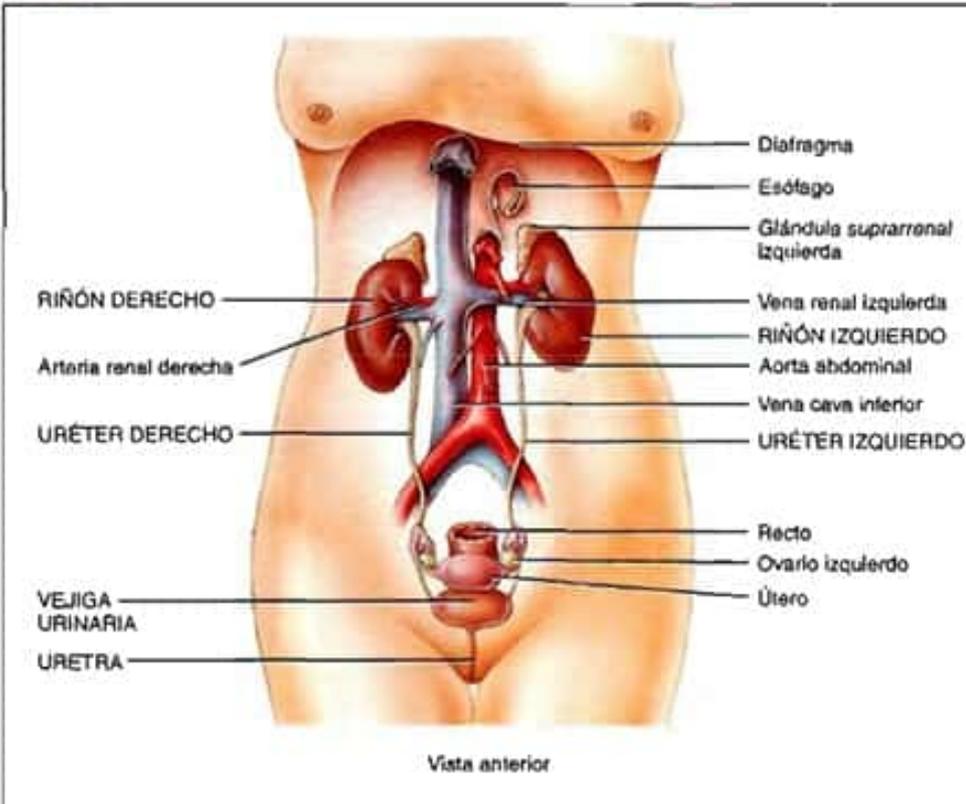
Mencionar las funciones de los riñones.

A los riñones les compete la mayor parte de la actividad del aparato urinario. Los otros sectores son vías de paso y lugares de almacenamiento. Las funciones de los riñones son las siguientes:

- **Regulación de la composición iónica de la sangre.** Los riñones ayudan a regular los niveles plasmáticos de diversos iones, en especial sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}), cloruro (Cl^-), y fosfato (HPO_4^{2-}).
- **Regulación del pH sanguíneo.** Los riñones excretan una cantidad variable de iones hidrógeno (H^+) hacia la orina y conservan los iones bicarbonato (HCO_3^-), que son importantes para amortiguar los H^+ de la sangre. Estas dos funciones contribuyen a regular el pH sanguíneo.

Fig. 26-1 Órganos del aparato urinario en la mujer.

La orina que se forma en los riñones pasa primero a los uréteres, luego a la vejiga urinaria para su almacenamiento, y finalmente a través de la uretra para su evacuación.



Funciones del aparato urinario

1. Los riñones regulan el volumen y la composición de la sangre, ayudan a regular la presión sanguínea, sintetizan glucosa, liberan eritropoyetina, participan en la síntesis de vitamina D, y excretan desechos en la orina
2. Los uréteres transportan orina desde los riñones hasta la vejiga
3. La vejiga almacena orina
4. La uretra evacúa la orina desde el cuerpo

¿Qué órganos constituyen el aparato urinario?

- **Regulación del volumen plasmático.** Los riñones regulan el volumen plasmático conservando o eliminando agua en la orina. Un aumento del volumen plasmático aumenta la presión arterial; un descenso del volumen plasmático disminuye la presión arterial.
- **Regulación de la presión arterial.** Los riñones también intervienen en la regulación de la presión arterial secretando la enzima renina, que activa al sistema renina-angiotensina-aldosterona (véase fig. 18-16). El aumento de la renina ocasiona un ascenso de la presión arterial.
- **Mantenimiento de la osmolaridad sanguínea.** Regulando por separado la pérdida de agua y la pérdida de solutos en la orina, los riñones mantienen la osmolaridad sanguínea relativamente constante alrededor de los 300 miliosmoles por litro (mOsm/L).*
- **Producción de hormonas.** Los riñones producen dos hormonas. El *calcitriol*, la forma activa de la vitamina D, ayuda a regular la homeostasis del calcio (véase fig. 18-14), y la *eritropoyetina* estimula la producción de glóbulos rojos (véase fig. 19-5).
- **Regulación de la concentración de glucosa sanguínea.** Como el hígado, los riñones pueden usar el aminoácido glutamina para la *gluconeogénesis*, la síntesis de nuevas moléculas de glucosa, y luego liberar glucosa a la sangre para mantener su nivel normal.
- **Excreción de desechos y sustancias extrañas.** Mediante la formación de orina los riñones excretan **desechos**, sustancias que no tienen una función útil en el organismo. Algunos de los desechos excretados con la orina son el producto de reacciones metabólicas en el organismo, como el amoníaco y la urea de la desaminación de los aminoácidos; la bilirrubina del catabolismo de la hemoglobina; la creatinina de la degradación de fosfocreatina en las fibras musculares, y el ácido úrico del catabolismo de los ácidos nucleicos. Otros residuos que se excretan con la orina son sustancias que no pertenecen a la dieta, como fármacos y toxinas ambientales.

► PREGUNTAS DE REVISIÓN

1. ¿Qué son los desechos, y cómo participan los riñones en su eliminación del organismo?

*La **osmolaridad** de una solución es una medida del número total de partículas disueltas por litro de solución. Las partículas pueden ser moléculas, iones, o una mezcla de ambos. Para calcular la osmolaridad, se multiplica la molaridad (véase p. 41) por el número de partículas por molécula, una vez que la molécula está disuelta. Un término similar, **osmolaridad**, es el número de partículas de soluto por kilogramo de agua. Debido a que es más fácil medir volúmenes de soluciones que determinar la masa de agua que contienen, la osmolaridad se usa con más frecuencia que la osmolaridad. La mayoría de los líquidos del organismo y las soluciones que se usan en la clínica son diluciones, en cuyo caso hay menos de 1% de diferencia entre las dos medidas.

ANATOMÍA E HISTOLOGÍA DE LOS RIÑONES

► OBJETIVOS

Describir las principales características anatómicas e histológicas de los riñones.

Describir el flujo sanguíneo a través de los riñones.

Describir la estructura de los corpúsculos y de los túbulos renales.

Los **riñones** son órganos pares, de color rojizo y de forma de alubia (poroto, frijol o judía), situados en los flancos, entre el peritoneo y la pared posterior del abdomen. Como su localización es posterior con respecto al peritoneo de la cavidad abdominal, se dice que son órganos **retroperitoneales** (retro-, de *retro*, detrás) (fig. 26-2). Los riñones se localizan entre la última vértebra torácica y la tercera vértebra lumbar, allí están protegidos en forma parcial por la undécima y duodécima costilla. El riñón derecho está un poco descendido que el izquierdo (véase fig. 26-1) porque el hígado ocupa un espacio considerable en el lado derecho por encima del riñón.

Anatomía de los riñones

El riñón típico de un adulto mide 10-12 cm de largo, 5-7 cm de ancho y 3 cm de espesor—casi el tamaño de un jabón de tocador—y pesa de 135-150 g. El borde cóncavo interno de cada riñón mira hacia la columna vertebral (véase fig. 26-1). Cerca del centro de ese borde interno se encuentra una escotadura llamada **hilio renal** (véase fig. 26-3), a través del cual emergen el uréter junto con los vasos sanguíneos, los vasos linfáticos y los nervios.

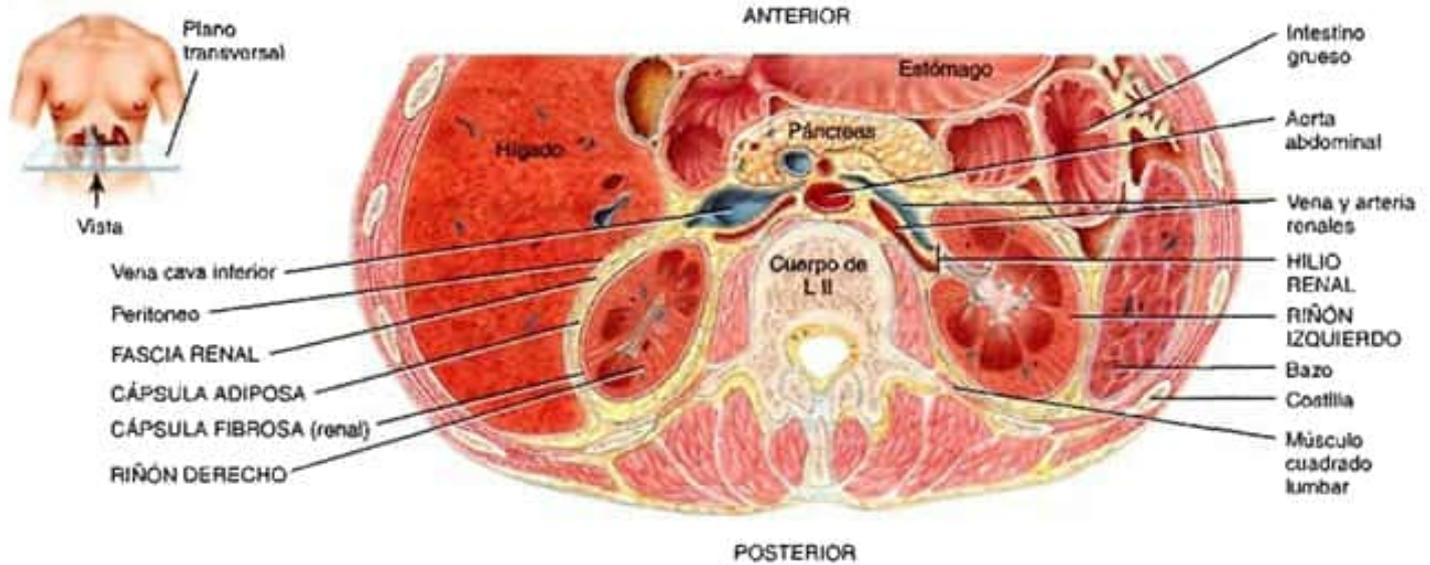
Cada riñón está cubierto por tres capas de tejido (fig. 26-2). La capa más profunda, la **cápsula fibrosa (renal)**, es una capa lisa y transparente de tejido conectivo denso irregular que se continúa con la capa externa del uréter. Sirve como una barrera contra los traumatismos y ayuda a mantener la forma del riñón. La capa intermedia, la **cápsula adiposa**, es una masa de tejido adiposo que rodea a la cápsula renal. También protege al riñón de los traumatismos y lo sostiene de manera firme en su lugar dentro de la cavidad abdominal. La capa superficial, la **fascia renal**, es una capa fina de tejido conectivo denso irregular que fija al riñón a las estructuras que lo rodean y a la pared abdominal. En la superficie anterior de los riñones la fascia renal es profunda con respecto al peritoneo.

Ptosis renal (riñón flotante)

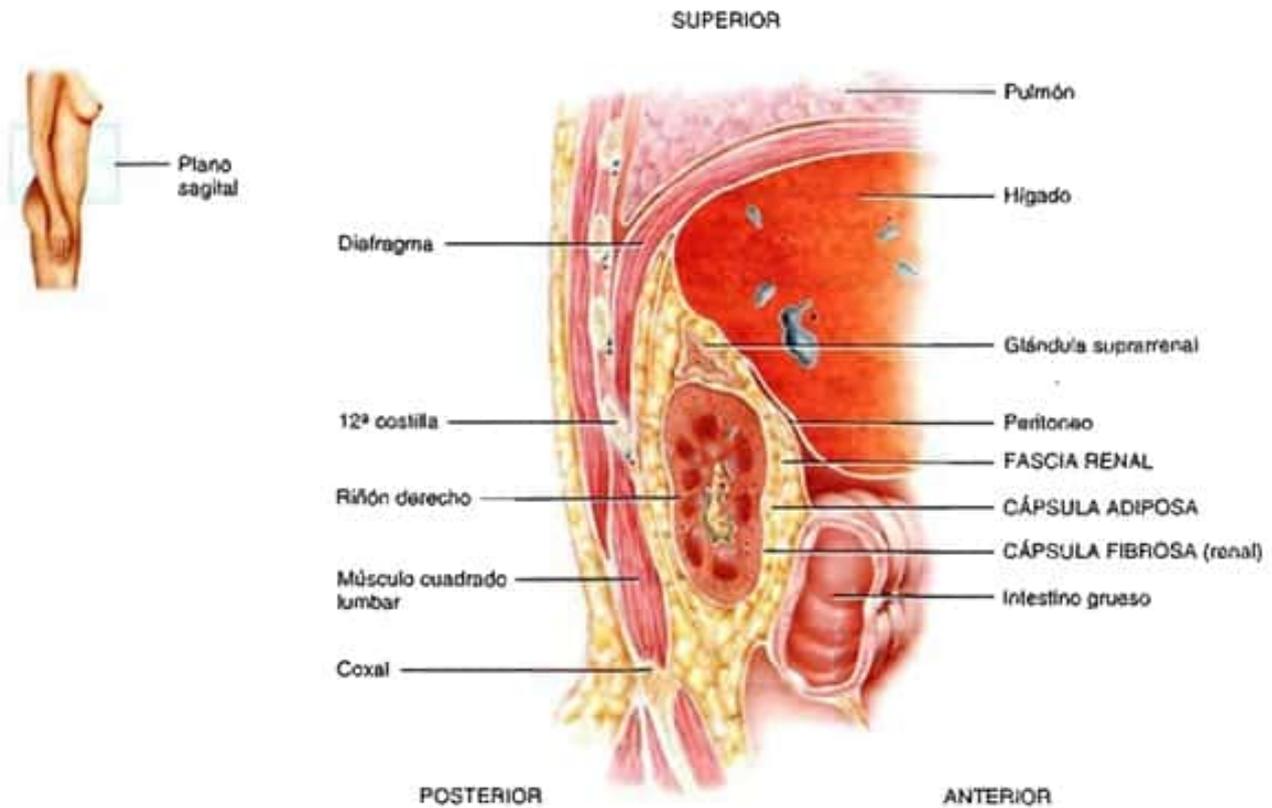
La **ptosis renal** (de *ptosis*, caída), o **riñón flotante**, es el desplazamiento hacia abajo o caída del riñón cuando éste se desliza de su posición normal porque los órganos adyacentes o la cubierta adiposa no lo sostienen en forma adecuada. La ptosis renal se desarrolla más a menudo en personas muy delgadas cuya cápsula de tejido adiposo o la fascia renal es deficiente. Es peligroso porque el uréter puede acodarse y obstruir el flujo de orina. La acumulación de orina resultante ejerce presión en el riñón, lo cual daña al tejido renal. El acodamiento del uréter también causa dolor. La ptosis renal es muy común; aproximadamente 1 de cada 4 personas tiene cierto grado de debilitamiento de las bandas fibrosas que sostienen al riñón en su lu-

Fig. 26-2 Posición y envolturas de los riñones.

Los riñones están rodeados por la cápsula renal, una cápsula adiposa y la fascia renal.



(a) Vista inferior de un corte transversal del abdomen (L2)

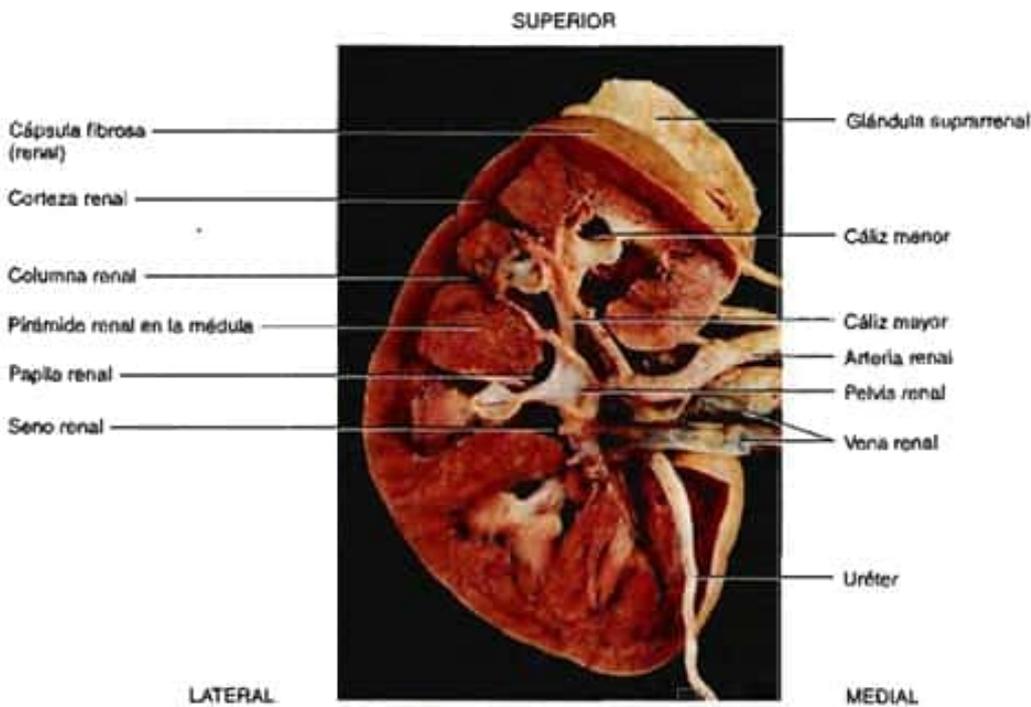
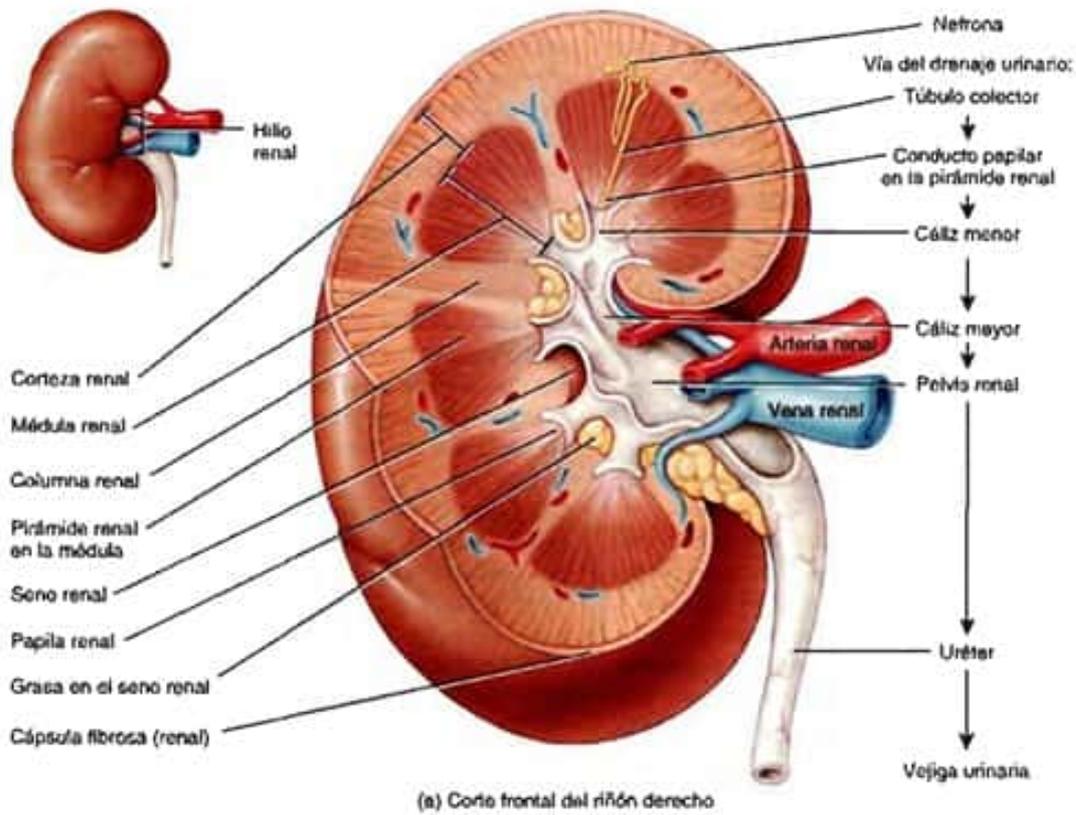


(b) Corte sagital del riñón derecho

¿Por qué se dice que los riñones son retroperitoneales?

Fig. 26-3 Anatomía interna de los riñones.

Las dos regiones principales del parénquima renal son la corteza y las pirámides en la médula renal.



(b) Corte frontal del riñón derecho

¿Qué estructuras pasan a través del hilio renal?

gar. Es 10 veces más común en las mujeres que en los hombres. Como se produce en el transcurso de la vida resulta muy fácil distinguirla de las anomalías congénitas. ■

Histología de los riñones

Un corte frontal del riñón muestra dos regiones distintas: un área superficial, de color rojizo y de textura lisa, llamada **corteza renal**, y una región profunda, de color pardorrojizo, la **médula renal** (fig. 26-3). La médula presenta entre 8 y 18 **pirámides renales** de forma cónica. La base (extremo más ancho) de cada pirámide está dirigida hacia la corteza renal, y su vértice (extremo más angosto), llamada **papila renal**, se orienta hacia el hilio renal. La corteza renal es el área de textura lisa que se extiende desde la cápsula hasta las bases de las pirámides renales y hacia los espacios entre éstas. Se divide en una **zona cortical externa** y una **zona yuxtamedular interna**. Esas porciones de la corteza renal que se extienden entre las pirámides renales se llaman **columnas renales**. Un **lóbulo renal** consiste en una **pirámide renal**, la parte de corteza que la rodea y la mitad de cada columna adyacente.

Juntas, la corteza y las pirámides renales de la médula constituyen el **parénquima** (porción funcional) del riñón. Dentro del parénquima se encuentran las unidades funcionales del riñón: cerca de 1 millón de estructuras microscópicas llamadas **nefronas**. La orina que se forma en las nefronas drena en largos **conductos papilares**, que se extienden a través de la papila renal de las pirámides. Los conductos papilares drenan en estructuras en forma de copa llamadas **cálices menores** y **mayores**. Cada riñón tiene de 8 a 18 cálices menores y de 2 a 3 cálices mayores. Un cáliz menor recibe orina de los conductos papilares de una papila renal y la envía a una gran cavidad única, la **pelvis renal**, y luego por el uréter hacia la vejiga urinaria.

El hilio se abre en una cavidad dentro del riñón que se denomina el **seno renal** y que contiene parte de la pelvis, los cálices y ramas de los vasos sanguíneos y los nervios renales. El tejido adiposo ayuda a estabilizar la posición de estas estructuras en el seno renal.

Irrigación e inervación de los riñones

Puesto que los riñones eliminan desechos de la sangre y regulan su volumen y su composición iónica, no es sorprendente que estén muy vascularizados. A pesar de que constituyen menos del 0,5% de la masa corporal total, reciben entre el 20 y el 25% del gasto cardíaco de reposo a través de las **arterias renales** derecha e izquierda (fig. 26-4). En los adultos, el **flujo sanguíneo renal**, el flujo de sangre a través de ambos riñones, es de alrededor de 1 200 mL por minuto.

Dentro del riñón, la arteria renal se divide en **arterias segmentarias** que irrigan a distintos segmentos (áreas). Cada arteria segmentaria da diversas ramas que ingresan en el parénquima y pasan a través de las columnas entre las pirámides como **arterias interlobulares**. En la base de las pirámides, las arterias interlobulares se arquean entre la médula renal y la corteza; se las conoce entonces como **arterias arcuatas** o **arciformes** (*arcus*, arco). Las divisiones de las arterias arciformes dan lugar a una serie de **arterias interlobulillares**. Estas arterias se llaman así porque pasan entre

los lobulillos renales. Las arterias interlobulillares entran en la corteza renal y dan las ramas conocidas como **arteriolas aferentes** (de *afferens*, que lleva).

Cada nefrona recibe una arteriola aferente, que se divide en una red capilar profusa en forma de ovillo: el **glomérulo** (diminutivo de *glomus*, ovillo). Los capilares glomerulares luego se reúnen para formar la arteriola **eferente** (e-, de *ex*, fuera de) que transporta sangre fuera del glomérulo. Los capilares glomerulares son únicos entre los capilares del organismo porque están situados entre dos arteriolas, en lugar de interponerse entre una arteriola y una vénula. Como son redes capilares y también desempeñan un papel importante en la formación de orina, se considera a los glomérulos tanto parte del aparato cardiovascular como del aparato urinario.

Las arteriolas eferentes se ramifican para formar los **capilares peritubulares** (*peri-*, *de* *perí*, alrededor de) que rodean a las porciones tubulares de la nefrona en la corteza renal. De algunas arteriolas eferentes parten capilares largos llamados **vasos rectos** que irrigan a las porciones tubulares de las nefronas en la médula renal (véase fig. 26-5b).

Los capilares peritubulares posteriormente se reúnen para formar las **vénulas peritubulares** y luego las **venas interlobulillares**, las cuales también reciben sangre de los vasos rectos. La sangre dreña después por las **venas arcuatas** en las **venas interlobulares** que transcurren entre las pirámides renales. La sangre abandona el riñón a través de una única **vena renal** que sale por el hilio y desemboca en la vena cava inferior.

La mayor parte de los nervios renales se originan en el **ganglio celiaco** y pasan a través del **plexo renal** hacia los riñones junto con las arterias. Los nervios renales pertenecen a la división simpática del sistema nervioso autónomo. En gran medida son nervios vasomotores que regulan el flujo de sangre a través del riñón provocando vasoconstricción y vasodilatación de las arteriolas renales.



Trasplante de riñón

El **trasplante de riñón** es la transferencia del riñón de un donante a un receptor cuyos riñones no funcionan más. En el procedimiento, el riñón del donante se coloca en la pelvis del receptor a través de una incisión abdominal. La arteria renal y la vena del riñón trasplantado se anastomosan a la arteria y venas renales del receptor. El uréter del riñón trasplantado se anastomosa luego a la vejiga urinaria. Durante el procedimiento, el paciente sólo recibe un riñón del donante, ya que se necesita un solo riñón para mantener una función renal adecuada. Los riñones no funcionantes se dejan habitualmente en su sitio. Como en todos los trasplantes de órganos, los receptores de trasplante renal deben estar atentos a signos de infección o rechazo del órgano. El receptor debe recibir fármacos inmunosupresores por el resto de su vida para evitar el rechazo del órgano "extraño". ■

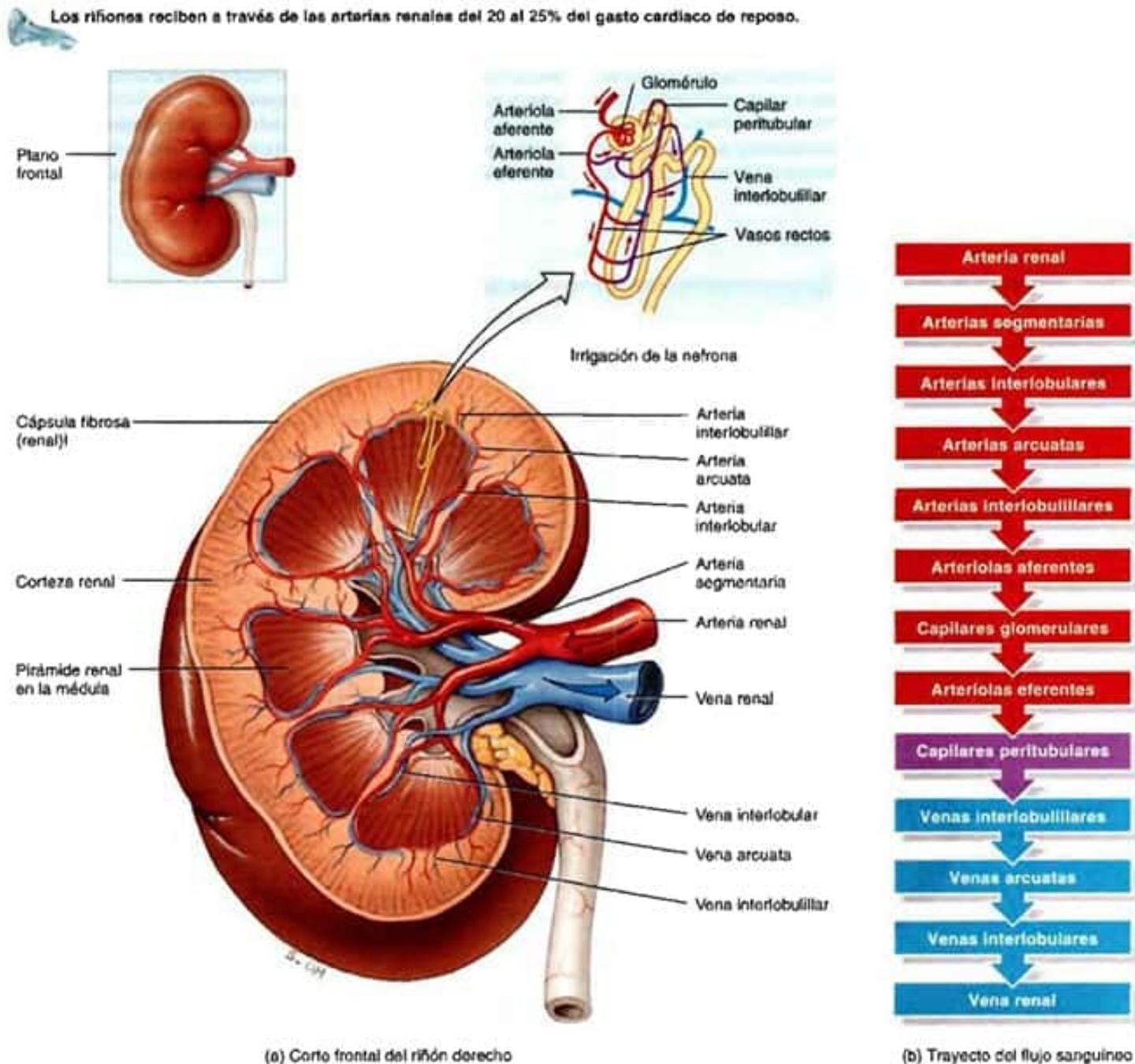
La nefrona

Partes de la nefrona

Las nefronas son las unidades funcionales de los riñones. Cada nefrona (fig. 26-5) consta de dos partes: un **corpúsculo renal**,

Fig. 26-4 Irrigación de los riñones.

Los riñones reciben a través de las arterias renales del 20 al 25% del gasto cardíaco de reposo.



¿Qué volumen de sangre entra en las arterias renales por minuto?

donde se filtra el plasma sanguíneo, y un **túbulo renal**, hacia el cual pasa el líquido filtrado. Los dos componentes del corpúsculo renal son el **glomérulo** (red capilar) y la **cápsula glomerular** (de **Bowman**), una cubierta epitelial de pared doble que rodea a los ca-

pilares glomerulares. El plasma sanguíneo se filtra en la cápsula glomerular y luego el líquido filtrado pasa al túbulo renal, que tiene tres sectores principales. En el orden en que el líquido los recorre, ellos son: 1) el **túbulo contorneado proximal**; 2) el **asa de**

Henle, y 3) el **túbulo contorneado distal**. El término *proximal* denota la parte del túbulo unida a la cápsula glomerular, y *distal* indica la parte que está más alejada. *Contorneado* significa que el túbulo está muy enrollado. El corpúsculo renal y ambos túbulos contorneados se hallan dentro de la corteza renal; el asa de Henle se extiende hacia la médula renal, hace una U, y luego regresa a la corteza renal.

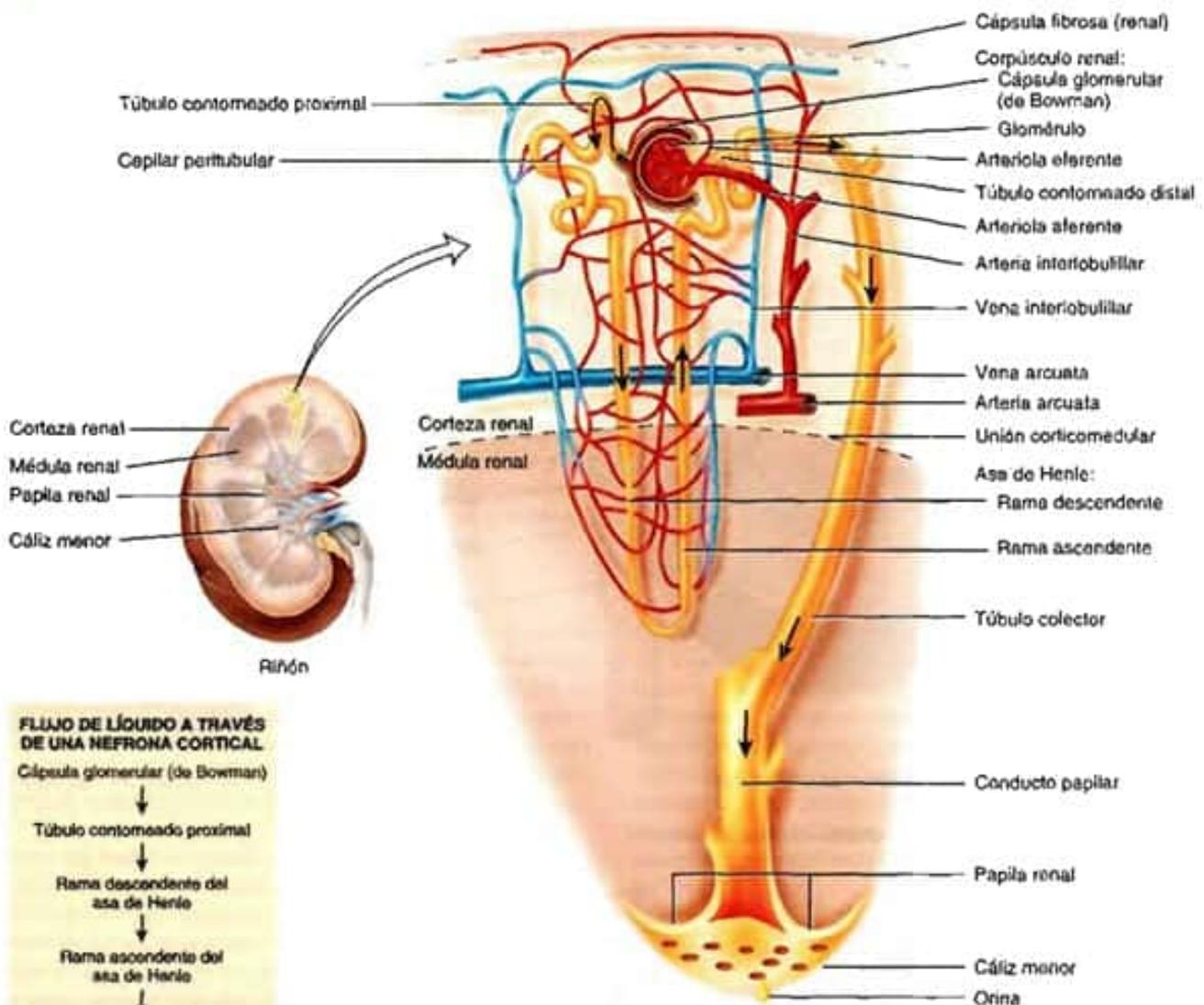
Los túbulos contorneados distales de diversas nefronas se vacían en un solo **túbulo colector**. Los túbulos colectores luego se

unen y convergen en varios cientos de grandes **conductos papilares**, que drenan en los cálices menores. Los túbulos colectores y los conductos papilares se extienden desde la corteza a través de la médula hacia la pelvis renal, de manera que un riñón tiene alrededor de un millón de nefronas, pero un número mucho menor de túbulos colectores y aun menor de conductos papilares.

En una nefrona, el asa de Henle conecta los túbulos contorneados proximal y distal. La primera porción penetra en la médula renal, donde recibe el nombre de **rama descendente** (fig. 26-5). Luc-

Fig. 26-5 Estructura de las nefronas (de color amarillo oscuro) y vasos sanguíneos asociados. (a) Una nefrona cortical; (b) una nefrona yuxtamedular.

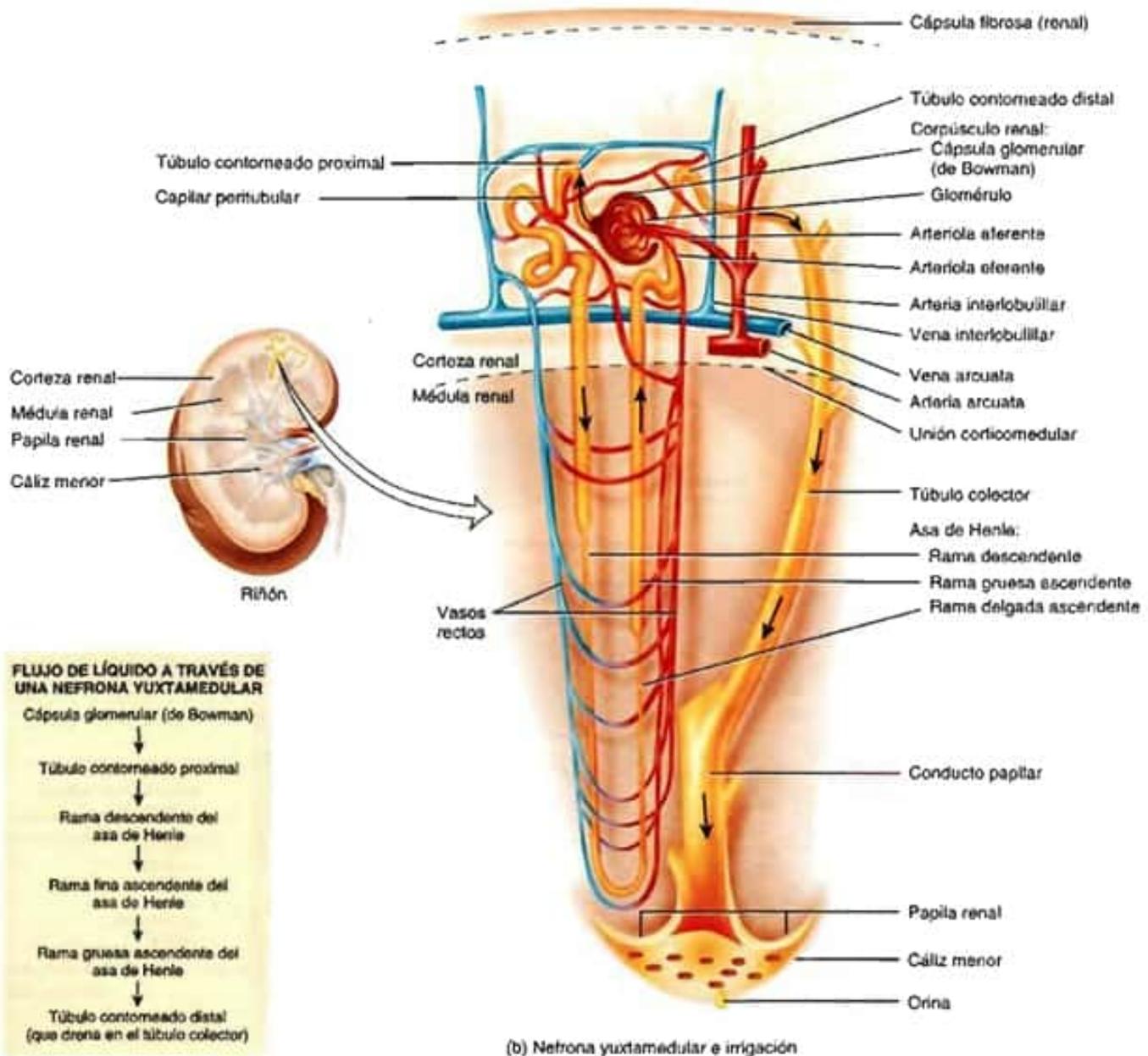
Las nefronas son las unidades funcionales de los riñones.



(a) Nefrona cortical e irrigación sanguínea

go hace una U y regresa a la corteza renal como la **rama ascendente**. Cerca del 80-85% de las nefronas son **nefronas corticales**. Sus corpúsculos renales se encuentran en la región externa de la corteza renal, y tienen asas de Henle *cortas* que yacen principalmente en la corteza y atraviesan sólo la región externa de la médula (fig. 26-5a). Las asas de Henle cortas reciben su irrigación de los capilares peritubulares que emergen de las arteriolas eferentes. El otro 15-20% de las nefronas son las **nefronas yuxtamedulares** (yuxta-, de *iuxta*, cerca de). Sus corpúsculos renales se hallan en la profundidad de la

corteza, cerca de la médula, y tienen un asa de Henle *larga* que se extiende hasta la región más profunda de la médula (fig. 26-5b). Las asas de Henle largas son irrigadas por los capilares peritubulares y los vasos rectos que emergen de las arteriolas eferentes. Además, la parte ascendente del asa de Henle de las nefronas yuxtamedulares comprende dos porciones: una **rama ascendente fina**, seguida de una **rama ascendente gruesa** (fig. 26-5b). La luz de la porción ascendente fina es igual que en otras áreas del túbulo renal, sólo que el epitelio es más fino. Las nefronas con asas de Henle largas le per-



¿Cuáles son las tres diferencias básicas entre las nefronas corticales y las yuxtamedulares?

miten a los riñones excretar orina muy diluida o muy concentrada (véase pp. 1023-1026).

Histología de la nefrona y el túbulo colector

Una capa simple de células epiteliales forma toda la pared de la cápsula glomerular, el túbulo renal y los conductos. Sin embargo,

cada parte tiene características histológicas distintivas que reflejan las funciones particulares. Las describiremos en el orden en el que el líquido fluye a través de este: la cápsula glomerular, el túbulo renal y el túbulo colector.

CÁPSULA GLOMERULAR La cápsula glomerular (de Bowman) está constituida por las capas visceral y parietal (fig. 26-6a). La ca-

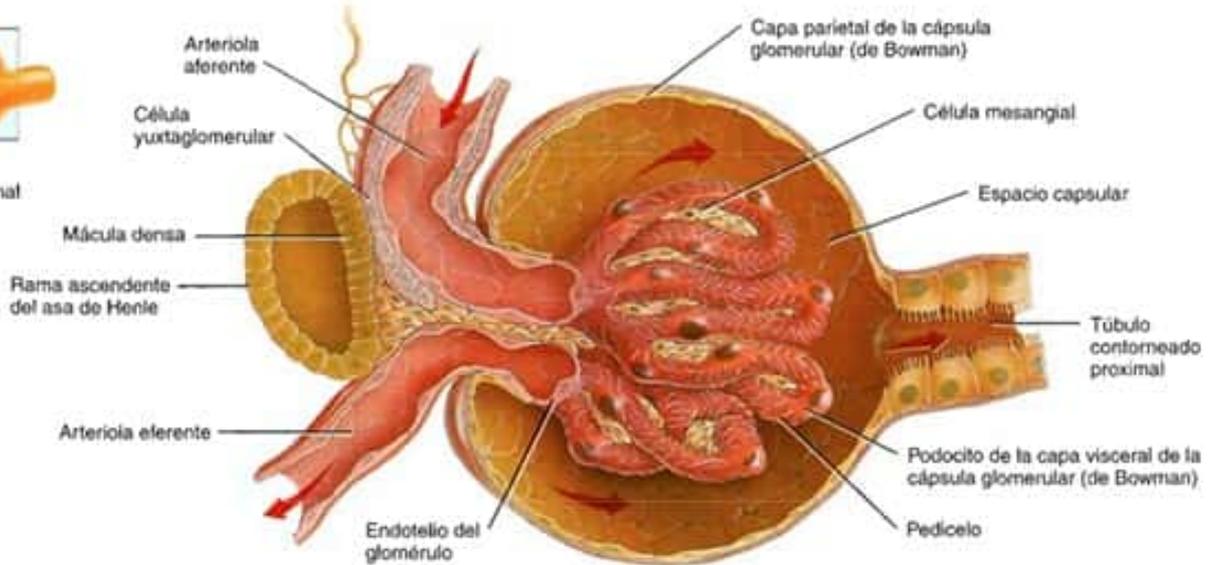
Fig. 26-6 Histología del corpúsculo renal.



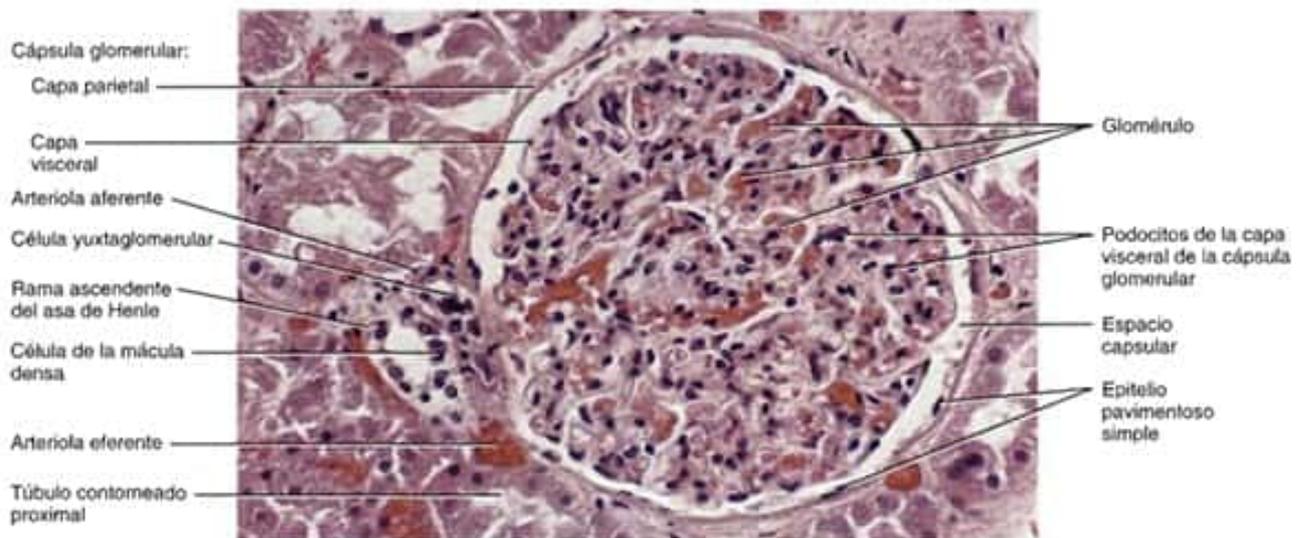
Un corpúsculo renal está formado por la cápsula glomerular (de Bowman) y el glomérulo.



Corpúsculo renal (vista externa)



(a) Corpúsculo renal (vista interna)



(b) Corpúsculo renal



¿La microfotografía en (b) es de una sección de la corteza o de la médula renal? ¿Cómo lo sabe?

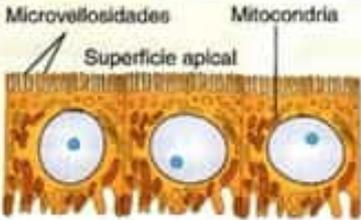
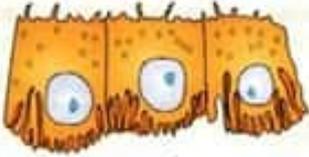
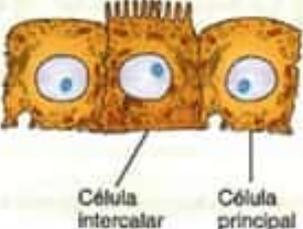
pa visceral consiste en células epiteliales planas simples modificadas, llamadas **podocitos** (podo-, de *podós*, pie, y -cito, de *kytos*, célula). Las numerosas proyecciones en forma de pie de estas células (**pedicelos**) rodean la capa simple de células endoteliales de los capilares glomerulares y forman la pared interna de la cápsula. La capa parietal externa de la cápsula glomerular consiste en epitelio pavimentoso (plano) simple. El líquido filtrado de los capilares glomerulares entra en el espacio capsular, que se encuentra entre las dos capas de la cápsula glomerular. El glomérulo puede concebirse como un puño haciendo presión sobre un globo blando (la cápsula glomerular) hasta que el puño queda cubierto por dos capas del globo (capas visceral y parietal) con un espacio entre éstas (el espacio capsular).

TÚBULO RENAL Y TÚBULO COLECTOR El cuadro 26-1 ilustra las características de las células que forman el túbulo renal y el túbulo colector. En el túbulo contorneado proximal, hay células epiteliales cúbicas simples con un borde en cepillo de microvellosi-

dades en su superficie apical (superficie que mira hacia la luz). Estas microvellosidades, como las del intestino delgado, aumentan la superficie de absorción y secreción. La rama descendente del asa de Henle y la primera parte de la rama ascendente (la porción ascendente delgada) están compuestas por epitelio pavimentoso (plano) simple (recuérdese que las nefronas corticales o de asa corta carecen de porción ascendente delgada). La porción ascendente gruesa del asa de Henle está compuesta por epitelio cúbico simple a cilíndrico bajo.

En cada nefrona, la parte final de la rama ascendente del asa de Henle toma contacto con la arteriola aferente que nutre a ese corpúsculo renal (fig. 26-6a). Como las células cilíndricas del túbulo en esta región están muy juntas, se las conoce como **mácula densa**. A lo largo de la mácula densa, las paredes de la arteriola aferente (y a veces la arteriola eferente) contienen fibras musculares lisas, a las que se denomina **células yuxtglomerulares (YG)**. Junto con la mácula densa, constituyen el **aparato yuxtglomerular (AYG)**. Como se menciona más adelante, el AYG ayuda a regular la presión

CUADRO 26-1 Características histológicas del túbulo renal y el túbulo colector

Región e histología		Descripción
Túbulo contorneado proximal (TCP)		Epitelio cúbico simple con borde en cepillo de microvellosidades
Asa de Henle: rama descendente y rama ascendente delgada		Epitelio plano o pavimentoso simple
Asa de Henle: rama ascendente gruesa		Epitelio cúbico simple a cilíndrico bajo
La mayor parte de los túbulos contorneados distales (TCD)		Epitelio cúbico simple
Última porción del TCD y todo el túbulo colector		Epitelio cúbico simple formado por células principales y células intercalares

arterial dentro de los riñones. El túbulo conorneado distal (TCD) comienza poco después de la mácula densa. En la última parte del TCD y continuando hacia los túbulos colectores, se presentan dos tipos celulares diferentes. La mayoría son **células principales**, que tienen receptores tanto para la hormona antidiurética (HAD) como para la aldosterona, hormonas que regulan sus funciones. En un número menor se encuentran las **células intercalares**, que participan en la homeostasis del pH sanguíneo. Los túbulos colectores drenan en conductos papilares largos, revestidos por epitelio cilíndrico simple.

El número de nefronas es constante desde el nacimiento. Cualquier aumento en el tamaño del riñón se debe únicamente al crecimiento de las nefronas individuales. Si éstas se lesionan o enferman, no se forman nuevas. Los signos de la disfunción renal generalmente no se manifiestan hasta que la función disminuye a menos del 25% de lo normal porque las nefronas que se mantienen funcionando se adaptan para manejar una carga mayor que lo habitual. La extirpación quirúrgica de un riñón, por ejemplo, estimula la hipertrofia (agrandamiento) del riñón restante, que será capaz de filtrar sangre con una tasa hasta del 80% de dos riñones normales.

► PREGUNTAS DE REVISIÓN

1. ¿Por qué se dice que los riñones son retroperitoneales?
2. ¿Cuáles son las partes principales de la nefrona?
3. ¿En qué se diferencian estructuralmente las nefronas corticales y los yuxtamedulares?
4. ¿Dónde se localiza el aparato yuxtaglomerular (AYG) y cuál es su estructura?

GENERALIDADES DE LA FISIOLÓGIA RENAL

► OBJETIVO

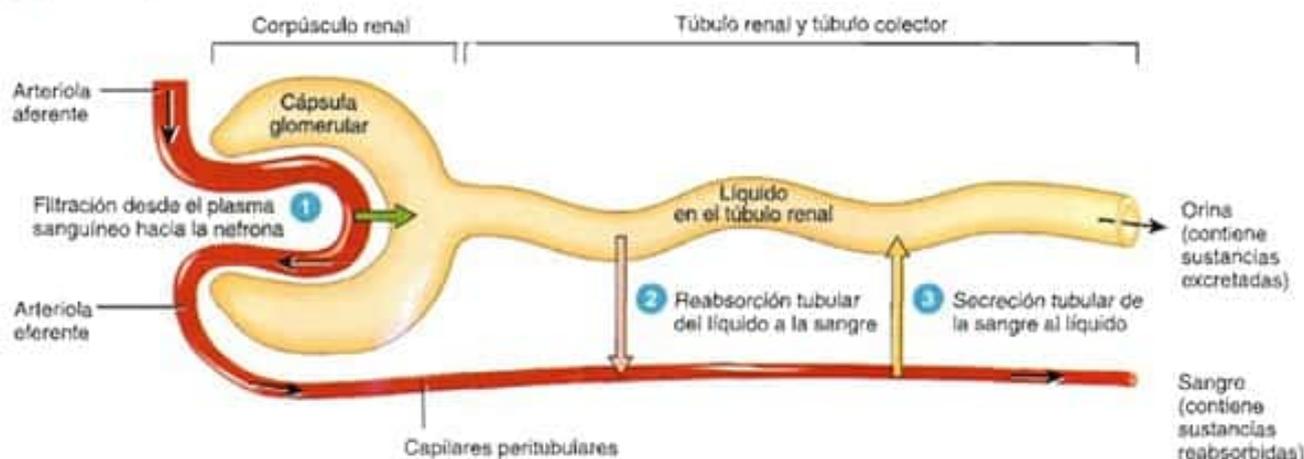
Identificar las tres funciones básicas de las nefronas y los túbulos colectores, e indicar dónde ocurre cada una.

Para producir orina, las nefronas y los túbulos colectores desarrollan tres procesos básicos: filtración glomerular, reabsorción tubular y secreción tubular (fig. 26-7).

1. **Filtración glomerular.** En el primer paso de la producción de orina, el agua y la mayor parte de los solutos en el plasma sanguíneo se movilizan a través de la pared de los capilares glomerulares hacia la cápsula de Bowman y luego hacia el túbulo renal.
2. **Reabsorción tubular.** A medida que el líquido filtrado fluye a lo largo del túbulo renal y a través del túbulo colector, las células tubulares reabsorben cerca del 99% del agua filtrada y diversos solutos útiles. El agua y los solutos regresan a la sangre a medida que fluye a través de los capilares peritubulares y los vasos rectos. El término *reabsorción* se refiere al regreso de las sustancias al torrente sanguíneo. En cambio, *absorción* significa la entrada de sustancias nuevas en el organismo, como ocurre en el tubo digestivo.
3. **Secreción tubular.** A medida que el líquido fluye a lo largo del túbulo renal y a través del túbulo colector, las células tubulares secretan hacia aquél otras sustancias, como desechos, fármacos e iones en exceso. Se advierte que la secreción tubular *remueve* una sustancia de la sangre. En otras instancias de la secreción

Fig. 26-7 Relación de la estructura de una nefrona con sus tres funciones principales: filtración glomerular, reabsorción tubular y secreción tubular. Las sustancias excretadas permanecen en la orina y posteriormente abandonan el cuerpo. Para cualquier sustancia S, el índice de excreción de S = índice de filtración de S - índice de reabsorción de S + índice de secreción de S.

La filtración glomerular tiene lugar en el corpúsculo renal, mientras que la reabsorción y la secreción tubulares se producen a lo largo del túbulo renal y el túbulo colector.



¿ Cuando las células tubulares renales secretan el fármaco penicilina, ¿ésta sale o ingresa en el torrente sanguíneo?

—por ejemplo, la secreción de hormonas—, las células liberan sustancias hacia el líquido intersticial y la sangre.

Los solutos en el líquido que drena hacia la pelvis renal permanecen en la orina y se excretan. El índice de excreción urinaria de cualquier soluto es igual al de su filtración glomerular, más su índice de secreción, menos su índice de reabsorción.

Mediante la filtración, la reabsorción y la secreción, las nefronas mantienen la homeostasis del volumen sanguíneo y su composición. La situación es de alguna manera análoga a un centro de reciclado: los camiones descargan los residuos en una tolva, donde los desechos más pequeños pasan hacia una cinta transportadora (filtración glomerular del plasma). A medida que ésta se desliza, los trabajadores apartan los elementos útiles, como latas de aluminio, plásticos y recipientes de vidrio (reabsorción). Algunos obreros dejan otros desperdicios y elementos más grandes en la cinta transportadora (secreción). Al final de la cinta, todos los residuos que quedaron caen en un camión para su transporte a los lugares de relleno (excreción de los desechos en la orina).

FILTRACIÓN GLOMERULAR

► OBJETIVOS

Describir la membrana de filtración.

Analizar las presiones que promueven la filtración glomerular y las que se oponen a ésta.

El líquido que entra en el espacio capsular se llama **filtrado glomerular**. La fracción del plasma sanguíneo en las arteriolas aferentes de los riñones que se transforma en filtrado glomerular es la **fracción de filtración**. A pesar de que una fracción de filtración de 0,16-0,20 (16-20%) es normal, el valor varía considerablemente tanto en condiciones de salud como de enfermedad. En promedio, el volumen diario de filtrado glomerular en los adultos es de 150 L en las mujeres y de 180 L en los hombres. Más del 99% del filtrado glomerular retorna al torrente sanguíneo por reabsorción tubular, de manera que sólo 1-2 L se excretan con la orina.

Membrana de filtración

En conjunto, las células endoteliales de los capilares glomerulares y los podocitos, que rodean completamente a los capilares, forman una barrera permeable conocida como **membrana de filtración**. Esta configuración "en sándwich" permite la filtración de agua y solutos pequeños, pero impide la filtración de la mayor parte de las proteínas del plasma, las células sanguíneas y las plaquetas. Las sustancias que se filtran de la sangre atraviesan tres barreras: la célula endotelial glomerular, la lámina basal y una hendidura de filtración formada por un podocito (fig. 26-8).

1 Las células endoteliales glomerulares son bastante permeables porque tienen grandes **fenestraciones** (poros) que miden entre 70 y 100 nm (0,07-0,1 μm) de diámetro. Este tamaño le permi-

te a todos los solutos del plasma salir de los capilares glomerulares, pero impide la filtración de las células sanguíneas y las plaquetas. Entre los capilares glomerulares y en la hendidura que se halla entre las arteriolas aferente y eferente (véase fig. 26-6a) se localizan unas células contráctiles, las **células mesangiales** (meso-, de medio, y -angi, de *aggeton*, vaso), que ayudan a regular la filtración glomerular.

- 2 La **lámina basal** es una capa de material acelular entre el endotelio y los podocitos, consiste en fibras pequeñas de colágeno y proteoglicanos y una matriz de glucoproteínas; impide la filtración de proteínas plasmáticas más grandes.
- 3 Desde cada podocito se extienden miles de procesos llamados **pedicelos** (diminutivo de pie) que rodean a los capilares glomerulares. Los espacios entre los pedicelos son las **hendiduras de filtración**. Una membrana delgada, la membrana de la hendidura, se extiende a lo largo de cada hendidura de filtración y permite el paso de moléculas de un diámetro menor de 6-7 nm (0,006-0,007 μm), como agua, glucosa, vitaminas, aminoácidos, proteínas plasmáticas muy pequeñas, amoníaco, urea y iones. Menos del 1% de la albúmina, la proteína más abundante del plasma, atraviesa esta membrana ya que tiene un diámetro de 7,1 nm y es muy grande para pasar.

El principio de filtración —el uso de presión para forzar a los líquidos y solutos a través de una membrana— es el mismo en los capilares glomerulares que en el resto del organismo (véase ley de Starling de los capilares, p. 749). Sin embargo, el volumen de líquido filtrado en el corpúsculo renal es mucho mayor que en otros capilares del organismo por tres razones:

1. Los capilares glomerulares tienen una gran superficie para la filtración porque son largos y extensos. Las células mesangiales regulan cuánto de esta superficie está disponible para la filtración. Cuando las células mesangiales se hallan relajadas, la superficie es máxima y la filtración glomerular es muy alta. La contracción de las células mesangiales reduce la superficie disponible y disminuye la filtración glomerular.

2. La membrana de filtración es delgada y porosa. A pesar de tener varias capas, su espesor es sólo de 0,1 μm . Además los capilares glomerulares son 50 veces más permeables que los capilares de la mayor parte de los tejidos, principalmente por sus grandes fenestraciones.

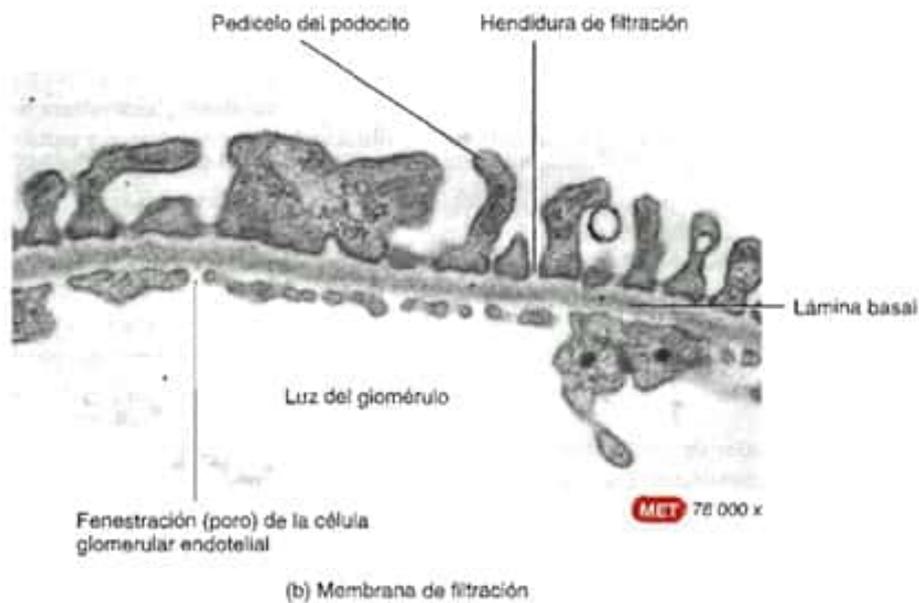
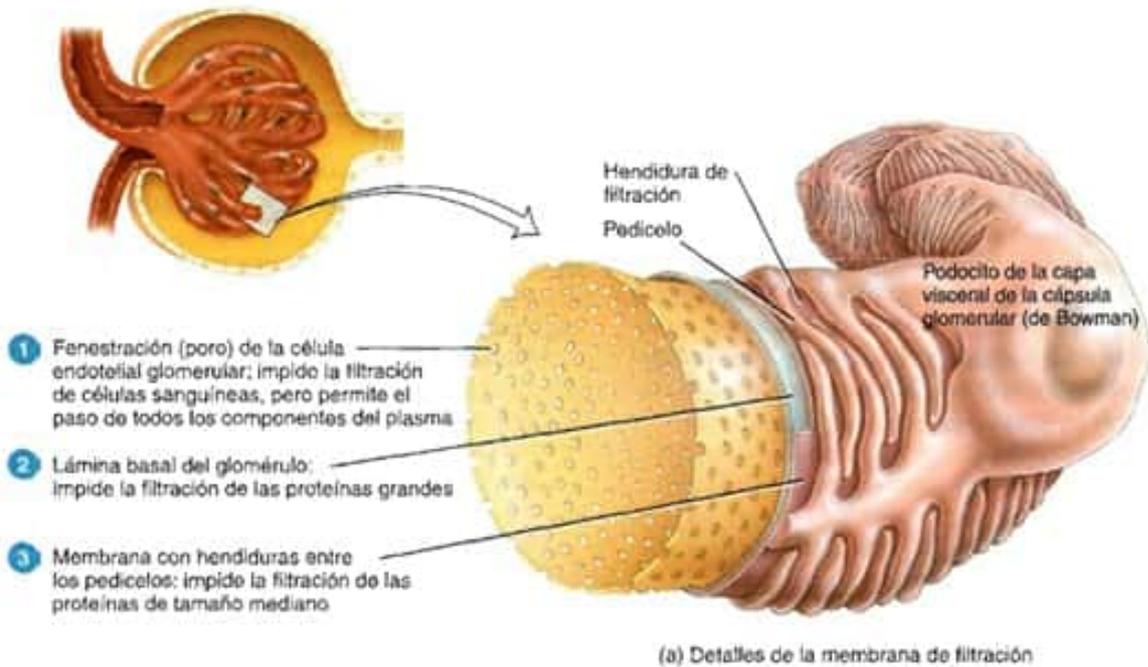
3. La presión del capilar glomerular es alta. Como el diámetro de la arteriola eferente es menor que el de la arteriola aferente, la resistencia del flujo hacia afuera desde el glomérulo es elevada. Como resultado, la presión sanguínea en los capilares glomerulares es considerablemente más alta que en los capilares de cualquier otra parte del cuerpo.

Presión neta de filtración

La filtración glomerular depende de tres presiones principales. Una presión *promueve* la filtración y dos presiones *se oponen* a ésta (fig. 26-9, p. 1013).

Fig. 26-8 Membrana de filtración. El tamaño de las fenestraciones endoteliales y de las hendiduras de filtración en (a) han sido exageradas para destacarlas.

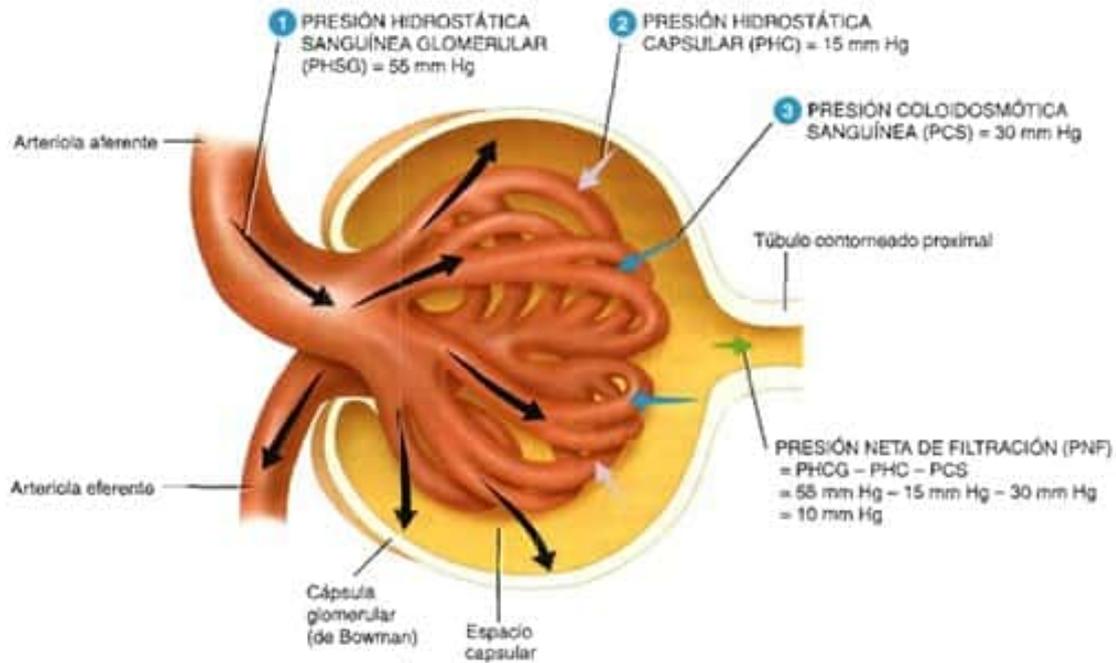
 Durante la filtración glomerular, el agua y los solutos pasan desde el plasma sanguíneo hacia el espacio capsular.



 ¿Qué parte de la membrana de filtración evita que los glóbulos rojos entren en el espacio capsular?

Fig. 26-9 Presiones que rigen la filtración glomerular. En conjunto, estas presiones determinan la presión neta de filtración (PNF).

La presión hidrostática sanguínea glomerular promueve la filtración, mientras que la presión hidrostática capsular y la presión coloidosmótica se oponen a la filtración.



Suponga que un tumor está presionando y obstruyendo el uréter derecho. ¿Qué efecto puede tener esto sobre la PHC y la PNF en ese riñón derecho? ¿Estaría afectado el riñón izquierdo también?

- 1 La **presión hidrostática sanguínea glomerular (PHSG)** es la presión sanguínea en los capilares glomerulares. Su valor suele ser de 55 mm Hg. Promueve la filtración forzando la salida del agua y los solutos del plasma sanguíneo a través de la membrana de filtración.
- 2 La **presión hidrostática capsular (PHC)** es la ejercida contra la membrana de filtración por el líquido que ya está en el espacio capsular y el túbulo renal. La PHC se opone a la filtración y representa una "presión retrógrada" de cerca de 15 mm Hg.
- 3 La **presión coloidosmótica sanguínea (PCS)**, que está dada por la presencia de proteínas como la albúmina, las globulinas y el fibrinógeno en el plasma sanguíneo, también se opone a la filtración. El promedio de la PCS en los capilares glomerulares es de 30 mm Hg.

La presión neta de filtración (PNF), la presión total que promueve la filtración, se determina como sigue:

Presión neta de filtración (PNF) = PHSG - PHC - PCS
Sustituyendo por los valores recién expresados, la PNF normal puede calcularse:

$$\begin{aligned} \text{PNF} &= 55 \text{ mm Hg} - 15 \text{ mm Hg} - 30 \text{ mm Hg} \\ &= 10 \text{ mm Hg} \end{aligned}$$

De tal modo, una presión de 10 mm Hg únicamente hace que se filtre una cantidad normal de plasma sanguíneo (menos las proteínas plasmáticas) del glomérulo al espacio capsular.

La pérdida de proteínas plasmáticas en la orina causa edema

En algunas enfermedades renales, los capilares glomerulares están dañados y se vuelven tan permeables que las proteínas plasmáticas ingresan en el filtrado glomerular. Como consecuencia, el filtrado ejerce una presión coloidosmótica que atrae del compartimiento intravascular. En esta situación, la PNF aumenta, lo cual significa que se filtra más líquido. Al mismo tiempo, desciende la presión coloidosmótica porque se están perdiendo las proteínas plasmáticas con la orina. Como se filtra más líquido de los capilares hacia los tejidos de todo el cuerpo del que retorna por medio de la reabsorción, el volumen sanguíneo disminuye y el volumen del líquido intersticial aumenta. De tal manera, la pérdida de proteínas plasmáticas en la orina causa *edema*, un volumen anormalmente alto de líquido intersticial. ■

Filtración glomerular

La cantidad de filtrado que se forma en todos los corpúsculos renales de ambos riñones por minuto es la **filtración glomerular (FG)**. En los adultos, el FG es en promedio de 125 mL/min en los hombres y de 105 mL/min en las mujeres. La homeostasis de los lí-

quidos corporales requiere que los riñones mantengan el FG relativamente constante. Si es muy alta, pueden pasar sustancias necesarias tan rápidamente a través de los túbulos renales que algunas no se reabsorben y se pierden con la orina. Si es muy bajo, casi todo el filtrado puede reabsorberse y ciertos productos de desecho pueden no excretarse adecuadamente.

La FG se relaciona directamente con las presiones que determinan la presión neta de filtración; cualquier cambio en la presión neta de filtración afectará la FG. Una pérdida importante de sangre, por ejemplo, reduce la presión arterial y disminuye la presión hidrostática sanguínea glomerular. La filtración cesa si la presión hidrostática sanguínea glomerular cae a 45 mm Hg ya que las presiones opuestas llegan a sumar 45 mm Hg. Sorprendentemente, cuando la presión arterial sistémica se eleva por encima de lo normal, la presión neta de filtración y la FG aumentan muy poco. La FG casi no se modifica cuando la presión sanguínea arterial está entre 80 y 180 mm Hg.

Los mecanismos que regulan la filtración glomerular actúan de dos maneras principales: 1) ajustando el flujo sanguíneo dentro y fuera del glomérulo, y 2) adaptando la superficie disponible de los capilares glomerulares para la filtración. La FG aumenta cuando el flujo sanguíneo hacia los capilares glomerulares se incrementa. El control coordinado del diámetro tanto de la arteriola aferente como de la eferente regula el flujo sanguíneo glomerular. La constricción de la arteriola aferente disminuye el flujo sanguíneo hacia el glomérulo; la dilatación de la arteriola aferente lo aumenta. Tres mecanismos controlan la FG: la autorregulación renal, la regulación neural y la regulación hormonal.

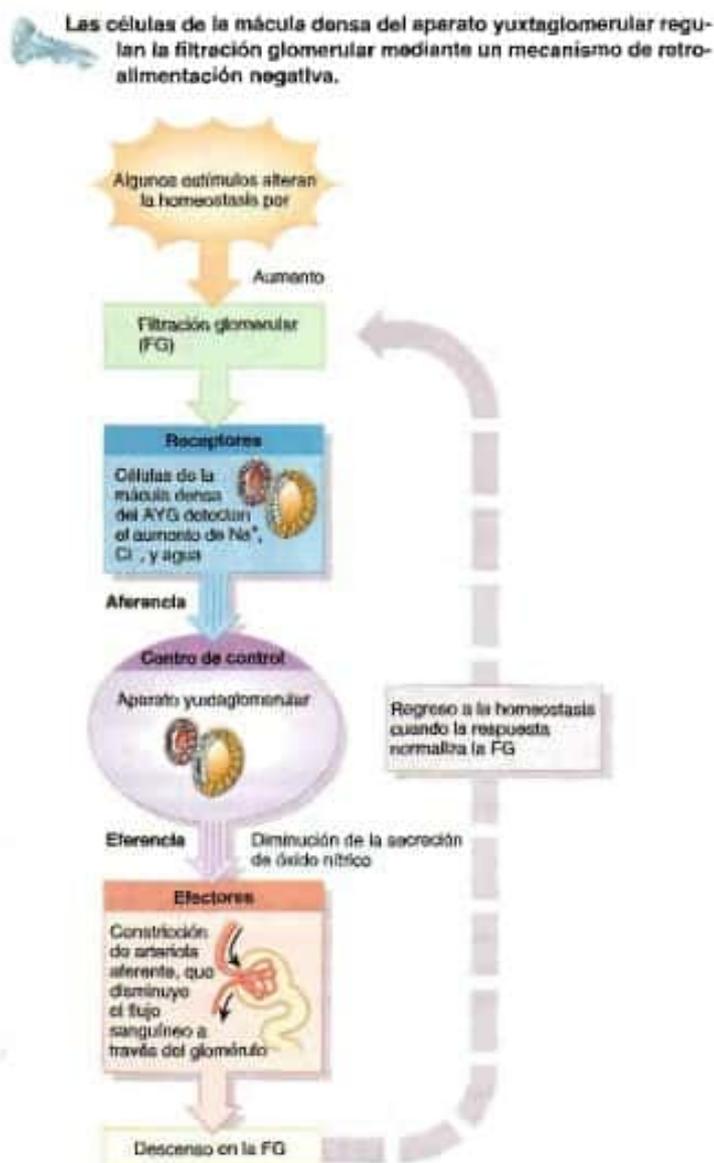
Autorregulación renal de la filtración glomerular

Los mismos riñones ayudan a mantener el flujo sanguíneo renal y la FG constantes a pesar de los cambios normales diarios en la presión arterial, como los que ocurren durante el ejercicio. Esta capacidad se llama **autorregulación renal** y comprende dos mecanismos: el mecanismo miogénico y la retroalimentación (*feedback*) tubuloglomerular. Actuando juntos, pueden mantener la FG constante dentro de un amplio rango de presiones sanguíneas sistémicas.

El **mecanismo miogénico** (mio-, de *myos*, músculo, y -génico, de *gennán*, producir) ocurre cuando el estiramiento desencadena la contracción de las fibras musculares lisas en las paredes de las arteriolas aferentes. Cuando la presión arterial sube, la FG también lo hace porque el flujo sanguíneo renal aumenta. Sin embargo, la presión arterial elevada distiende las paredes de las arteriolas aferentes. En respuesta, se contraen las fibras musculares lisas de la pared de la arteriola aferente, lo cual disminuye la luz arteriolar. Como resultado, se reduce el flujo sanguíneo renal y la FG desciende a su nivel previo. A la inversa, cuando la presión arterial disminuye, las células musculares lisas están relajadas. Las arteriolas aferentes se dilatan, aumenta el flujo sanguíneo renal y la FG se eleva. El mecanismo miogénico normaliza el flujo sanguíneo renal y la FG en cuestión de segundos después de un cambio en la presión arterial.

El segundo contribuyente a la autorregulación renal, la **retroalimentación tubuloglomerular**, recibe este nombre porque parte de los túbulos renales —la **mácula densa**— provee de retroalimentación a los glomérulos (fig. 26-10). Cuando la FG está por encima de lo normal como consecuencia de la presión arterial sistémica elevada, el líquido

Fig. 26-10 Retroalimentación tubuloglomerular.



¿Por qué se llama a este proceso autorregulación?

filtrado fluye con mayor velocidad a lo largo de los túbulos renales. El resultado es que el túbulo contorneado proximal y el asa de Henle tienen menos tiempo para reabsorber Na^+ , Cl^- y agua. Se cree que las células de la **mácula densa** detectan el aumento de la llegada de Na^+ , Cl^- y agua e inhiben la liberación de óxido nítrico (NO) por las células del aparato yuxtaglomerular (AYG). Como el NO produce vasodilatación, las arteriolas aferentes se contraen cuando el nivel de NO disminuye. Es por ello que fluye menos sangre hacia los capilares glomerulares y disminuye la FG. Cuando la presión arterial cae y la FG es más baja que lo normal, tiene lugar la secuencia inversa de fenómenos, pero en grado menor. La retroalimentación tubuloglomerular opera más lentamente que el mecanismo miogénico.

Regulación neural de la filtración glomerular

Como la mayoría de los vasos sanguíneos del organismo, los renales están inervados por fibras de la división simpática del SNA que liberan noradrenalina. La noradrenalina produce vasoconstricción a través de los receptores α -1, que son particularmente abundantes en las fibras musculares lisas de las arteriolas aferentes. En reposo, la estimulación simpática es relativamente baja, las arteriolas aferente y eferente están dilatadas, y prevalece la autorregulación de la FG. Con la estimulación simpática moderada, tanto la arteriolas aferente como la eferente se contraen en el mismo grado. El flujo de sangre de ingreso y egreso del glomérulo disminuyen en igual proporción, lo cual reduce la FG muy poco. Con una estimulación simpática más intensa, sin embargo, como ocurre durante el ejercicio o la hemorragia, predomina la constricción de la arteriola aferente. Como resultado, el flujo sanguíneo hacia los capilares glomerulares desciende en gran medida y la FG se reduce. Este descenso del flujo sanguíneo renal tiene dos consecuencias: 1) disminuye la excreción de orina, lo cual ayuda a conservar el volumen sanguíneo; 2) permite un mayor flujo sanguíneo a otros tejidos del organismo.

Regulación hormonal de la filtración glomerular

Dos hormonas contribuyen a la regulación de la FG. La angiotensina II la reduce, mientras que el péptido natriurético auricular (PNA) la aumenta. La **angiotensina II** es un vasoconstrictor potente que constriñe tanto a la arteriola aferente como a la eferente y reduce el flujo sanguíneo renal y, consecuentemente, la FG. Las células de las aurículas del corazón secretan **péptido natriurético auricular (PNA)**. La distensión de las aurículas, como sucede cuando aumenta el volumen sanguíneo, estimula la secreción de PNA. Mediante la relajación de las células mesangiales glomerulares, el PNA aumenta la superficie disponible para la filtración. La filtración glomerular aumenta a medida que aumenta la superficie de filtración.

En el **cuadro 26-2** se resume la regulación de la filtración glomerular.

PREGUNTAS DE REVISIÓN

- Si la excreción de un fármaco como la penicilina es mayor que la filtración glomerular, ¿de qué otra manera pasa a la orina?
- ¿Cuál es la principal diferencia química entre el plasma sanguíneo y el filtrado glomerular?
- ¿Por qué hay mayor filtración a través de los capilares glomerulares que a través de los capilares de otras partes del organismo?
- Desarrolle la ecuación para el cálculo de la presión neta de filtración (PNF) y explique el significado de cada término.
- ¿Cómo se regula la filtración glomerular?

REABSORCIÓN Y SECRECIÓN TUBULARES

OBJETIVOS

Describir las vías y los mecanismos de la reabsorción y la secreción tubulares.

Describir cómo segmentos específicos del túbulo renal y del túbulo colector reabsorben agua y solutos.

Describir cómo segmentos específicos del túbulo renal y del túbulo colector secretan solutos hacia la orina.

Principios de la reabsorción y secreción tubulares

El volumen de líquido que entra en los túbulos contorneados proximales en media hora es mayor que el volumen total del plasma sanguíneo porque el índice normal de filtración glomerular es muy alto. Obviamente, parte de este líquido debe retornar de alguna manera al torrente sanguíneo. La reabsorción —el retorno de la mayor parte del agua filtrada y de muchos solutos al torrente sanguíneo— es

CUADRO 26-2 Regulación de la filtración glomerular (TFG)

Tipo de regulación	Estímulo principal	Mecanismo y sitio de acción	Efecto sobre la FG
Autorregulación renal			
Mecanismo miogénico	Aumento de la distensión de las fibras musculares lisas de las paredes de la arteriola aferente por el aumento de la presión arterial.	Las fibras musculares lisas estiradas se contraen y disminuye de tal modo la luz de las arteriolas aferentes.	Disminución
Retroalimentación tubuloglomerular	Llegada rápida de Na^+ y Cl^- a la mácula densa por la presión arterial sistémica alta	La disminución de la liberación de óxido nítrico (NO) por el aparato yuxtaglomerular provoca la constricción de las arteriolas aferentes.	Disminución
Regulación neural	El aumento en el nivel de actividad de los nervios simpáticos renales libera noradrenalina.	Constricción de las arteriolas aferentes por la activación de los receptores α 1 y el aumento de la liberación de renina.	Disminución
Regulación hormonal			
Angiotensina II	La disminución del volumen sanguíneo o la presión arterial estimula la producción de angiotensina II.	Constricción de las arteriolas aferente y eferente.	Disminución
Péptido natriurético auricular (PNA)	La distensión de la aurícula estimula la secreción de PNA.	La relajación de las células mesangiales en los glomérulos aumenta la superficie capilar disponible para la filtración.	Aumento

CUADRO 26-3 Sustancias filtradas, reabsorbidas y excretadas en la orina

Sustancia	Filtrado* (entra en la cápsula renal por día)	Reabsorbido (regresa a la sangre por día)	Orina (excretado por día)
Agua	180 L	178-179 L	1-2 L
Proteínas	2 g	1,9 g	0,1 g
Iones sodio (Na ⁺)	579 g	575 g	4 g
Iones cloruro (Cl ⁻)	640 g	633,7 g	6,3 g
Iones bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	275 g	274,97 g	0,03 g
Glucosa	162 g	162 g	0 g
Urea	54 g	24 g	30 g [†]
Iones potasio (K ⁺)	29,6 g	29,6 g	2,0 g [‡]
Ácido úrico	8,5 g	7,7 g	0,8 g
Creatinina	1,6 g	0 g	1,6 g

*Considerando que la FG es de 180 L por día.

† Además de filtrarse y reabsorberse, la urea se secreta.

‡ Después de que todo el K⁺ filtrado se reabsorbe virtualmente en los túbulos contorneados y el asa de Henle, una cantidad variable de K⁺ se secreta en las células principales en el túbulo colector.

la segunda función básica de la nefrona y el túbulo colector. Normalmente, cerca del 99% del agua filtrada se reabsorbe. Las células epiteliales a lo largo del túbulo renal y del túbulo colector llevan a cabo la reabsorción, pero las células del túbulo contorneado proximal hacen la mayor contribución. Los solutos reabsorbidos por procesos activos o pasivos son la glucosa, aminoácidos, urea e iones como el Na⁺ (sodio), K⁺ (potasio), Ca²⁺ (calcio), Cl⁻ (cloruro), HCO₃⁻ (bicarbonato) y HPO₄²⁻ (fosfato). Una vez que el líquido pasa a través del túbulo contorneado proximal, las células situadas más distalmente regulan los procesos de reabsorción para mantener el equilibrio homeostático de agua y de ciertos iones. La mayor parte de las proteínas pequeñas y de los péptidos que pasan a través del filtro también se reabsorben, en general por pinocitosis. Para apreciar la magnitud de la reabsorción tubular, consúltese el cuadro 26-3 y compárense las cantidades de sustancias que se filtran, se reabsorben y se excretan con la orina.

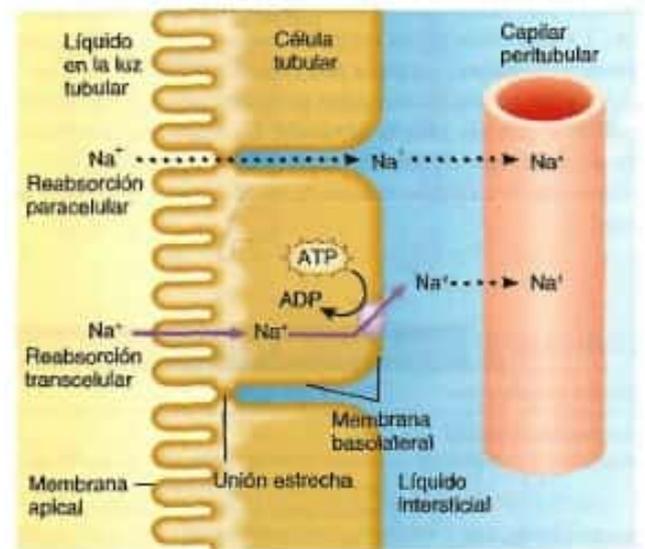
La tercera función de las nefronas y los túbulos colectores es la secreción tubular, la transferencia de sustancias desde la sangre y las células tubulares hacia el líquido tubular. Las sustancias secretadas son iones hidrógeno (H⁺), K⁺, y amonio (NH₄⁺), creatinina y ciertos fármacos como la penicilina. La secreción tubular tiene dos objetivos importantes: 1) la secreción de H⁺ ayuda a controlar el pH sanguíneo; 2) la secreción de otras sustancias contribuye a eliminarlas del organismo.

Vías de reabsorción

Una sustancia reabsorbida del líquido en la luz del túbulo puede seguir uno de dos caminos antes de entrar en el capilar peritubular: puede movilizarse entre las células tubulares adyacentes o a través de una célula tubular (fig. 26-11). A lo largo del túbulo renal, las uniones estrechas rodean y vinculan a las células contiguas entre sí, de la misma manera que los anillos de plástico unen los envases de gaseosas en un paquete de seis unidades. La membrana apical (la parte superior de los envases) está en contacto con el líquido tubu-

Fig. 26-11 Vías de reabsorción: reabsorción paracelular y reabsorción transcelular.

En la reabsorción paracelular, el agua y los solutos del líquido tubular regresan al torrente sanguíneo movilizándose entre las células tubulares; en la reabsorción transcelular los solutos y el agua del líquido tubular regresan al torrente sanguíneo pasando a través de una célula tubular.



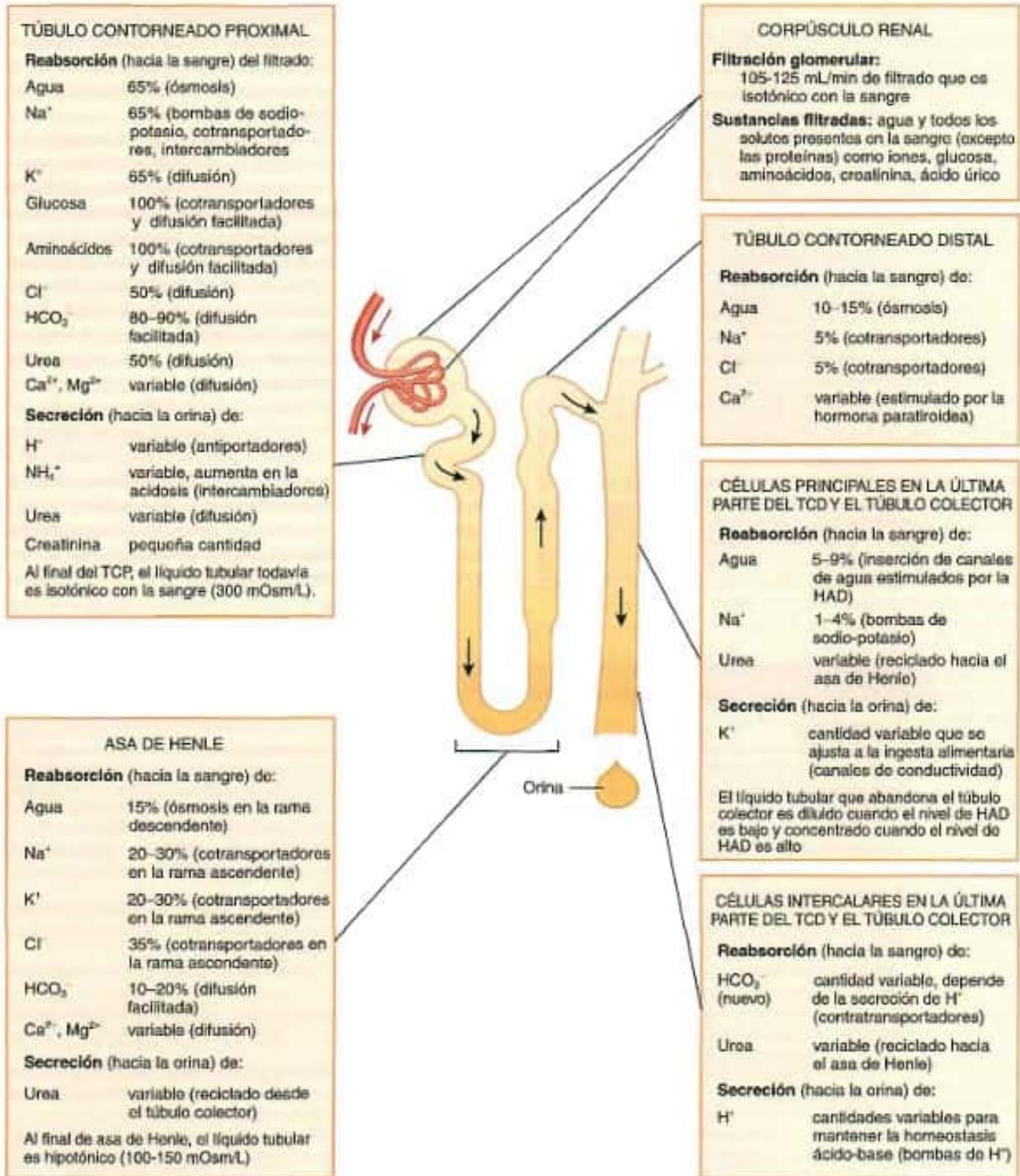
Referencias:

-> Difusión
- > Transporte activo
- Bomba de sodio-potasio (Na⁺/K⁺ ATPasa)

¿Cuál es la función principal de las uniones estrechas entre las células tubulares?

Fig. 26-20 Resumen de la filtración, reabsorción y secreción en la nefrona y el túbulo colector.

La filtración se produce en el corpúsculo renal; la reabsorción tiene lugar a lo largo de todo el túbulo renal y los túbulos colectores.



¿En qué segmentos de la nefrona y el túbulo colector se produce la secreción?

TRANSPORTE, ALMACENAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE LA ORINA

▶ OBJETIVO

Describir la anatomía, histología y fisiología de los uréteres, la vejiga urinaria y la uretra.

Desde los túbulos colectores, la orina drena a través de los conductos papilares hacia los cálices menores, que se unen para constituir los cálices mayores, los cuales a su vez confluyen y forman la pelvis renal (véase *fig. 26-3*). Desde la pelvis renal, la orina drena primero hacia los uréteres y luego hacia la vejiga urinaria, y finalmente abandona el cuerpo a través de la uretra (véase *fig. 26-1*).

Uréteres

Cada uno de los dos **uréteres** conduce orina desde la pelvis de un riñón a la vejiga urinaria. Las contracciones peristálticas de las paredes musculares de los uréteres impulsan la orina hacia la vejiga urinaria, pero también contribuyen a ello la presión hidrostática y la gravedad. Las ondas peristálticas que pasan desde la pelvis renal a la vejiga urinaria varían en su frecuencia de 1 a 5/min, según la rapidez con la cual se forma la orina.

Los uréteres miden entre 25 y 30 cm de largo, sus paredes son gruesas, y su diámetro fluctúa entre 1 y 10 mm a lo largo del trayec-

to que va de la pelvis renal a la vejiga urinaria. Como los riñones, los uréteres son retroperitoneales. En la base de la vejiga urinaria, los uréteres se curvan medialmente y pasan en forma oblicua a través de la pared posterior vesical (*fig. 26-21*).

A pesar de que no existe una válvula anatómica en la entrada de cada uréter en la vejiga urinaria, hay una válvula fisiológica que es muy efectiva. A medida que la vejiga se llena de orina, la presión en su interior comprime los orificios oblicuos de los uréteres e impide el reflujo de orina. Cuando el esfínter fisiológico no funciona correctamente, los microorganismos pueden desplazarse hacia arriba por los uréteres desde la vejiga e infectar a uno o a ambos riñones.

La pared de los uréteres está formada por tres capas de tejido. La capa más profunda, la **mucosa**, es una membrana con epitelio de transición (véase *cuadro 4-11*) y la lámina subyacente, la **lámina propia**, tiene tejido conectivo areolar con una cantidad considerable de colágeno, fibras elásticas y tejido linfático. El epitelio de transición se puede distender, lo cual representa una ventaja para cualquier órgano que debe adaptarse a un volumen cambiante de líquido. El moco secretado por las células caliciformes de la mucosa evita que las células tomen contacto con la orina, cuya concentración de solutos y su pH pueden variar notablemente con respecto al citosol de las células que forman las paredes de los uréteres.

A lo largo de casi todo el uréter, la capa intermedia, la **muscular**, está compuesta por capas internas longitudinales y capas externas circulares de fibras musculares lisas. Esta disposición es inversa

Fig. 26-21 Uréteres, vejiga urinaria y uretra femenina.



¿Cómo se denomina la falta de control voluntario de la micción?

a la del tubo digestivo, que contiene capas internas circulares y externas longitudinales. La muscular del tercio distal de los uréteres también contiene una capa externa de fibras musculares longitudinales. Por lo tanto, el tercio distal consta de una capa longitudinal interna, una circular media y una longitudinal externa. La peristalsis es la función principal de la túnica muscular.

La cubierta superficial de los uréteres es la **adventicia**, una capa de tejido conectivo que contiene vasos sanguíneos, vasos linfáticos y nervios destinados a la muscular y a la mucosa. La adventicia se mezcla con el tejido conectivo que la rodea y fija a los uréteres en su posición.

Vejiga urinaria

La **vejiga urinaria** es un órgano hueco, distensible y muscular situado en la cavidad pelviana por detrás de la sínfisis del pubis. En los hombres es directamente anterior al recto; en la mujer, es anterior a la vagina e inferior al útero (véase **fig. 26-22**). Los pliegues peritoneales mantienen a la vejiga en su posición. Cuando se distiende ligeramente por la acumulación de orina, adopta una forma esférica. Cuando está vacía, se colapsa. A medida que el volumen de orina aumenta, toma forma de pera y asciende a la cavidad abdominal. La capacidad de la vejiga urinaria es en promedio de 700-800 mL. Es más pequeña en las mujeres porque el útero ocupa el espacio que está por encima de la vejiga.

Anatomía e histología de la vejiga urinaria

En el piso de la vejiga se encuentra un área triangular pequeña denominada **trígono vesical**. Los dos vértices posteriores del trígono contienen los dos orificios ureterales, la apertura hacia la uretra, el **orificio interno de la uretra**, se halla en el vértice anterior (**fig. 26-21**). Como la mucosa está firmemente adherida a la muscular, el trígono tiene un aspecto liso.

Tres capas forman la pared de la vejiga urinaria. La más profunda es la **mucosa**, una membrana compuesta por **epitelio de transición** y una **lámina propia** subyacente similar a la de los uréteres. También están presentes las rugosidades (pliegues mucosos) que permiten la expansión de la vejiga. Rodeando a la mucosa se encuentra la **túnica muscular**, también llamada **músculo detrusor** (*detrusor*, que impulsa), formada por tres capas de fibras musculares lisas: la longitudinal interna, la circular media y la longitudinal externa. Alrededor del orificio uretral las fibras circulares forman el **esfínter interno de la uretra**; en una posición inferior con respecto a éste se halla el **esfínter externo de la uretra**, constituido por músculo esquelético y que es una modificación de los músculos profundos del periné (véase **fig. 11-12**). La capa más superficial de la vejiga urinaria en las paredes posterior e inferior es la **adventicia**, una capa de tejido conectivo que se continúa con la de los uréteres. En la parte superior de la vejiga urinaria está la **serosa**, una capa de peritoneo visceral.

El reflejo miccional

La emisión de orina de la vejiga urinaria se denomina **micción** (de *mictio*, orinar). La micción se produce por una combinación de

contracciones musculares voluntarias e involuntarias. Cuando el volumen de orina en la vejiga urinaria excede los 200-400 mL, la presión en su interior aumenta en forma considerable, y los receptores de estiramiento de su pared transmiten impulsos nerviosos hacia la médula espinal. Estos impulsos se propagan al **centro de la micción** en los segmentos S2 y S3 y desencadenan un reflejo medular llamado **reflejo de la micción**. En este arco reflejo, se propagan impulsos parasimpáticos desde el centro de la micción a la pared vesical y al esfínter uretral interno. Los impulsos nerviosos provocan la **contracción** del músculo detrusor y la **relajación** del esfínter uretral interno. Simultáneamente, el centro de la micción inhibe a las neuronas motoras somáticas que inervan al músculo esquelético en el esfínter uretral externo. La micción tiene lugar gracias a la contracción de la pared de la vejiga urinaria y a la relajación de los esfínteres. La repleción de la vejiga provoca una sensación "de plenitud" que inicia un deseo consciente de orinar antes de que realmente ocurra el reflejo de la micción. A pesar de que el vaciado de la vejiga es un reflejo, en la niñez temprana aprendemos a manejarlo en forma voluntaria. A través del control aprendido del esfínter uretral externo y de ciertos músculos del suelo pelviano, la corteza cerebral puede iniciar o demorar la micción por un período limitado.



La **cistoscopia** (cisto-, de *kýstis*, vejiga, y -copia, de *skopía*, examinar) es un procedimiento muy importante para el examen directo de la mucosa de la uretra y la vejiga, así como de la próstata en los hombres. En este procedimiento, un **cistoscopio** (un tubo flexible angosto con una luz) se introduce en la uretra para observar las estructuras por las cuales pasa. Se pueden tomar muestras de tejido con elementos adicionales para su examen (biopsia) y se pueden extraer cálculos pequeños. La cistoscopia es útil para evaluar trastornos de la vejiga urinaria como el cáncer y las infecciones. También hace posible determinar el grado de obstrucción como consecuencia de un agrandamiento prostático. ■

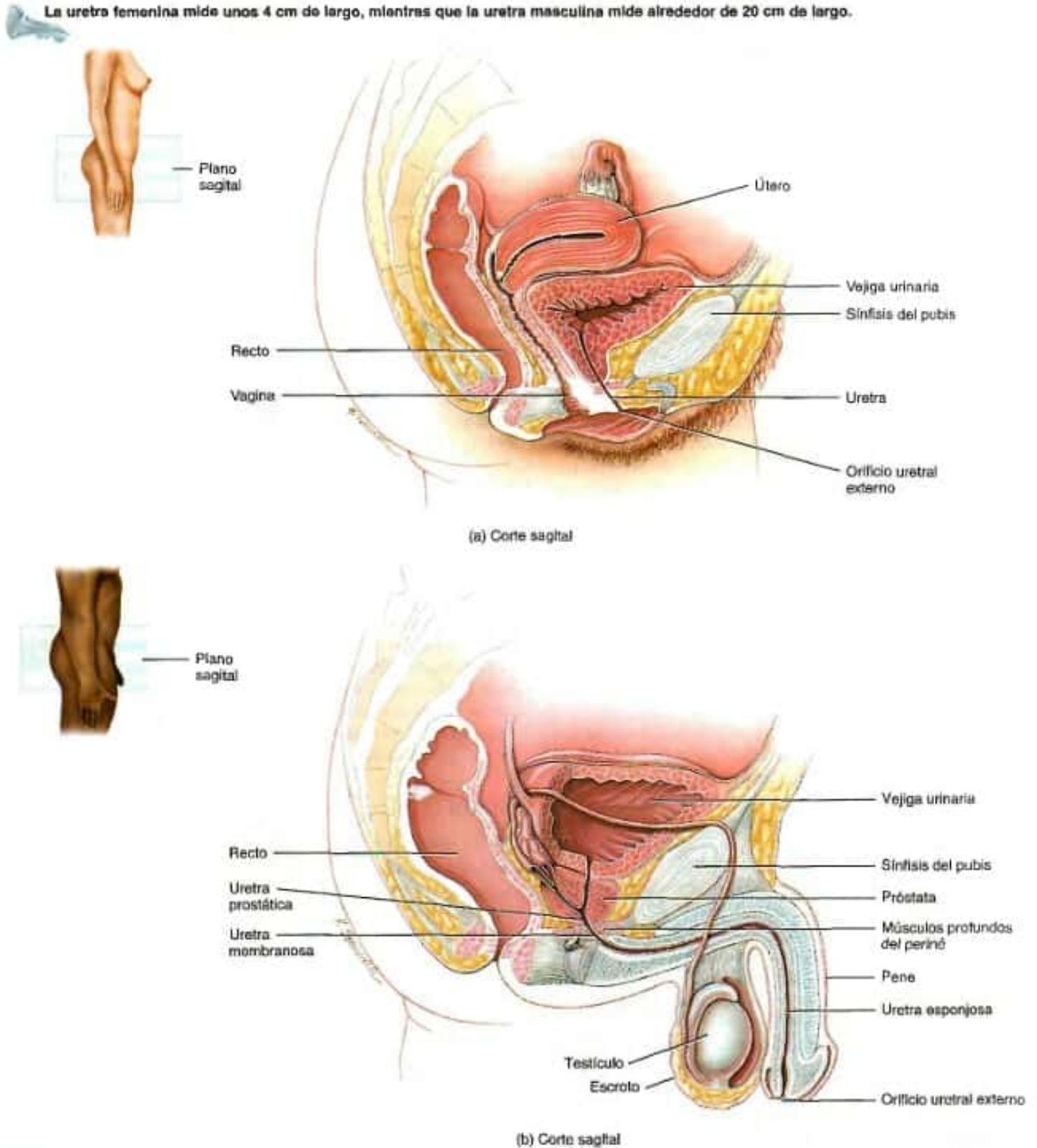
Uretra

La **uretra** es un conducto pequeño que se extiende desde el orificio uretral interno en el piso de la vejiga urinaria hasta el exterior del cuerpo. Tanto en los hombres como en las mujeres, constituye la porción terminal del aparato urinario y por ella pasa orina. En los hombres también da salida al líquido seminal (que contiene los espermatozoides) durante la eyaculación.

En las mujeres, la uretra está directamente por detrás de la sínfisis del pubis, se dirige en forma oblicua hacia adelante, y mide unos 4 cm (**fig. 26-22a**) de longitud. La apertura al exterior, el **orificio uretral externo** o **meato urinario**, se localiza entre el clitoris y el orificio externo de la vagina (véase **fig. 28-11a**). La pared de la uretra femenina está formada por una **mucosa** profunda y una **muscular** superficial. La mucosa es una membrana compuesta por un **epitelio** y una **lámina propia** (tejido conectivo con fibras elásticas y un plexo venoso). La muscular presenta fibras musculares lisas dispuestas en forma circular y se continúa con la de la vejiga. Cerca de la vejiga urinaria, en la mucosa se observa un epitelio de transición

Fig. 26-22 Comparación entre las uretras masculina y femenina.

La uretra femenina mide unos 4 cm de largo, mientras que la uretra masculina mide alrededor de 20 cm de largo.



¿Cuáles son las tres porciones de la uretra masculina?

que tiene continuidad con el de la vejiga; cerca del orificio uretral externo, el epitelio es pavimentoso (plano) estratificado no queratinizado. Entre esas zonas, el epitelio es cilíndrico estratificado o cilíndrico pseudoestratificado.

En los hombres, la uretra también se extiende desde el orificio uretral interno hasta el exterior, pero su longitud y su trayecto son considerablemente diferentes (fig. 26-22b). La uretra masculina atraviesa primero la próstata, luego los músculos profundos del periné y, finalmente el pene, un trayecto de alrededor de 20 cm.

La uretra masculina, que también tiene una **mucosa profunda** y una **muscular superficial**, se subdivide en tres regiones anatómicas. 1) La **uretra prostática** pasa a través de la próstata. 2) La **uretra membranosa** es la porción más corta y pasa a través de los músculos profundos del periné. 3) La **uretra esponjosa**, la porción más larga, transcurre a lo largo del pene. El epitelio de la uretra prostática se continúa con el de la vejiga urinaria y consiste en epitelio de transición que se vuelve cilíndrico estratificado o cilíndrico pseudoestratificado más distalmente. La mucosa de la uretra membranosa contiene epitelio cilíndrico estratificado o pseudoestratificado. El epitelio de la uretra esponjosa es cilíndrico estratificado o pseudoestratificado, excepto cerca del orificio uretral externo, donde se transforma en pavimentoso estratificado no queratinizado. La **lámina propia** de la uretra masculina es tejido conectivo areolar con fibras elásticas y un plexo venoso.

La capa muscular de la uretra prostática está compuesta principalmente por fibras musculares lisas superficiales respecto de la lámina propia; estas fibras circulares ayudan a formar el esfínter uretral interno de la vejiga. La muscular de la uretra membranosa presenta fibras musculares esqueléticas de los músculos profundos del periné dispuestas en forma circular que contribuyen a formar el esfínter uretral externo de la vejiga.

Diversas glándulas y otras estructuras asociadas con la reproducción (descritas en detalle en el capítulo 28) vuelcan sus secreciones en la uretra masculina. La uretra prostática recibe secreciones que contienen espermatozoides, neutralizan la acidez del aparato reproductor femenino y contribuyen a la motilidad y viabilidad de los espermatozoides. La uretra esponjosa recibe una sustancia alcalina antes de la eyaculación que neutraliza la acidez de la uretra, y moco, que lubrica el glande del pene durante el acto sexual. La uretra entera, pero especialmente la porción esponjosa, recibe moco durante el acto sexual o la eyaculación.



Incontinencia urinaria

La falta de control de la micción se llama **incontinencia urinaria**. En los niños menores de 2 a 3 años de edad, la incontinencia es normal ya que las neuronas del esfínter uretral externo no están desarrolladas por completo; la micción tiene lugar cuando la vejiga se encuentra lo suficientemente distendida como para estimular el reflejo. La incontinencia urinaria también puede producirse en los adultos. Hay cuatro tipos de incontinencia urinaria: de esfuerzo, de urgencia, por rebasamiento y funcional. La **incontinencia de esfuerzo** es el tipo más común de incontinencia en las mujeres jóvenes y de mediana edad, y resulta de la debilidad de los músculos profundos del piso de la pelvis. Como consecuencia cualquier estrés fi-

sico que aumente la presión abdominal, como la tos, el estornudo, la risa, el ejercicio, el estiramiento, el levantamiento de objetos pesados y el embarazo, provoca la pérdida de orina desde la vejiga urinaria. La **incontinencia de urgencia** o **apremio** es más común en las personas mayores y se caracteriza por la necesidad abrupta e intensa de orinar, seguida de la pérdida involuntaria de orina. Puede ser causada por irritación de la pared de la vejiga como resultado de una infección o por cálculos, esclerosis múltiple, lesión de la médula espinal o ansiedad. La **incontinencia por rebosamiento** es el goteo involuntario de cantidades pequeñas de orina causada por algún tipo de bloqueo o contracciones débiles de la musculatura de la vejiga. Cuando el flujo de orina está bloqueado (p. ej., por una próstata agrandada o por cálculos) o los músculos vesicales ya no pueden contraerse, la replicación de la vejiga es excesiva y la presión en su interior aumenta hasta que salen pequeñas cantidades de orina. La **incontinencia funcional** es la pérdida de orina resultante de la imposibilidad de acudir al cuarto de baño como resultado de un accidente cerebrovascular, artritis severa o enfermedad de Alzheimer. La elección del tratamiento adecuado depende del diagnóstico correcto del tipo de incontinencia. El tratamiento incluye ejercicios de Kegel, entrenamiento de la vejiga, medicación e incluso cirugía. ■

► PREGUNTAS DE REVISIÓN

22. ¿Qué factores intervienen en la propulsión de la orina desde la pelvis renal hasta la vejiga urinaria?
23. ¿Qué es la micción? ¿Cómo se produce el reflejo de la micción?
24. Compare la localización, la longitud, y la histología de la uretra masculina y de la uretra femenina.

TRATAMIENTO DE LOS DESECHOS EN OTROS SISTEMAS DEL ORGANISMO

► OBJETIVO

Describir la manera en la que son tratadas las sustancias de desecho.

Como se comentó, sólo una de las diversas funciones del aparato urinario es contribuir a la evacuación de algunos materiales de desecho. Aparte de los riñones, otros tejidos, órganos y procesos cooperan con la acumulación temporaria de los desechos, su transporte, el reciclado de materiales y la excreción del exceso de sustancias tóxicas del organismo. Este tratamiento de los residuos metabólicos incluye lo siguiente:

- **Amortiguadores (buffers) del organismo.** Los amortiguadores de los líquidos corporales amortiguan el exceso de iones hidrógeno (H^+), e impiden de tal modo el aumento de la acidez de los líquidos corporales. Los buffers, como los cestos de residuos, tienen una capacidad limitada; finalmente los H^+ , al igual que los papeles de un cesto, deben eliminarse del organismo por excreción.