po la acetilcolina es el agente transmisor; el resto de las sinapsis secretan otras substancias. Es lógico suponer que el paso de varios impulsos nerviosos aumente la concentración de acetilcolina en el espacio sináptico y que se difunda en todas direcciones. Así ocurre, en efecto, pero ni la concentración alcanza a ser muy alta, ni la difusión llega muy lejos, debido a la constante presencia en la proximidad de las sinapsis de la enzima *acetilcolinesterasa* que destruye la acetilcolina. La inactivación por ruptura de la molécula evita la despolarización continua de la siguiente fibra nerviosa, o el desplazamiento desordenado del impulso nervioso a otras fibras.

Bajo ciertas condiciones esta enzima deja de funcionar. Si en forma accidental alguna persona ingiere una dosis de un insecticida del tipo de los fosfatos orgánicos, como el malathion o el paration, la actividad de la acetilcolinesterasa cesa. ¿Cuáles pueden ser los efectos del malathion sobre la transmisión sináptica? ¿Qué efectos sobre la conducta pueden resultar?

En la sinapsis, la secreción del agente químico transmisor se realiza únicamente en el extremo de una de las dos células nerviosas presentes. Si el impulso nervioso se inicia en cualquier otro lugar de la fibra nerviosa, se extenderá hacia ambos extremos, pero como solamente uno de ellos es capaz de producir acetilcolina, por allí llegará el impulso hasta el espacio sináptico, para proseguir a la siguiente célula. En el otro extremo de la célula excitada no se liberará acetilcolina y el impulso no podrá llegar más lejos en esa dirección. Esto asegura la transmisión de los impulsos en un solo sentido a lo largo del sistema nervioso.

En algunas sinapsis la cantidad de acetilcolina (o de otra substancia química) que se produce cuando un impulso llega al final de la fibra no basta para producir un impulso en la neurona siguiente. Sin embargo, cuando una serie de impulsos llegan en sucesión rápida a la sinapsis, puede liberarse acetilcolina en cantidad suficiente para iniciar un impulso en la próxima célula. A este fenómeno se le llama *sumación*, debido a que los efectos de varios impulsos nerviosos o de varias fibras se suman para propagar el impulso a la célula nerviosa situada a continuación.

23-13 *Reflejos y arcos reflejos*

Un reflejo es una respuesta automática innata y estereotipada a un estímulo dado, que sólo depende de las relaciones anatómicas de las neuronas que participan. Típicamente, un reflejo afecta a una parte del cuerpo, no a la totalidad de él. La flexión de la pierna como respuesta a un estímulo doloroso y la constricción de la pupila a la luz intensa son reflejos típicos. Reflejos son las unidades funcionales del sistema nervioso, y muchas de nuestras actividades son el resultado de ellos. Hemos visto ya lo importante que son los reflejos para controlar la frecuencia cardiaca, la presión arterial, la respiración, la salivación, los movimientos del aparato digestivo, etc. Cuando pisamos un objeto agudo o nos ponemos en contacto con algo caliente, no esperamos hasta que el dolor sea experimentado por el cerebro y luego, tras deliberación, decidimos qué hacer; nuestras respuestas son inmediatas y automáticas. El pie o la mano es retirado por acción refleja *antes* de experimentar dolor. Muchas de las actividades más complicadas de nuestra vida cotidiana, como andar, son reguladas en gran parte por reflejos. Los existentes al nacer, y comunes a todos los hombres, se llaman *reflejos heredados;* otros, adquiridos posteriormente como resultado de la experiencia, se conocen como *reflejos condicionados.*

Los requerimientos anatómicos mínimos para la conducta refleja son una neurona sensorial, con un receptor para descubrir el estímulo, unidos por una sinapsis a una neurona motora, que se adhiere a un músculo o algún otro efector. Este, el tipo más sencillo de *arco reflejo,* se denomina *monosináptico* porque sólo hay una sinapsis entre las neuronas sensorial y motora. Muchos arcos reflejos comprenden una o más interneuronas entre las neuronas sensorial y motora (fig. 23-18). Un *reflejo simple,* en el que la estimulación de un receptor produce contracción de un músculo, encuentra su expresión típica en la "sacudida de la rodilla". Cuando se golpea el tendón de la rótula y, por tanto, se extiende, los receptores del tendón son estimulados y un impulso se transmite por el arco reflejo hasta la médula espinal y desciende, y el músculo adherido al tendón se contrae, produciendo una súbita extensión de la pierna.

Muchos reflejos afectan a las conexiones de muchas interneuronas de la médula espinal. Esta interviene no sólo en la conducción de impulsos al cerebro y desde éste, sino que desempeña también un importante papel en la integración de la conducta refleja. Su importancia a este respecto se demuestra fácilmente en un animal "espinal", un animal al que se le ha destruido o extirpado el cerebro. Un experimento que demuestra esto consiste en extirpar el cerebro a una rana, aunque dejando intacta la médula espinal, y aplicando luego un pedazo de papel impregnado de ácido a la espalda del animal. Cualquiera que sea el número de veces que se aplique el pedazo de papel a la piel, una pierna invariablemente se levantará y extenderá. Esta respuesta, que afecta a muchos músculos que trabajan en forma coordinada, es puramente refleja, y demuestra claramente una de las principales características de un reflejo: fidelidad de repetición. Una rana con cerebro podría hacer la respuesta dos o tres veces, pero finalmente haría algo distinto –quizá alejarse saltando. Muchos reflejos tienen cierto valor para la supervivencia del animal; la configuración anatómica causante del reflejo fue escogida en la evolución debido a su valor para la supervivencia.

La complejidad de un reflejo varía según el número de segmentos espinales afectados. El arco reflejo en su totalidad puede estar contenido en un solo segmento espinal. Pero muchos reflejos requieren conexiones interneurales entre dos o más segmentos de la médula espinal. El reflejo de rascarse, el reflejo de enderezarse y los reflejos de la locomoción suponen la entrada de información sensorial procedente de muchos segmentos de la médula. Complejos reflejos pueden hacer participar a ciertas partes del cerebro, como el mesencéfalo y el bulbo raquídeo.

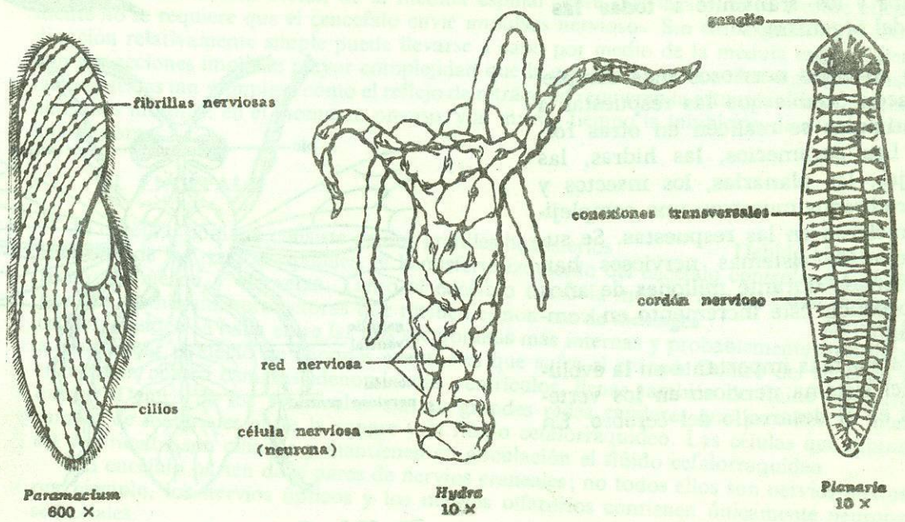
23-4. Las estructuras nerviosas varían en los diferentes organismos

Las plantas y los protistos unicelulares no tienen células nerviosas especializadas. Sin embargo, estos organismos son capaces de responder a ciertos estímulos. Por ejemplo, usted aprendió en la Sec. 22-1, que las plantas responden a la luz por medios químicos. Los organismos unicelulares también reaccionan a los estímulos por medios químicos. La sensibilidad de estas células a los estímulos indica que la respuesta a un estímulo es una característica general de la mayoría de los tejidos vivos. Sin embargo, las respuestas de los protistos y las plantas son comparativamente lentas. Las reacciones más eficientes a los estímulos son efectuadas por un sistema nervioso.

Paramecium es un protisto que tiene regiones celulares especiales que pueden responder a ciertos estímulos. (Ver la Fig. 23-4.) Este protisto tiene una serie de fibrillas nerviosas que pueden verse con un microscopio electrónico. Si se cortan las fibrillas, los cilios no se mueven más. La mayoría de los principales grupos de animales multicelulares, excepto las esponjas, tienen células nerviosas definidas. Sin embargo, aun sin células nerviosas, las esponjas son capaces de responder a estímulos externos. Una célula de una esponja puede transmitir por medios químicos el efecto de un estímulo a una célula vecina.

La *Hydra* tiene un sistema de células nerviosas conectadas entre sí. Tal sistema se conoce como *red nerviosa.* Cuando se aplica un estímulo en cualquier punto a una *Hydra,* se extiende a través de la red nerviosa en todas direcciones en el organismo. Sin embargo, para que el efecto se extienda muy lejos, el estímulo debe ser fuerte y duradero. La red nerviosa transporta señales más lentamente que los nervios de los organismos superiores. Los animales superiores tienen redes nerviosas y sistemas más organizados. La planaria, por ejemplo, tiene un sistema nervioso

FIG. 23-4. *Los sistemas nerviosos de varios organismos primitivos ilustran diferentes niveles de organización: desde las fibrillas dentro de una misma célula, pasando por una red nerviosa, a un doble cordón con muchas células nerviosas.*



primitivo, además de la red nerviosa. Aunque los vertebrados tienen sistemas nerviosos altamente organizados, se encuentran redes nerviosas en sus vasos sanguíneos y en la pared del intestino.

El sistema nervioso simple de la planaria contiene las estructuras básicas encontradas en sistemas más complejos. En la región de la cabeza la planaria tiene dos grupos de células nerviosas denominadas **ganglios**. Un cordón nervioso corre separado a lo largo de cada lado del cuerpo. Estos cordones nerviosos están unidos por enlaces de conexión. (Ver la Fig. 23-4.) En el Reino Animal se encuentran mu-

chas variaciones de este tipo básico de sistema nervioso. Generalmente la evolución del sistema nervioso en los animales ha sido descrita como un aumento en complejidad de las mismas características encontradas en la planaria.

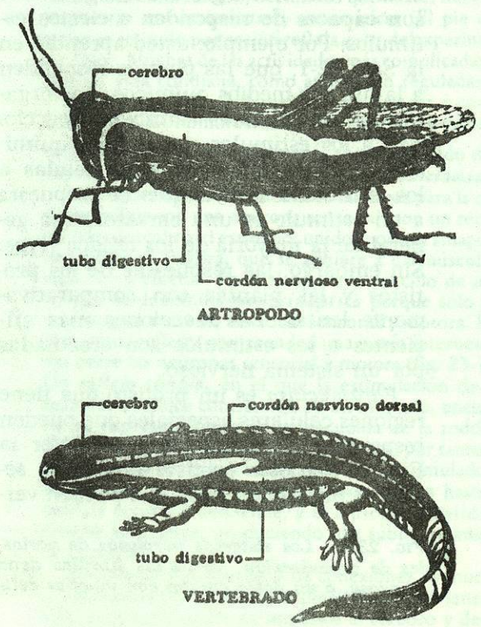
El sistema nervioso de la abeja (Fig. 23-5) muestra cuán complejo puede ser el sistema nervioso de un insecto. Básicamente el sistema nervioso de la abeja es similar al de la planaria. En el insecto hay un par de cordones nerviosos que se unen bajo el aparato digestivo. Los ganglios cefálicos, el cerebro del insecto, están constituidos por miles de células nerviosas que se extienden por los cordones nerviosos. De los cordones nerviosos se dirigen ramas de nervios a los segmentos del cuerpo del insecto.

En los vertebrados, el cordón nervioso es un tubo simple situado sobre el tracto digestivo. El cerebro, una extensión del cordón nervioso, está también sobre el tracto digestivo. En la Fig. 23-6 se compara la ubicación de los cordones nerviosos en un insecto con la de un vertebrado. De estos cordones nerviosos, una red compleja de nervios recibe estímulos y los transmite a todas las partes del organismo.

Los sistemas nerviosos más complejos hacen posible que las respuestas a los estímulos se realicen en otras formas. Los paramecios, las hidras, las esponjas, las planarias, los insectos y los vertebrados muestran una complejidad creciente en las respuestas. Se supone que los sistemas nerviosos han evolucionado durante millones de años para producir este incremento en complejidad.

El factor más importante en la evolución del sistema nervioso en los vertebrados es el desarrollo del cerebro. En

Fig. 23-6. *Note las diferencias en la estructura y la localización del cordón nervioso entre el artrópodo, representado por un saltamontes, y el vertebrado ilustrado por una salamandra.*



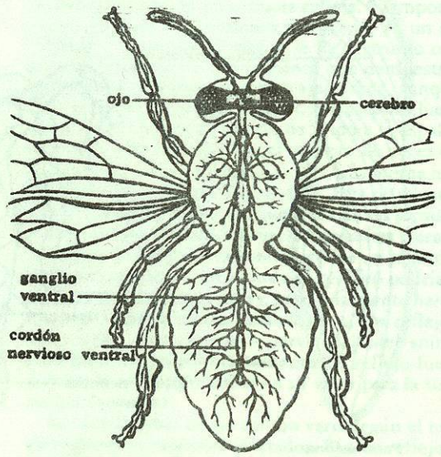


Fig. 23-5. *Compare el sistema nervioso de la abeja, un sistema típico de artrópodos, con el del* Paramecium, Hydra *y planaria que aparecen en la Fig. 23-4.*

CAPILLA ALFONSINA

EL SISTEMA NERVIOSO CENTRAL DEL HOMBRE

El sistema nervioso central del hombre consiste de la médula espinal y del encéfalo

LA MEDULA ESPINAL

La médula espinal es un cordón blanco brillante que se desprende de la base del encéfalo y recorre la columna vertebral. Una sección transversal de la médula espinal nos demuestra que únicamente la porción exterior, la llamada «materia blanca» de la médula, es realmente blanca. La región interior es de color gris y se denomina la «materia gris». La materia gris está atravesada por un canal central de recorrido vertical y lleno del flúido cefalorraquídeo; este canal se conecta con las cavidades (ventrículos) del encéfalo, los cuales también están llenos de este líquido

La materia blanca consiste principalmente de fibras nerviosas largas provistas de envoltura de mielina que recorren hacia arriba y hacia abajo la médula espinal. La materia gris está constituida por los cuerpos celulares, agrupados estrechamente, de células de asociación y neuronas motoras.

A intervalos regularmente distribuidos y a cada lado de la médula espinal, se hallan 31 pares de proyecciones que representan las raíces nerviosas. Estas se unen directamente para formar los nervios mixtos del sistema nervioso periférico.

La médula espinal lleva a cabo dos funciones principales de la coordinación nerviosa. En primer lugar conecta el sistema nervioso periférico al encéfalo. La información nerviosa que llega a la médula espinal, a través de las neuronas sensoriales, puede ser transmitida a lo largo de la médula por medio de las neuronas de asociación. En el encéfalo esta información puede ser comparada, hecho lo cual dictamina la acción apropiada. Los impulsos procedentes del encéfalo viajan a través de la médula espinal, atraviesan otras neuronas de asociación, luego abandonan la médula y continúan por las neuronas motoras.

La segunda función de la médula espinal es la de actuar como un centro de coordinación menor. Las respuestas simples de reflejo, por ejemplo, el reflejo de retracción, puede tener lugar mediante la sola acción de la médula espinal. Para que la acción se efectúe eficazmente no se requiere que el cencéfalo envíe impulsos nerviosos. Sin embargo, sólo la coordinación relativamente simple puede llevarse a cabo por medio de la médula espinal. Pero aun sus acciones implican mayor complejidad que la que hasta ahora se ha sugerido. Hasta las respuestas tan «simples» como el reflejo de retracción requieren la estimulación de muchas neuronas motoras, en el momento preciso, y al mismo tiempo la inhibición de otras neuronas motoras.

EL ENCEFALO

El encéfalo humano consiste de dos grandes hemisferios . Debido al entrecruzamiento de los tractos espinales, el hemisferio izquierdo del encéfalo controla el lado derecho del cuerpo, y viceversa. Tanto el encéfalo como la médula espinal están cubiertos por tres membranas protectoras que reciben el nombre de meninges. El líquido cefalorraquídeo se halla entre las dos membranas más internas y probablemente contribuye a amortiguar el efecto de choques eventuales que sufra el cráneo. Dentro del encéfalo se encuentran cuatro cámaras, denominadas ventrículos, llenas también de flúido cefalorraquídeo. Dentro de los ventrículos existen grandes redes capilares que permiten el intercambio de materiales entre la sangre y el flúido cefalorraquídeo. Las células que tapizan los ventrículos son ciliadas y mantienen en circulación el flúido cefalorraquídeo.

Del encéfalo parten doce pares de nervios craneales; no todos ellos son nervios mixtos; por ejemplo, los nervios ópticos y los nervios olfatorios contienen únicamente neuronas sensoriales.

El encéfalo está dividido en tres regiones: el encéfalo anterior, el encéfalo medio y el encéfalo posterior. Estas divisiones no son inmediatamente reconocibles en el encéfalo de un adulto humano, por cuanto cada región está configurada por varias partes o lóbulos. Sin embargo, el patrón es claramente visible durante el desarrollo del encéfalo en el embrión. Los encéfalos de todos los vertebrados están construidos de acuerdo con este plan básico