CAPÍTULO 24. BASES NEURALES DEL CONTROL MOTOR

En este capítulo vamos a exponer los **sistemas motores somáticos**, a los que en adelante nos referimos como **sistemas motores**. En el caso de la especie humana, los sistemas motores nos permiten estar de pie, manteniendo nuestro cuerpo erguido, en contra de la gravedad, con una base de apoyo tan pequeña como son nuestros pies. Las **posturas**, esto es, las posiciones estáticas del cuerpo o de cualquiera de sus partes, y los **movimientos**, que son el paso de una postura a otra, se alternan constantemente en nuestros comportamientos.

El mantenimiento de nuestras posturas y la realización de los movimientos están controlados por diferentes sistemas motores de nuestro SNC. Los sistemas motores están formados por varios componentes del SNC y se organizan de una manera jerárquica, aunque no de modo estricto, ya que también existen vías paralelas. El concepto de jerarquía motora es fundamental y para su comprensión, el capítulo está organizado siguiendo el orden de los distintos componentes en la misma: comienza desde el nivel superior – la corteza de asociación -, y sigue con los sistemas descendentes corticales y troncoencefálicos que canalizan las señales hasta el nivel inferior en el organigrama del control motor – las motoneuronas de la médula espinal y del tronco del encéfalo, que inervan los músculos -. El capítulo termina presentando los sistemas moduladores – cerebelo y ganglios basales – que participan en el control motor influyendo sobre los sistemas motores descendentes.

APROXIMACIÓN GENERAL A LOS SISTEMAS MOTORES

Componentes

El origen y la trayectoria funcional de los sistemas motores, son inversos a los de los sistemas sensoriales, ya que las vía motoras se originan en distintos niveles del SNC y siguen una trayectoria descendente por el mismo hasta converger en las **motoneuronas del tronco del encéfalo** y de la **médula espinal**. Distintos núcleos troncoencefálicos y varias áreas de la corteza cerebral originan las vías motoras que descienden hasta las motoneuronas y forman los **sistemas motores descendentes corticales y troncoencefálicos**. Además, participan en el control motor vías centrales que actúan sobre las vías motoras descendentes, y no sobre las motoneuronas. En estas vías intervienen **amplias regiones de la corteza cerebral**, los **ganglios basales** y el **cerebelo**, y forman los sistemas centrales de control motor. Todos ellos forman los sistemas motores.

Características generales de la organización de los sistemas motores

Entre los componentes de los sistemas motores se establece una relación funcional jerárquica. Los típico de una **organización jeráquica** es que existen niveles con gradación de funciones, y que las órdenes fluyen desde los niveles superiores hasta los inferiores.

Las motoneuronas de la médula espinal y del tronco del encéfalo ocupan el **nivel inferior** en el organigrama del control motor ya que, por una parte, tienen competencia para realizar actos motores estereotipados y automáticos, como los movimientos reflejos, sin contar con los niveles superiores, y por otra parte, sobre ellas convergen directa o indirectamente todas las órdenes motoras superiores, bien para modular su propia actuación refleja, bien para corrdinarla en actos motores controlados en niveles superiores.

El **nivel superior** de la jeraquía motora lo desempeña la corteza cerebral. La corteza de asociación tiene el escalafón más alto, aunque desde estas áreas no se envían señales descendentes a la médula espinal para el control motor. Las señales desde la corteza de asociación confluyen en las áreas premotoras y en área motora primaria. Junto al área motora primaria, las áreas premotoras son el origen de las vías motoras descendentes de la corteza cerebral. Los núcleos del tronco del encéfalo en los que se originan vías descendentes a la médula espinal constituyen un **nivel intermedio** en la jerarquía motora. Además, hay dos **sistemas moduladores**, los ganglios basales y el cerebelo, que no envían órdenes directas a la médula espinal, sino que intervienen en el control motor actuando sobre los sistemas descendentes. Las vías motoras descendentes están organizadas, además de en serie, en **paralelo**.

ÁREAS CORTIZALES QUE INTERVIENEN EN EL CONTROL MOTOR

Las áreas de la corteza cerebral que intervienen en el control motor incluyen **áreas de asociación de la corteza parietal y prefrontal**, y las áreas denominadas clásicamente motoras, es decir, **las áreas motoras secundarias, o áreas premotoras**, y el **área motora primaria**. Cada una de estas áreas parece ocuparse de distintos aspectos del control motor. Las áreas de asociación actúan al nivel más alto de la jerarquía motora, seleccionando la mejor estrategia para llevar a cabo un acto motor.

Corteza de asociación parietal posterior y prefrontal dorsolateral

Esta corteza es un área de asociación que está muy relacionada con las áreas premotoras. La corteza parietal posterior recibe proyecciones de la corteza somatosensorial, de la corteza vestibular y auditiva, de la corteza visual, motora y de la corteza límbica.

Así sobre ella converge una gran cantidad de información respecto a la posición de las partes del cuerpo que se van a mover, a la situación espacial de los objetos en el entorno, a los planes o programas motores, y al estado de motivación del organismo. Una de las funciones fundamentales parece ser el procesamiento de la información visual para la localización de los objetos en el espacio y aportar las claves espaciales necesarias para la realización de los movimientos.

Por otra parte, la observación de pacientes con lesiones indica que la integridad de esta área parece ser fundamental para realizar **movimientos dirigidos a un blanco**, como los movimientos de alcance y de presión que normalmente hacemos para coger los objetos.
Los pacientes tienen problemas para alcanzar objetos en el espacio, sin que exista un trastorno motor aparente, una alteración denominada **ataxia óptica**.

La intervención de esta área en el control motor no parece ser fundamental para la propia ejecución del movimiento, sino para **aportar claves sensoriales**, fundamentalmente visuales, así como **señales motivacionales**.

La corteza parietal posterior parece que interviene en los movimientos dirigidos a un blanco integrando los estímulos sensoriales con el estado del individuo, y enviando esta información a la corteza premotora y a la corteza de asociación prefrontal dorsolateral.

Áreas motoras de la corteza cerebral

Las áreas motoras de la corteza cerebral constituyen el nivel superior de la jerarquía motora desde la que se envían órdenes descendentes a los niveles superiores. El área, o corteza, **motora primaria**, está situada en la circunvolución precentral y se extiende desde el surco lateral hasta la superficie medial del hemisferio cerebral. Anterior a ella, se localizan las **áreas premotoras o corteza motora secundaria**, formada por la **corteza premotora**, en la superficie lateral del hemisferio, y el **área motora suplementaria**, localizada en la parte superior y medial del mismo. Las tres áreas de la corteza motora están especializadas en el control motor, y cuando se estimulan eléctricamente se producen movimientos de determinadas partes del cuerpo.

La corteza motora primaria contiene una representación topográfica, un mapa, de las distintas partes del cuerpo, llamado **organización somatotópica**. Las zonas que controlan cada parte del cuerpo en las tres áreas de la corteza motora de un hemisferio están interconectadas por fibras de asociación.

Función de las áreas premotoras o corteza motora secundaria

La corteza de asociación parietal posterior parece influir en los movimientos voluntarios, propositivos, definiendo las coordenadas espaciales que los guían, y en la corteza de asociación prefrontal dorsolateral parece que se seleccionan las estrategias y se toma la decisión de iniciar los movimientos voluntarios, en función de la información sensorial procedente de la corteza de asociación parietal posterior.

Corteza premotora

Proyecta bilateralmente a la corteza motora primaria y a otras estructuras motoras, y recibe proyecciones corticales desde las áreas visuales y desde la corteza parietal posterior y prefrontal dorsolateral. Parece que su función primordial no es la de provocar movimientos de los músculos, sino que participa en la preparación de los movimientos, en la **planificación o programación motora**.

En humanos, el área premotora se activa cuando un movimiento es guiado por un estímulo externo, por ejemplo auditivo, pero si no existe esta estimulación externa, el área premotora no se activa cuando el sujeto realiza el movimiento.

Área motora suplementaria

La conectividad del **área motora suplementaria** apunta a que su función es realizar una compleja integración sensoriomotora. Sus proyecciones corticales van principalmente a la corteza motora primaria. Se considera que esta área influye sobre los movimientos voluntarios programando los movimientos individuales en secuencias complejas y coordinadas. Su estimulación provoca movimientos complejos, como abrir y cerrar la mano.
Por lo tanto, se puede concluir que el área motora suplementaria interviene en la **programación y coordinación de movimientos complejos (coordinación bimanual).**

Función del área motora primaria

Se activa durante la ejecución de los movimientos y puesto que sobre ella, convergen las proyecciones de las áreas premotoras, parece que estas áreas la preparan para la realización de los mismos. Además, recibe importantes proyecciones desde la corteza somatosensorial primaria, de modo que las neuronas que responden a los estímulos de una parte del cuerpo envían proyecciones a las neuronas motoras que controlan los músculos de esas mismas partes del cuerpo. Estas proyecciones son muy importantes porque proporcionan a la corteza motora retroalimentación sensorial acerca de la contracción de los músculos y de la magnitud de los movimientos de se están realizando.

Por tanto, el área motora primaria participa en el **inicio,** o **disparo del movimiento.** La **fuerza de la contracción muscular** se codifica mediante un código temporal, esto es por la frecuencia de disparo de las neuronas de la corteza motora primaria. Sin embargo, la **dirección de los movimientos** no parece depender tanto de la acción de neuronas individuales, sino de la acción conjunta de amplias poblaciones de neuronas cuya activación está sintonizada para los movimientos en una dirección preferida.

La corteza motora primaria interviene, por tanto, en la ejecución de los movimientos, estableciendo las **órdenes motoras** de cuándo y cómo se han de mover los músculos.

SISTEMAS MOTORES DESCENDENTES

La corteza motora constituye el nivel superior de la jerarquía motora en la que se originan vías descendentes a la médula espinal para el control motor. Además, la corteza motora envía vías descendentes a diversos núcleos del tronco del encéfalo: a núcleos motores de los nervios craneales y a núcleos en los que se originan, a su vez, vías descendentes a la médula espinal. Por tanto, los sistemas motores descendentes los forman los tractos que desde la corteza motora y el tronco del encéfalo descienden hasta confluir sobre las motoneuronas, que son la vía final común desde las que se controlan los músculos.

Vías descendentes de la corteza motora

Estas fibras se originan en las neuronas piramidales de la capa V de las áreas motoras de la corteza cerebral. Algunas de estas neuronas como las **células de Betz**, son las más grandes de SNC, pero otras muchas neuronas piramidales contribuyen a los tractos motores descendentes. A través de estos tractos, las áreas motoras de la corteza cerebral controlan los músculos, tanto de la cabeza como del tronco y las extremidades.

Las fibras de los tractos corticobulbar, corticoespinal ventral, corticoespinal lateral, descienden somatotópicamente por la cápsula interna y los pedúnculos cerebrales, e influyen sobre las neuronas motoras del tronco del encéfalo y de la médula espinal.

El **tracto corticobulbar** termina sobre los núcleos motores de los nervios craneales. A través de este, la corteza motora controla los músculos de la cabeza que intervienen en movimientos voluntarios como los que hacemos al comer, al tragar, al hablar o al sonreir.

El **tracto corticoespinal lateral** cruza la línea media en las pirámides bulbares y desciende por la columna **lateral** de la médula espinal, terminando en los niveles cervical y lumbosacro, que son los que invervan los músculos de las extremidades.

El **tracto corticoespinal ventral**, no cruza las pirámides y sigue un curso **medial** por la columna ventral de la médula espinal. Sus neuronas son las que inervan los músculos axiales (cuello, tronco) y los proximales a las extremidades.

Los tractos corticoespinales son **vías directas** por las que la corteza motora influye sobre las motoneuronas de la médula espinal. Pero además de estas vías directas, la corteza motora influye sobre la médula espinal a través de las **vías indirectas** que hacen un relevo intermedio y terminan sobre núcleos del tronco del encéfalo que, a su vez, envía proyecciones descendentes a la médula espinal.

Las **funciones fundamentales de los tractos descendentes** a la médula espinal son: 1) promover los movimientos independientes de las extremidades para la ejecución de los movimientos voluntarios; 2) controlar la postura, tanto para mantener la posición erguida del cuerpo integrando sus movimientos con los de la cabeza, como para promover los ajustes posturales que permitan mantener la estabilidad del cuerpo al realizar cualquier movimiento; y 3) dirigir la locomoción.

Función de los tractos corticoespinales

El **tracto corticoespinal lateral** controla los músculos distales de las extremidades: antebrazos y parte inferior de las piernas, manos y pies. Su influencia es fundamental para la realización de movimientos voluntarios, finos y precisos de las extremidades, sobre todo de las manos. Pero su función primordial es controlar los músculos más distales de las mismas, los de los dedos. También es fundamental en la **manipulación de objetos**.

El **tracto corticoespinal ventral** interviene en el control de los músculos del cuello, del tronco y de los músculos proximales de las extremidades, colaborando con la vía indirecta y los tractos asociados que se originan en el tronco del encéfalo para el **control de la postura**.

Vías descendentes del tronco del encéfalo

El tronco del encéfalo contituye un nivel intermedio entre la corteza motora y la médula espinal en la jerarquía del control motor, y además sus motoneuronas se sitúan al nivel inferior de la jerarquía motora, al igual que las de la médula espinal.

Las proyecciones motoras del tronco a la médula espinal están organizadas, al igual que las de la corteza motora, en vías que descienden lateral y medialmente. La **vía lateral** la forma el tracto rubroespinal y las **vias mediales** incluyen los tractos vestibuloespinales**,** los tractos reticuloespinales y el tracto tectoespinal.

Función de la vía lateral: tracto rubroespinal

Influye en el control voluntario de las extremidades contralaterales. Del tracto rubroespinal depende la capacidad de flexión de los hombros y las extremidades, fundamentalmente del codo y la mano, pero no de los dedos. En conclusión, este tracto participa en el control de los movimientos independientes de las extremidades y los hombros, pero su influencia se restringe al codo y a la mano, mientras que el tracto corticoespinal es el responsable de los movimientos independientes de los dedos.

Función de las vías mediales del tronco del encéfalo

Estas vías influyen en el control de los músculos axiales y de los proximales de las extremidades. La amplitud de terminación de sus axones es importante para distribuir el control a muchos núcleos motores mediales, que están funcionalmente relacionados con el mantenimiento del equilibrio y de la postura. Constituye un sistema motor básico que asegura la postura erguida del cuerpo, la posición estable mientras se está realizando cualquier movimiento, los movimientos de orientación del cuerpo y la cabeza, y la locomoción. Su función

es proveer el sistema básico de control motor que puede ser modulado por los niveles superiores de la jeraquía motora.

Además las vías mediales descendentes del tronco del encéfalo controlan los **ajustes posturales anticipatorios** que requiere cualquier movimiento voluntario. Cuando este mecanismo falla, se pone en marcha un mecanismo compensatorio de retroalimentación provocado por la pérdida de equilibrio.

Los tractos descendentes del tronco del encéfalo no sólo intervienen en el mantenimiento de la postura, sino también en el control de los movimientos que nos permiten desplazarnos de un sitio a otro, como andar o correr. Estos movimientos, denominados en su conjunto **locomoción**, requieren la coordinación de los músculos extensores y flexores.

En la médula espinal, existen circuitos, o redes neurales, en los que las interneuronas son fundamentales, que se denominan **generadores de acción central o generadores centrales de patrones**, porque generan patrones motores rítmicos.

EL CEREBELO

Además de los tres niveles jerárquicos, que hemos visto, hay otras dos estructuras que regulan funciones motoras: el cerebelo y los ganglios basales. Ninguna de ellas se caracteriza por enviar fibras directamente a la médula espinal sino que ejercen principalmente su influencia a través de conexiones con los centros motores en los que se originan los tractos motores descendentes y, por tanto, se consideran **centros moduladores del control motor.**

Se considera que el cerebelo compara las órdenes motoras descendentes con la información acerca de los movimientos que se están realizando, y actúa sobre el tronco del encéfalo y sobre la corteza motora para aportar precisión a los movimientos, corrigiendo los errores que les desvían del curso deseado, ya sea a nivel de ejecución actuando sobre las vías descendentes.

El **vestibulocerebelo**, recibe fundamentalmente información vestibular procedente del órgano vestibular y de los núcleos vestibulares acerca de la orientación de la cabeza respecto a la gravedad, y de los cambios de posición, esto es, de los movimientos de la cabeza. Las señales correctivas a los núcleos vestibulares, que influyen sobre las motoneuronas espinales que controlan los músculos del cuello, los axiales y los proximales de las extremidades para **modificar la postura y restablecer el equilibrio**. Las lesiones en el vestibulocerebelo producen **inestabilidad** tanto para mantenerse quieto de pie como durante la ejecución de movimientos.

El **espinocerebelo** recibe información cutánea y propioceptiva de toda la superficie corporal y de la cabeza, a través de los tractos espinocerebeloso dorsal, cuneocerebeloso y trigeminocerebeloso.

Cada uno de los componentes del espinocerebelo, el vermis y la zona intermedia de los hemisferios, influye sobre distintas vías descendentes. La **zona intermedia** de los hemisferios influye sobre los músculos distales de las extemidades en los **que facilita el tono muscular flexor**.

Las céluas de Purkinje del **vermis** disminuyen la actividad de las neuronas del núcleo vestibular lateral, con lo que **disminuye el tono muscular extensor** en las extremidades.

El **cerebrocerebelo** corresponde anatómicamente al hemisferio lateral de la corteza cerebelosa y al núcleo dentado. De las tres divisiones funcionales del cerebelo, el cerebrocerebelo es el sistema motor fundamentamente modulador de los sistemas motores descendentes de la corteza cerebral. En el cerebrocerebelo converge información descendente de las vías motoras e información de distintos sistemas sensoriales.

La interconexión del cerebrocerebelo con las áreas motoras de la corteza hace posible que reciba información tanto de la planificación de los movimientos como de las órdenes motoras que están enviando los tractos motores descendentes de la corteza y que, en consecuencia, pueda modular la actividad de la corteza motora para la planificación de nuevos movimientos, y para la ejecución suave y precisa de los mismos. Su objetivo es la coordinación de los movimientos voluntarios.

Las lesiones o la inactivación reversible del cerebrocerebelo producen **demoras en el inicio de los movimientos**.

LOS GANGLIOS BASALES

Los ganglios basales (cuerpo estriado, núcleo subtalámico y sustancia negra) forman un sistema funcional de gran importancia para el control motor. La alteración de los ganglios basales produce trastornos motores que implican la aparición de movimientos involuntarios. Dos de estos trastornos, son la **corea, o enfermedad de Huntington**, y la **enfermedad de Parkinson.** El primero es un trastorno hipercinético, que se caracteriza por un exceso de movimientos incontrolables y rápidos, que en principio sólo implican a la cara y las manos, pero que cuando la enfermedad avanza se extienden a gran parte del cuerpo. La enfermedad de Parkinson es un trastorno hipocinético, que se caracteriza por la carencia y el enlentecimiento de los movimientos, la rigidez y los temblores, sobre todo en estado de reposo muscular.

Al igual que ocurre con el cerebelo, los ganglios basales no forman parte de los sistemas motores descendentes, sino que su intervención en el control motor se realiza, fundamentalmente, por bucles de retroalimentación entre los diversos componentes.

Se ha sugerido que los ganglios basales intervienen fundamentalmente en la planificación y en la fase de inicio de los movimientos. También se ha sugerido que pueden intervenir en el inicio de los movimientos generados internamente, es decir, en ausencia de estimulación externa.

Los trastornos motores hipercinéticos, como la **corea de Huntington** que mencionamos anteriormente, el **balismo**, un trastorno que se caracteriza por un movimiento de lanzamiento violento e involuntario de las extemidades, o los **tics**, caracterizados por las contracciones estereotipadas, repetitivas e involuntarias de determinados músculos, parecen depender de una **disminución en la actividad del núcleo subtalámico (NST)**

Concluyendo, podemos decir que los ganglios basales intervienen en el control motor regulando, o modulando, las funciones de las áreas de la corteza cerebral que intervienen en el control motor, al igual que lo hacen los hemisferios laterales del cerebelo.