

SISTEMA MOTOR: CONTROL DEL MOVIMIENTO REFLEJO Y VOLUNTARIO

Para poder realizar cualquier movimiento, se necesita la interacción de diversas estructuras del sistema nervioso motor. Estas estructuras están organizadas jerárquicamente de modo que las órdenes salen desde un nivel superior hacia un nivel inferior.

- 1) El nivel inferior son las motoneuronas del asta anterior de la médula espinal y por las motoneuronas de núcleos motores troncoencefálicos.
- 2) Los núcleos del tronco del encefalo, constituyen un nivel intermedio, junto con los sistemas moduladores formados por los ganglios basales y el cerebelo.
- 3) En el nivel más alto de la jerarquía: la corteza cerebral motora.

Médula espinal

La médula espinal es la estructura que integra o coordina actividades musculares elementales, para el mantenimiento de la postura y diferentes movimientos. También desarrolla automatismos simples de marcha y movimientos defensivos simples (retirada del músculo ante cualquier agresión) a través de respuestas reflejas.

1) Motoneuronas medulares

Se distinguen:

- **motoneuronas alfa (α)** . Son de gran tamaño, sus axones están mielinizados y su velocidad de conducción es de 60-130 m/s. Estas neuronas se agrupan en la médula y forman columnas que se conocen como núcleos motores.
- **motoneuronas gamma (γ)**, más pequeñas que las anteriores. Inervan fibras musculares del huso muscular.
- **interneuronas**. Pueden ser excitadoras o inhibitoras. Un tipo especial son las interneuronas inhibitoras de Renshaw que reciben conexiones de vías supraespinales y de motoneuronas.

2) Reflejos espinales

Son las repuestas motoras más simples. Son repuestas automáticas, involuntarias, inmediatas y estereotipadas frente a un estímulo determinado.

El circuito entre la entrada del estímulo y la ejecución de la respuesta se conoce como arco reflejo. Consta de los siguientes elementos: a) receptor sensorial, b) fibra sensorial aferente, c) centro integrador, d) fibra motora eferente, y e) efector (músculo esquelético).

1. Reflejo de estiramiento o miotático, reflejo consistente en un acortamiento de las fibras de un músculo frente al estiramiento brusco del mismo. Es el único reflejo monosináptico que existe. Sirve para controlar y ajustar la longitud de los músculos esqueléticos, proporcionando el tono muscular adecuado para una respuesta rápida.

Funcionamiento de los propioceptores

1.- El huso muscular o neuromuscular.

Es una pequeña estructura fusiforme situado entre las fibras musculares. Está formado por varias fibras musculares modificadas (fibras intrafusales), con miofilamentos solamente en los extremos e inervación de motoneuronas gamma. En el centro de las fibras se sitúan las terminaciones de fibras sensoriales. Cuando se produce el alargamiento brusco de un músculo, se estiran también las fibras intrafusales. Se excitan las fibras sensoriales, y en la médula espinal sinaptan directamente con una motoneurona α (alfa). Ésta envía al músculo estirado la orden de contraerse y de cesar el estiramiento. El reflejo miotático se provoca también, como respuesta a una orden del sistema nervioso central. Las

neuronas γ actúan respondiendo a órdenes que llegan por vías supraespinales. Estimulan las fibras intrafusales, que al contraerse, provocan la excitación de los receptores, y la consiguiente respuesta motora muscular a través de las motoneuronas alfa (α). La coactivación α - γ (alfa-gamma) es el fenómeno por el cual, al ordenarse una contracción de la musculatura extrafusar, se activa simultáneamente el sistema γ , de forma que las fibras intrafusales se mantengan tensas y no pierdan su capacidad sensora.

2.- Órgano tendinoso de Golgi

El órgano tendinoso de Golgi está situado en la zona de inserción tendinosa del músculo. Son terminaciones libres y ramificadas. La contracción de las fibras musculares distiende los propioceptores provocando su despolarización. En la médula hacen sinapsis con motoneuronas α , a través de una interneurona inhibidora, disminuyendo su actividad y provocando la relajación del músculo contraído. Son responsables del reflejo miotático inverso.

Tronco del encéfalo

En él se llevan a cabo las siguientes funciones: el control y ajuste del tono muscular, la regulación de la postura y el mantenimiento del equilibrio.. En esta región se encuentran núcleos motores que desarrollan programas motores estereotipados conocidos como generadores centrales de pautas o secuencias motoras, como los respiratorios, los de la masticación o los de la marcha.

Desde los mismos se originan las vías supraespinales, vías que se dirigen hacia la médula y regulan las funciones motoras relacionadas con el mantenimiento del tono, postura y equilibrio. Según su posición, hay dos sistemas:

a) **Sistema motor dorsolateral medular** o sistema descendente lateral formado por el haz rubroespinal, que sale del núcleo rojo mesencefálico. Participa en el control de la musculatura distal de las extremidades.

b) **Sistema ventromedial** o sistema descendente medial constituido por a) los haces vestibuloespinales medial y lateral que proceden de los núcleos vestibulares bulbares, b) los haces retículoespinales medial y lateral, que salen de la formación reticular situada a lo largo del tronco, y c) el haz tectoespinal que se origina en tubérculo cuadrigémino superior, y termina en la médula cervical. Este sistema controla la musculatura axial y la musculatura proximal de las extremidades.

Núcleos motores del tronco del encéfalo

3 Formación reticular o sustancia reticular

A lo largo del tronco del encéfalo hay acúmulos de neuronas con múltiples conexiones entre sí, dando lugar a una especie de retículo. Ésta ejerce su acción excitadora o inhibidora sobre el circuito γ mediante vías que terminan en las motoneuronas o interneuronas medulares. Sus vías son dos: el haz retículoespinal medial (protuberancia y mesencéfalo) y el haz retículoespinal lateral (bulbo). Llevan órdenes opuestas. El primero excita a motoneuronas extensoras encargada de mantener el cuerpo erguido contra la gravedad. El segundo, inhibe a estas mismas neuronas, oponiéndose a la posición antigravitatoria, facilitando por tanto, la acción de los músculos flexores.

La formación reticular constituye un sistema excitador-inhibidor con la misión de lograr continuamente el tono adecuado de la musculatura.

2. Núcleos vestibulares

Están situados entre protuberancia y bulbo y se denominan superior, medial, inferior y lateral (o de Deiters). De este último se origina el haz vestibuloespinal lateral y desde los núcleos medial, superior e inferior sale el haz vestibuloespinal medial. Llegan a motoneuronas e interneuronas de la médula cervical y dorsal. El sistema vestibular ayuda a que el tono muscular en la musculatura antigravitatoria sea el apropiado, tanto en situación como en los cambios posturales del cuello y tronco originados por giros de la cabeza. Los núcleos vestibulares reciben información del aparato vestibular y señales propioceptivas de diversas partes del cuerpo, en especial de los músculos de cuello.

Los núcleos vestibulares envían eferencias a diferentes localizaciones, dentro y fuera del troncoencéfalo, provocando respuestas reflejas que ayudan a mantener una correcta coordinación entre los movimientos de todas las estructuras corporales, incluidos los ojos.

3. Núcleo rojo.

Participa en el mantenimiento postural. Se encuentra en el mesencéfalo y recibe conexiones del cerebelo y de la corteza motora. De él sale el haz rubroespinal que cruza al lado opuesto, y desciende de forma paralela al haz piramidal hacia la médula. Activa motoneuronas flexoras de las extremidades e inhibe extensoras. Es importante en la movilidad flexora de las partes distales de las extremidades, lo que facilita el cambio de posición de éstas en los movimientos reflejos posturales.

4. Tubérculos cuadrigéminos superiores. Se encuentran en la parte posterior de mesencéfalo. Reciben principalmente información visual, aunque también les llega información sensorial de otro tipo (auditiva, vestibular, somática). Intervienen en respuestas reflejas de atención, reflejos que requieren coordinar la movilidad de cuello, cabeza y ojos, para orientarlos hacia el estímulo y preparar la respuesta que puede ser incluso, de defensa o de huida.

Corteza cerebral

La organización de los movimientos más complejos y elaborados se lleva a cabo a través de estructuras situadas en los niveles medio y superior del encéfalo, ejerciendo el llamado control supraespinal. Estas estructuras son la corteza cerebral, el cerebelo y los ganglios basales.

La corteza cerebral interviene en el control de los actos motores, desde que se establece la finalidad de los mismos (áreas de asociación), y se organiza un programa o un plan, hasta que se dan las órdenes de cómo se ha de realizar ese programa que culminará con éxito el acto motor (áreas motoras).

La corteza motora, está situada en el lóbulo frontal inmediatamente por delante de la cisura de Rolando. Se distinguen dos áreas funcionalmente diferentes:

a) **Corteza motora primaria**, situada en la circunvolución precentral (área 4 de Brodmann). Es la corteza capaz de provocar movimientos simples con una estimulación eléctrica de mínima intensidad. En ella están representadas topográficamente (somatotopía) las distintas partes del cuerpo (homúnculo motor de Penfield), ocupando una mayor superficie las zonas que intervienen en movimientos que requieren precisión, como la mano, la cara, o los órganos de la fonación, y con mayor versatilidad de movimientos.

b) **Corteza motora secundaria** situada por delante de la anterior. Está formada por la **corteza premotora** (área premotora lateral), y la **corteza motora suplementaria** (área premotora ventral). La corteza premotora. Tiene una representación somatotópica similar a la del área motora primaria. Se activa desde que se prepara un movimiento como respuesta a estímulos visuales, auditivos o táctiles, ya que asociaría un fenómeno sensitivo con un movimiento determinado (aprendizaje asociativo). Participa en movimientos más complejos que la corteza motora primaria, (frecuentemente bilaterales).

La corteza motora suplementaria. Está organizada topográficamente. Es un área de asociación motora, en la que se ubican la planificación de los movimientos, tanto en lo que se refiere al plan de ejecución como al plan de coordinación postural. Se activa cuando hay una intención de movimiento sin que exista un estímulo externo, así como cuando se memorizan secuencias de movimientos para la realización de un acto motor.

Vías eferentes de la corteza

La principal vía que sale de la corteza es la vía piramidal o vía corticoespinal. Gran parte de las fibras del haz piramidal se cruzan en la llamada decusación de las pirámides, situada en la parte inferior de bulbo raquídeo, formando el haz corticoespinal lateral, que se ocupa de los movimientos finos y precisos de la parte distal de las extremidades. Una proporción pequeña de fibras no cruza al otro lado y baja homolateralmente formando el haz corticoespinal ventral, aunque la mayoría de sus fibras terminan por cruzar la médula en diferentes niveles. La mayoría de las veces la vía piramidal ejerce su control sobre las motoneuronas por medio de interneuronas espinales. Otras veces sinaptan con interneuronas que reciben informaciones sensoriales periféricas, y que forman parte de un arco reflejo.

Ganglios basales

Los ganglios basales, son un grupo de núcleos situados en el espesor del cerebro cubiertos por la corteza cerebral:

a) Cuerpo estriado, en el telencéfalo, lo forman los núcleos caudado y putamen. b) Globo pálido, en el telencéfalo, en él se distinguen el segmento externo y el segmento interno.

c) Núcleo subtalámico, en el diencefalo.

d) Sustancia negra, en el mesencéfalo. Se diferencian dos partes, una dorsal o compacta, y, una ventral o reticular. Los ganglios de la base participan en el control de la actividad motora mediante efectos moduladores. No participan directamente en la ejecución de los movimientos, sino en el control de los mismos. Juegan un papel clave en la conversión de los programas motores de preparación del movimiento en programas de ejecución del mismo. El cuerpo estriado es la principal estructura de entrada de información a los ganglios de la base. Las aferencias proceden de la corteza, del tálamo y del troncoencéfalo. Los núcleos de salida los constituyen el segmento interno del globo pálido y la parte reticular de la sustancia negra, y envían sus proyecciones principalmente a la corteza, vía tálamo; y al troncoencéfalo.

Cerebelo

Interviene en el movimiento, regulando el equilibrio, la adecuación de la postura y el desarrollo del movimiento. Anatómicamente presenta dos hemisferios laterales y una zona central denominada vermis. La porción más externa es la corteza cerebelosa, y está dividida en lóbulos. En la corteza y en los núcleos existe una organización somatotópica. La corteza está formada por tres capas, que de más profunda a más superficial son:

a) capa granular donde hay células granulares de pequeño tamaño, cuyos axones ascienden hasta la capa superficial dividiéndose en ramas paralelas (fibras paralelas), e interneuronas (células de Golgi).

b) capa de células de Purkinje, que son neuronas de gran tamaño y cuyos axones constituyen la única vía eferente de la corteza hacia los núcleos intracerebelosos de la profundidad.

c) capa molecular, formada principalmente por las fibras paralelas y por interneuronas denominadas: células estrelladas y en cesto.

Bajo la corteza se encuentra la sustancia blanca, y en su interior una serie de núcleos denominados los núcleos profundos del cerebelo: a) el núcleo dentado que recibe conexiones de la corteza cerebelosa homolateral.; b) el núcleo fastigial que recibe aferencias del vermis y c) el núcleo interpuesto, formado por los núcleos emboliforme y globoso.

Funciones del cerebelo

El cerebelo se divide en tres zonas funcionales:

- a) **Vestibulocerebelo** (arquicerebelo): Recibe información relacionada con la orientación de la cabeza y el equilibrio. Ayuda a los núcleos vestibulares a mantener el equilibrio.
- b) **Espinocerebelo** (paleocerebelo): Recibe información propioceptiva de la médula y de los patrones motores generados en ella. Asimismo, desde los centros superiores entran órdenes motoras idénticas a las que se dirigen a la médula. Influye en el tono muscular de los músculos flexores y extensores y en la coordinación entre la musculatura agonista y antagonista. Compara las órdenes motoras y los movimientos que se realizan al cumplimentarlas, corrigiendo los desajustes.
- c) **Cerebrocerebelo** (neocerebelo): Recibe haces que proceden de la corteza cerebral. Conducen información de las áreas motoras, áreas sensitivas y áreas asociativas corticales. Modula la actividad de la corteza motora tanto en la planificación como en la iniciación y ejecución de los movimientos. Ayuda a que la secuencia de los actos motores sea armoniosa y no entrecortada, mediante una correcta programación de los movimientos. En general, se puede decir que el cerebelo coordina los movimientos, ya que regula la velocidad, dirección, fuerza y amplitud de los mismos.