Neurofisiología – cátedra 1

Prof. Reg. Adj. a cargo: Nancy China

El sistema somatomotor

2024

Índice

Preguntas para guiar la lectura..... página 3
Generalidades..... página 4
Tres tipos de movimiento..... página 6
Organización jerárquica del sistema motor..... página 7
Organización en paralelo del sistema motor..... página 8

Preguntas para guiar la lectura

A continuación, se plantea una serie de preguntas para dirigir la lectura del presente material; leélas atentamente. Es posible que no tengas los conocimientos suficientes para responder algunas (o muchas de ellas). Sin embargo, podés reflexionar sobre qué se está preguntando y anotar las ideas que te van surgiendo, aunque no constituyan una respuesta formal.

Activar los conocimientos previos, aunque sean insuficientes, es una parte muy importante para aprender nuevos conceptos. ¿Por qué? Porque aprender conceptos implica asociar nuevas ideas a las ideas preexistentes, estructurarlas y darles una nueva organización.

1. ¿Qué tipos de movimiento genera el sistema motor?
2. ¿Cuáles son las características de los movimientos voluntarios?
3. ¿Qué tipos de información sensorial nos permiten ejecutar movimientos adaptativos?
4. ¿Qué estructuras neurales integran la información sensorial al sistema motor?
5. ¿Cuáles son los distintos tipos de alteraciones motoras?

Laura Margulis

El sistema somatomotor

Generalidades

El sistema somatomotor produce movimientos traduciendo señales nerviosas en fuerza contráctil en los músculos. Este sistema está constituido por todas las neuronas y vías de conexión que participan en la ejecución de los movimientos.

Las representaciones internas del cuerpo y del mundo externo generadas por los sistemas sensoriales guían los movimientos producidos por el sistema somatomotor. Cualquier actividad, incluso la más sencilla, requiere de información visual y propioceptiva para que pueda ser llevada a cabo. Por lo tanto, resulta beneficioso para el individuo que las partes del cerebro que controlan el movimiento tengan acceso al flujo de información sensorial que existe en el cerebro.

La agilidad y la destreza motoras de los seres humanos reflejan las capacidades del sistema somatomotor para planificar, coordinar y ejecutar movimientos. Las piruetas de una bailarina, los movimientos precisos de un tenista, o la coordinación de los movimientos oculares de un lector, son ejemplos de movimientos aparentemente complejos, que requieren de una gran habilidad motora inalcanzable para un robot. Sin embargo, una vez entrenados, estos movimientos llegan a ser ejecutados por el sistema motor con gran facilidad, y en parte de forma automática.

La capacidad para realizar movimientos precisos al mismo tiempo que se realiza otra tarea cognitiva (por ejemplo, pensar mientras se utiliza una herramienta) requiere de una flexibilidad y habilidades que no posee ningún otro animal. El sistema motor humano tiene una característica llamativa, que es la falta de esfuerzo con la que las tareas motoras más complicadas son realizadas sin pensar en el movimiento articular o la contracción muscular necesaria. A pesar de la conciencia acerca de la intención de realizar un movimiento, de la planificación de ciertas secuencias de acciones, y de la decisión acerca del momento en que el movimiento se realizará, los detalles del movimiento parecen producirse de forma automática.

La gracia y la falta de esfuerzo del movimiento normal realizado de forma automática dependen de un flujo continuo de información visual, somatosensitiva y postural hacia los componentes motores. La “ausencia de esfuerzo” del control motor normal se pierde con frecuencia si se priva a los sistemas motores del flujo continuo de información sensorial aportada por la visión, la sensación somática y las aferencias vestibulares[1]. La visión tiene

[1] El sistema vestibular es el sistema sensorial que detecta los movimientos de la cabeza y contribuye al mantenimiento del equilibrio.

una importancia especial para guiar el movimiento y proporciona una información cognitiva crucial sobre la localización y la forma de los objetos. Las personas ciegas necesitan explorar el espacio usando claves táctiles y cinestésicas (o propioceptivas) en un proceso más largo, y necesitan apoyarse más en representaciones memorizadas de la localización de los objetos que las personas videntes. De la misma forma, los movimientos se vuelven imprecisos y la postura se hace inestable cuando se pierde la sensación somática de las extremidades y de los cambios de postura. La pérdida de la entrada de información vestibular también altera la capacidad de mantener el equilibrio y la orientación.

El sistema somatomotor puede realizar muchas tareas motoras diferentes con velocidad y precisión debido a dos características de su organización funcional. Primero, el procesamiento de las aferencias sensoriales y de las órdenes a las neuronas motoras y músculos está distribuido en áreas interconectadas jerárquicamente de la médula espinal, del tronco encefálico y del prosencéfalo. Cada nivel posee circuitos que pueden, por sus conexiones de entrada y salida, organizar y regular respuestas motoras complejas. Segundo, la información sensorial relacionada con el movimiento es procesada en diferentes sistemas que operan en paralelo. Estas vías, en serie (jerárquicas) y en paralelo, no solamente tienen a su cargo la regulación de los movimientos en sí mismos, sino también la regulación de las acciones en un sentido amplio (figura 1).

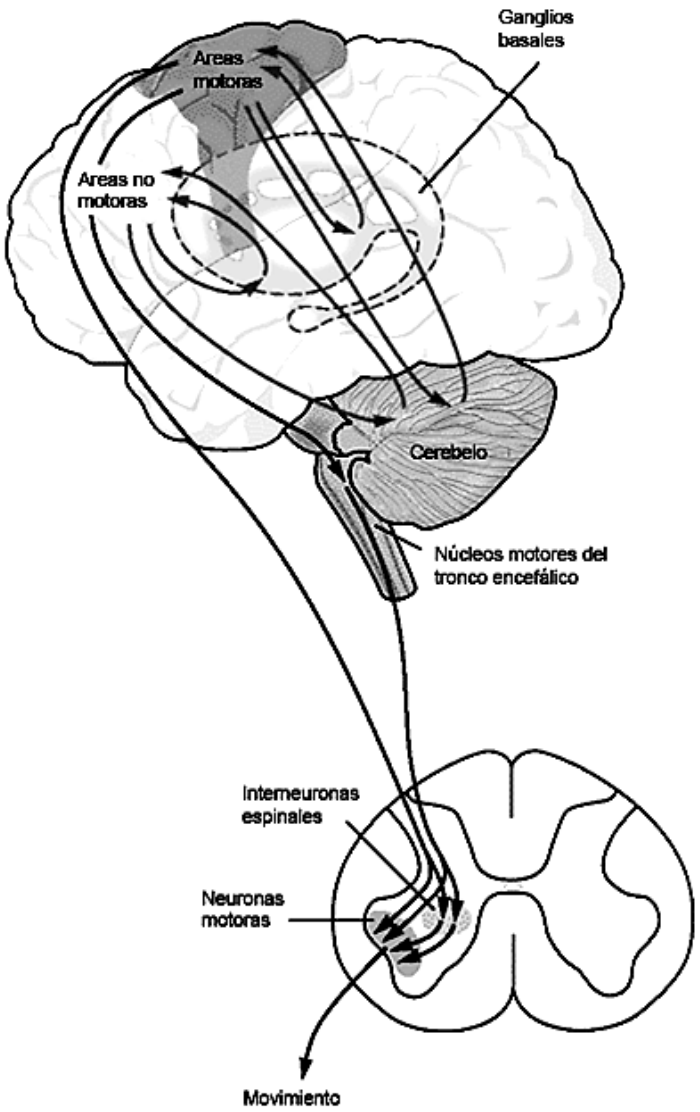


Figura 1. Organización anatómica del sistema somatomotor

Tres niveles jerárquicos de control de los sistemas motores: la médula espinal, el tronco encefálico y el prosencéfalo. Se organizan tanto en serie como en paralelo. Las áreas motoras de la corteza cerebral pueden influir en la médula espinal tanto directamente como a través de los sistemas descendentes del tronco encefálico. Los tres niveles de los sistemas motores reciben aferencias sensoriales y también están sometidos a la influencia de dos sistemas subcorticales independientes y paralelos: los ganglios basales y el cerebelo.

Tres tipos de movimientos

Existen tres categorías diferenciadas de movimientos: reflejos, rítmicos y voluntarios. A continuación, se describen las características de cada uno de ellos en detalle.

Los ***movimientos reflejos*** son patrones coordinados e involuntarios de contracción y relajación muscular desencadenados por estímulos periféricos específicos. El *reflejo miótatico* es probablemente el reflejo medular más importante y, con seguridad, el más estudiado. Se trata de una contracción muscular que se produce cuando un músculo se estira. Por ejemplo, en el reflejo rotuliano, el estiramiento del tendón del músculo cuádriceps provocado por un golpe por debajo de la rótula provoca la contracción del músculo, que se traduce en una "patada". Otro ejemplo es el *reflejo de retracción de la branquia* en el molusco marino Aplysia, que se produce en respuesta a una estimulación de la piel del sifón del animal.

Los ***movimientos rítmicos*** repetitivos son producidos por patrones estereotipados de contracción muscular e incluyen los movimientos realizados al masticar, tragar y rascarse, así como las contracciones alternantes de los músculos flexores y extensores de cada lado del cuerpo durante la locomoción cuadrúpeda. Los circuitos de estos patrones motores rítmicos repetitivos radican en la médula espinal y el tronco encefálico. Aunque estos patrones pueden darse espontáneamente, es más frecuente que se desencadenen por estímulos periféricos que activan los circuitos subyacentes.

Los ***movimientos voluntarios*** difieren de los reflejos en varios aspectos importantes. En primer lugar, los movimientos voluntarios se organizan alrededor de la realización de una acción que tiene un objetivo concreto. Por lo tanto, la selección de las articulaciones y los segmentos corporales que se van a utilizar para un movimiento dado depende del objetivo de ese movimiento, por ejemplo, alcanzar un vaso de agua para levantarlo o devolver un saque en un partido de tenis. Al contrario de la relación estereotipada entre la respuesta y el estímulo, característica de los movimientos reflejos, los movimientos voluntarios constituyen una respuesta variable frente al mismo estímulo, según la tarea que se va a llevar a cabo. En segundo lugar, la eficacia de los movimientos voluntarios mejora con la experiencia y el aprendizaje. Finalmente, a diferencia de los reflejos, los movimientos voluntarios no son simples respuestas a estímulos del ambiente, sino que pueden ser generados internamente. Los niveles superiores de nuestros sistemas motores pueden, por lo tanto, disociar dos aspectos de un estímulo: qué movimiento realizar como respuesta y la decisión de realizarlo o no. En los reflejos, estos aspectos del estímulo están estrechamente relacionados.

La selección de la acción apropiada puede ser el resultado de una reflexión interna, que implica la evocación de imágenes mentales o representaciones, por ejemplo, imágenes

asociadas al estado deseado u objetivo. Sin embargo, con mayor frecuencia las acciones representan respuestas a señales visuales o auditivas. Estas señales pueden significar que una acción particular es requerida de manera inmediata (por ejemplo, una luz roja que indica que hay que detenerse) o que es inminente algún tipo de situación en la que es necesaria una acción concreta (por ejemplo, una luz amarilla que indica un cambio inminente a luz roja). La capacidad para aprender nuevas respuestas de adaptación frente a estímulos ambientales concretos es crucial para el movimiento eficaz y preciso.

Organización jerárquica del sistema somatomotor

La ***médula espinal*** es el nivel inferior de esta organización. En las astas anteriores de la médula se encuentran los cuerpos de las neuronas que inervan a las fibras musculares en un tipo específico de sinapsis llamado "unión neuromuscular". Estas neuronas motoras participan en circuitos neurales que median diversos reflejos y automatismos rítmicos, como la locomoción y el rascado. El circuito nervioso más simple es monosináptico, comprende sólo la neurona sensitiva de primer orden y la neurona motora. Sin embargo, la mayoría de los reflejos están mediados por circuitos polisinápticos, en los que una o más interneuronas están interpuestas entre la neurona sensitiva de primer orden y la neurona motora.

Las neuronas motoras e interneuronas reciben también la influencia de axones que descienden de los centros superiores. Estas señales supramedulares pueden modificar las respuestas reflejas a los estímulos periféricos, excitando o inhibiendo diferentes poblaciones de interneuronas. También coordinan acciones motoras a través de esas interneuronas.

El siguiente nivel de la jerarquía motora está en el ***tronco encefálico***. Este nivel contiene núcleos que participan en vías descendentes dirigidas a las neuronas motoras de la médula espinal. Existen vías descendentes que controlan la postura a través de los músculos del tronco y vías descendentes que controlan los movimientos de los miembros dirigidos a los objetos. Otros núcleos de este nivel son el origen de los nervios que controlan los movimientos de los ojos, la cara y la cabeza.

Las ***cortezas motoras*** son el nivel más alto del control motor. La corteza motora primaria y varias áreas premotoras se proyectan directamente hacia la médula espinal a través del fascículo o haz córticoespinal[2], y también regulan los haces motores que se

[2] Los axones de las neuronas corticales que se proyectan hacia la médula espinal discurren reunidos en el haz córticoespinal, un haz masivo de fibras que contiene aproximadamente 1 millón de axones. Alrededor de un tercio de los axones se originan en la circunvolución precentral del lóbulo frontal, es decir la corteza motora primaria. Otro tercio procede del área 6 de Brodmann, la corteza premotora. El resto se origina en

originan en el tronco encefálico. La *corteza motora primaria* posee una organización topográfica que refleja la distribución de los grupos musculares en el cuerpo, es decir, una organización somatotópica. Las *áreas premotoras* son importantes para coordinar y planificar secuencias complejas de movimiento. Reciben información de las cortezas terciarias parietal posterior, en la que se elabora una representación multimodal del espacio, y prefrontal, asiento del control ejecutivo. Las áreas premotoras se proyectan a la corteza motora primaria, así como a la médula espinal.

Organización en paralelo del sistema somatomotor

Varias vías anatómicamente diferenciadas se proyectan en paralelo hacia la médula espinal procedentes de centros motores superiores. Por encima de la médula espinal está el tronco encefálico, y por encima de éste, el cerebelo y los ganglios basales, estructuras que regulan las acciones de los sistemas del tronco encefálico. Supervisando estas estructuras supramedulares están los centros motores de la corteza cerebral. Como ya se mencionó, al igual que en el caso de los sistemas sensitivos, la mayoría de las áreas motoras del tronco encefálico y la corteza cerebral están organizadas somatotópicamente: los movimientos de partes vecinas del cuerpo son controlados por áreas contiguas del cerebro en cada uno de los niveles de la jerarquía motora.

La planificación y ejecución del movimiento no sólo son reguladas por los tres niveles jerárquicos, es decir, la médula espinal, el tronco encefálico y las cortezas motoras. Otras dos partes del encéfalo, el cerebelo y los ganglios basales, juegan también un rol importante en esta regulación. Ambas estructuras proporcionan circuitos de retroacción que regulan a las áreas motoras corticales y del tronco encefálico: reciben aferencias de diferentes áreas de la corteza y se proyectan a áreas motoras de la corteza a través del tálamo. Los circuitos en bucle de estas dos estructuras fluyen a través de áreas separadas del tálamo y a diferentes áreas corticales. De forma similar, también las aferencias que reciben de la corteza son independientes.

El ***cerebelo*** no constituye más que el 10% del volumen total del encéfalo, pero contiene más de la mitad de la cantidad total de sus neuronas (figura 2). Estas neuronas están dispuestas de una manera sumamente regular, en forma de unidades repetidas, cada una de las cuales forma un módulo de circuito básico. Pese a su regularidad estructural, el cerebelo está dividido en varias regiones bien distintas, cada una de las cuales recibe proyecciones de diferentes partes del cerebro y la médula espinal, y envía proyecciones a diferentes componentes del sistema motor. Estas características sugieren que las distintas

---

las áreas 3, 2 y 1 de la corteza somatosensitiva y regulan la transmisión de las aferencias a través del asta posterior de la médula espinal.

regiones del cerebelo realizan operaciones informáticas similares, pero sobre aferencias diferentes.

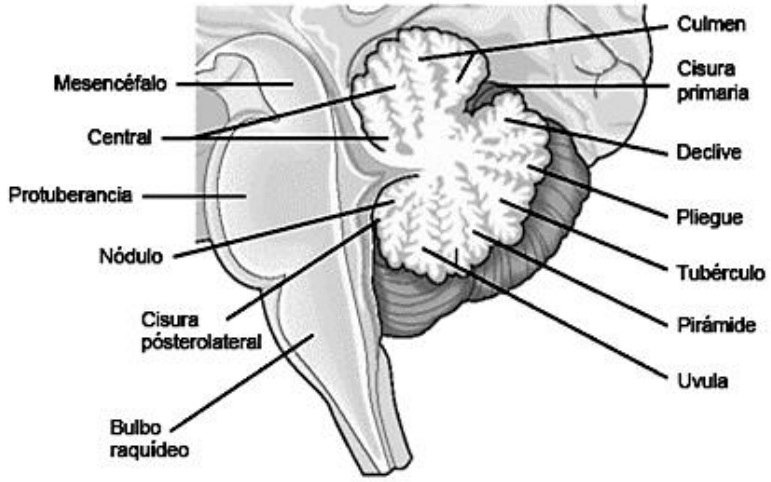


Figura 2. Corte sagital medio a través del tronco encefálico y el cerebelo

El cerebelo influye en el sistema somatomotor evaluando las disparidades existentes entre intención y acción, y ajustando las operaciones de los centros motores de la corteza cerebral y el tronco encefálico durante el desarrollo de un movimiento, así como durante las repeticiones de dicho movimiento. Tres aspectos de la organización del cerebelo destacan esta función. En primer lugar, el cerebelo recibe una extensa información sobre fines, órdenes y señales de retroalimentación asociados con la programación y la ejecución del movimiento. La importancia de estas aferencias es evidente por el hecho de que el número de axones que penetran en el cerebelo supera en más de 40 veces a los que salen de él. En segundo lugar, las proyecciones eferentes del cerebelo están enfocadas principalmente hacia los sistemas premotores y motores de la corteza y el tronco encefálico, sistemas que controlan directamente a las interneuronas y neuronas motoras medulares. En tercer lugar, la transmisión sináptica del circuito es modificable, aspecto crucial para la adaptación y el aprendizaje motores.

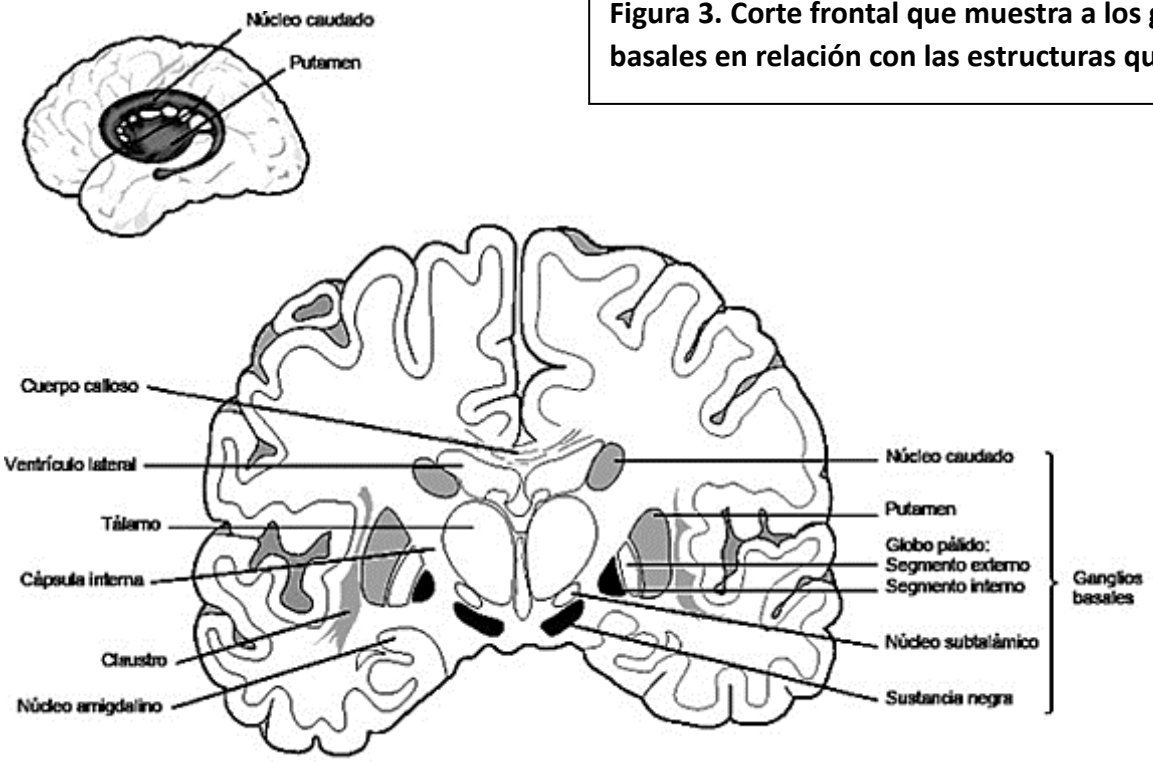
La extirpación del cerebelo no altera los umbrales sensitivos ni la intensidad de la contracción muscular. Por lo tanto, el cerebelo no es necesario para los elementos básicos de la percepción o el movimiento. Ahora bien, la lesión de este órgano destruye la precisión espacial y la coordinación temporal del movimiento. También altera el equilibrio y reduce el tono muscular. Así mismo, trastorna notablemente el aprendizaje motor y determinadas funciones cognitivas.

Los ***ganglios basales*** son cuatro núcleos, de los cuales algunas partes desempeñan una función importante en el movimiento voluntario normal. Sin embargo, al contrario de la mayoría de los demás componentes del sistema motor, no tienen conexiones directas de entrada o salida con la médula espinal. Estos núcleos reciben su información principal de la corteza cerebral y envían sus señales al tronco encefálico y, a través del tálamo, de nuevo

a la corteza prefrontal, premotora y motora. Las funciones motoras de los ganglios basales por lo tanto están mediadas, en gran parte, por áreas motoras de la corteza frontal.

Los cuatro núcleos principales de los ganglios basales son el *cuerpo estriado*, el *globo pálido*, la *sustancia negra* y el *núcleo subtalámico*. El cuerpo estriado tiene tres importantes subdivisiones: el núcleo caudado, el putamen y el estriado ventral (que incluye al núcleo accumbens) (figura 3).

Figura 3. Corte frontal que muestra a los ganglios basales en relación con las estructuras que los rodean



Los ganglios basales forman bucles o circuitos que contribuyen a la iniciación y la finalización del movimiento, así como al pasaje entre un movimiento y otro. La alteración de estos circuitos provoca temblor y movimientos involuntarios, cambios en la postura y el tono muscular, escasez y lentitud de movimientos, sin parálisis, así como trastornos neuropsiquiátricos y cognitivos, tal como se observa en las enfermedades de Parkinson y de Huntington.