

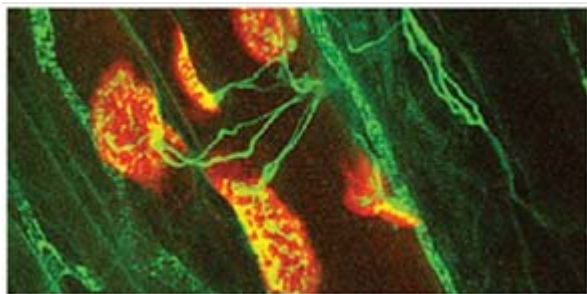
Movimiento

Imaginaros cómo coger un balón. ¿Parece fácil verdad? Así lo parece, pero para realizar incluso un movimiento tan sencillo vuestro cerebro tiene que realizar cosas remarquables. Normalmente damos todo por hecho, aunque hay muchas cosas que se deben tener en cuenta como: ¿El balón es ligero o pesado? ¿De qué dirección procede y a que velocidad viene? Para todo ello se precisa la coordinación. ¿Cómo somos capaces de coordinar nuestras extremidades para recoger el balón y de qué forma sería mejor? Y luego está la ejecución del proceso: ¿Se dirigen vuestros brazos al sitio correcto y vuestros dedos se cierran para cogerlo en el momento apropiado?

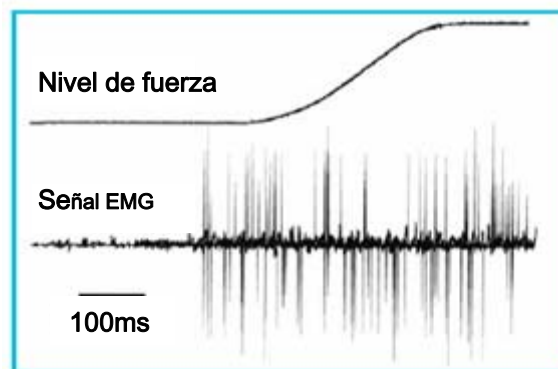
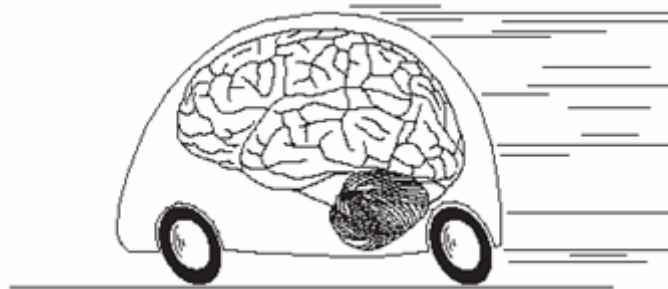
En la actualidad, los neurocientíficos saben que existen muchas áreas del cerebro implicadas. La actividad neuronal de estas diferentes áreas se combina para dar origen a una cadena de mando (una jerarquía motora). Desde la corteza cerebral y los ganglios basales hasta el cerebelo y la médula espinal.

La unión neuromuscular

En la base de la jerarquía motora, en la médula espinal, cientos de neuronas especializadas llamadas motoneuronas aumentan su actividad así como su frecuencia de disparo. Los axones de estas neuronas proyectan hacia los músculos en dónde activan las fibras contráctiles de los músculos. Las ramas terminales de los axones de cada una de las motoneuronas forman unas **uniones neuromusculares** especializadas sobre un número limitado de fibras en un músculo (ver la figura abajo). Cada potencial de acción originado en la motoneurona produce la liberación del neurotransmisor en el terminal nervioso y origina el correspondiente potencial de acción en las fibras musculares. Cuando esto ocurre se produce, en las fibras musculares, una liberación de iones de Ca^{2+} de las estructuras intracelulares de almacenamiento. Y esto origina la contracción de las fibras musculares produciendo fuerza y movimiento.



Para hacer que los músculos se contraigan, los nervios forman unos contactos especializados e individuales con las fibras musculares en las uniones neuromusculares. Según se van desarrollando, múltiples fibras nerviosas se dirigen a cada fibra muscular, sin embargo y debido a un proceso de competición entre las neuronas, al final sólo queda una de ellas. Cuando sólo resta un nervio, entonces se produce la liberación del neurotransmisor acetilcolina que actúa sobre detectores moleculares especializados situados en la placa motora (teñido en rojo). Esta imagen se ha tomado utilizando microscopía confocal.



Registros de la actividad eléctrica asociada con los músculos (actividad electromiográfica).

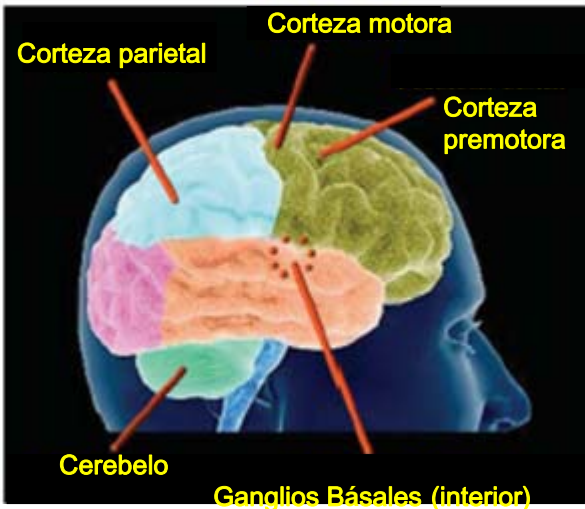
Los procesos eléctricos que ocurren en el brazo pueden ser registrados por medio de un amplificador, incluso a través de la piel, y estos registros electromiográficos (**EMGs**) pueden ser utilizados para determinar la actividad de cada uno de los músculos (ver figura arriba).

La médula espinal juega un papel muy importante en el control de los músculos por medio de diferentes vías de reflejos. Entre ellos están los arcos reflejos (reflejos de retirada) que os protegen de objetos punzantes, afilados o calientes, y los reflejos de estiramiento que juegan un papel importante en la postura. El famoso reflejo de estiramiento de la rodilla es un ejemplo de estos reflejos de estiramiento, y es bastante especial ya que sólo implica a dos tipos de células nerviosas (las neuronas sensoriales que informan de la extensión del músculo, conectadas por medio de sinapsis a las neuronas motoras que son las que inducen el movimiento). Estos reflejos se combinan con otros más complejos, dentro de los circuitos espinales originando comportamientos más o menos complejos, tales como el movimiento rítmico de las extremidades cuando andamos o corremos.

Las neuronas motoras son la vía común final a los músculos que mueven vuestros huesos. El cerebro se encuentra ante una situación compleja cuando tiene que controlar la actividad de estas células. ¿Qué músculos tiene que mover para conseguir una situación determinada, cuánto y en qué orden?

La cima de jerarquía-la corteza motora

En el extremo opuesto de la jerarquía motora, en la corteza motora, se realizan un desorbitante número de cálculos por varias decenas de miles de neuronas para cada parte del movimiento. Todos estos cálculos hacen que el movimiento se realiza de una forma sencilla y perfecta. Entre la corteza cerebral



Las diferentes regiones implicadas en control del movimiento

Parece ser que hay un mapa que incluye donde se encuentran nuestras extremidades así como donde se encuentran los objetivos que nos interesan con respecto a nosotros. Del daño producido en estas áreas, por ejemplo después de un infarto cerebral, se pueden inducir dificultades para alcanzar objetos o incluso negligencia u omisión de partes del mundo que se encuentra a nuestro alrededor. Los pacientes con la llamada negligencia parietal son incapaces de detectar objetos (normalmente en su lado izquierdo) e incluso algunos individuos ignoran la parte izquierda de su cuerpo.



Un experimento sobre el movimiento

¿Quién me mueve? Intenta realizar este experimento con un amigo. Coge un libro relativamente pesado y situado en la palma de tu mano derecha. Ahora levanta el libro de tu mano derecha con tu mano izquierda. Tu tarea consiste en mantener tu mano derecha sin moverla. Esto debería ser bastante fácil. Ahora inténtalo de nuevo, manteniendo tu mano totalmente inmóvil mientras tu amigo levanta el libro de tu mano. Muy poca gente puede hacerlo. No te preocupes; se precisan muchos intentos para poder obtener el mismo resultado que cuando lo haces tú mismo.

Este experimento ilustra el hecho que la corteza somatosensorial de tu cerebro tiene más conocimiento e información de lo que haces tú mismo que la que recibe cuando ve a otros actuar por iniciar tus acciones.

y las motoneuronas de la médula espinal, existen diversas áreas críticas del tronco cerebral combinan la información ascendente de las extremidades y los músculos provenientes de la médula espinal con la información descendente proveniente de la corteza motora.

La **corteza motora** es una fina banda de tejido que se extiende a través de la superficie cerebral, directamente por delante de la corteza somatosensorial (ver p. 12). Aquí existe un mapa complejo del cuerpo: las células nerviosas que causan el movimiento (por medio de conexiones con las motoneuronas de la médula espinal) se encuentran organizadas topográficamente. Por medio de la utilización de electrodos de registro, es posible detectar que las neuronas de cualquier parte de este mapa se activan aproximadamente 100 milisegundos antes de que la actividad sea detectada en el músculo. El saber qué es lo que se codificaba en la corteza motora ha sido causa de un gran y largo debate (las células en la corteza codifican las acciones que la persona quiere realizar o individualmente para los músculos que se necesitan contraer para realizar dichas acciones). La respuesta a esta pregunta es en cierto modo diferente. Las neuronas de forma individual no codifican para ninguna de las dos, sino que se utiliza un **código de poblaciones**, cuyas acciones son especificadas por la actividad y disparos de un conjunto de neuronas.

Justo por delante de la corteza motora la importante corteza promotora, que está implicada en la planificación de acciones, preparar los circuitos espinales para el movimiento y en procesos que establecen la relación entre ver movimientos y comprender gestos. Recientemente, se ha descubierto en monos, sorprendentemente, la existencia de **las neuronas espejo**, que responden cuando el mono ve el movimiento de una mano así como cuando el mismo realiza un movimiento similar. Las neuronas espejos serían, por tanto, importantes para la imitación de movimientos como para la comprensión de las acciones. Detrás de la corteza motora, en la corteza parietal, diferentes áreas corticales están implicadas en la representación espacial del cuerpo y de las percepciones visuales y auditivas que nos rodean.



Los ganglios básicos

Los ganglios básicos son un conjunto de áreas directamente interconectadas y situadas por debajo de la corteza cerebral en las profundidades de los hemisferios cerebrales. Son cruciales para la iniciación de los movimientos,

“...las neuronas espejo harán por la psicología lo que el ADN hizo por la biología: Proveerán un marco unificador y nos ayudarán a explicar un gran número de habilidades mentales que hasta ahora han sido misteriosas e inaccesibles a la experimentación. Son el gran paso en la evolución del cerebro de los primates”. V.S. Ramachandran.

aunque la manera en la que lo hacen no está clara todavía. Los ganglios basales funcionan más o menos como un filtro, seleccionando la información de entre todos los impulsos que reciben de la parte anterior media de la corteza (las regiones sensorial, motora, prefrontal y límbica). Los impulsos de salida de los ganglios basales a su vez alimentan de vuelta (feed-back) a las diferentes áreas de la corteza motora.

Una enfermedad motora relativamente común en humanos es la **enfermedad de Parkinson**, y se caracteriza por la presencia de temblores y dificultad a la hora de iniciar los movimientos. Es como si el filtro selectivo que existe en los ganglios basales se bloqueara. El problema que ocurre es la degeneración de las neuronas situadas en un área del cerebro que se llama sustancia negra (se llama así porque tiene una apariencia negra), cuyos largos axones proyectan y liberan el neurotransmisor dopamina en los ganglios basales (ver la ventana de investigación fronteriza abajo). La organización de los axones con **dopamina** en sus neuronas dianas en los ganglios basales es muy complicada e intrincada, lo que sugiere una importante interacción entre los diferentes neurotransmisores. El tratamiento con la droga L-Dopa, que una vez en el cerebro se transforma en dopamina, recupera los niveles normales de dopamina y permite recuperar el movimiento (ver Capítulo 16). Se cree que los ganglios basales son también importantes para el aprendizaje, permitiendo la selección de acciones que conducen a la recompensa.

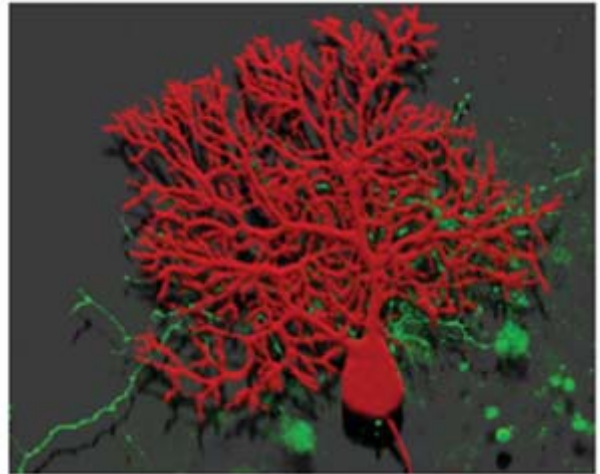
El cerebelo

El **cerebelo** es fundamental para los movimientos precisos y coordinados. Es una maravillosa máquina neuronal cuya compleja arquitectura celular está organizada en gran detalle. Al igual que los ganglios basales, está conectado extensivamente con las áreas implicadas en el control motor, así como con estructuras del tronco cerebral. El daño en el cerebelo induce movimientos pobremente coordinados, pérdidas de equilibrio, ralentización del habla y ciertas dificultades cognitivas. ¿Os suena familiar? El alcohol tiene un efecto muy poderoso sobre el cerebelo. El cerebelo es también fundamental para el aprendizaje y la adaptación motora. Casi la totalidad de las acciones voluntarias dependen del control preciso de los circuitos motores, y el cerebelo es fundamental para un ajuste óptimo, por ejemplo, la sincronización.



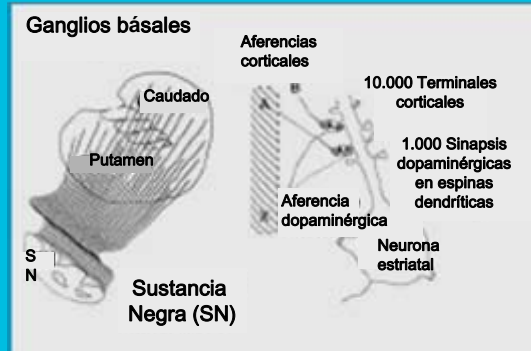
Tiene una organización cortical muy regular y parece haber evolucionado de manera que combina conjuntamente una gran cantidad de información proveniente de los sistemas sensoriales, áreas corticales motoras, médula espinal y tronco cerebral. La adquisición de movimientos precisos depende de un proceso de aprendizaje celular llamado depresión a largo termino (DLT), el cual reduce la fuerza de algunas de las conexiones sinápticas (ver el capítulo sobre Plasticidad). Existen numerosas teorías sobre la función del cerebelo; muchas implican la idea de que genera un "modelo" de cómo funciona el sistema motor (un tipo de simulador de realidad virtual de vuestro propio cuerpo pero dentro de vuestra cabeza). Construye este modelo usando la plasticidad sináptica incluida dentro de esta red tan compleja. Así que ahora volved a lanzar el bacón de nuevo y daros cuenta que casi todos los niveles de la jerarquía motora se encuentran implicados, desde la planificación de la acción con respecto al objetivo visual

en movimiento, la programación de los movimientos de vuestras extremidades y el ajuste de los reflejos de la postura de vuestro brazo. En todas las etapas, vosotros necesitáis integrar toda la información sensorial en la corriente de señales que se dirigen a vuestros músculos.



Una célula de Purkinje del cerebelo mostrando la extensa arborización de su árbol dendrítico. Este árbol les sirve para recibir la miríada de impulsos que se requieren para la sincronización de los movimientos precisos que aprendemos.

Investigación Fronteriza



Una historia inesperada sobre la dopamina

La química que se encuentra en las acciones y en las costumbres implica al neurotransmisor dopamina, la cual se libera sobre las neuronas de los ganglios basales donde actúa sobre receptores metabotrópicos (Capítulo 3). Ahí funciona de dos formas, como un incentivo para actuar y como una señal de recompensa para actuar apropiadamente. Un descubrimiento intrigante es que los niveles de dopamina son incluso más elevados cuando la recompensa es inesperada. Esto significa que las neuronas dopaminérgicas se activan y disparan mucho más en una etapa del aprendizaje en donde realmente ayuda la administración de un refuerzo al sistema motor por haber producido la respuesta adecuada. Los movimientos pueden entonces ser agrupados en una secuencia por medio de la liberación de sucesivas descargas de dopamina. Mas tarde, sobre todo si los movimientos complejos devienen habituales, el sistema funciona de manera libre sin necesidad de la recompensa de dopamina. En este preciso momento, si los movimientos tienen que se sincronizados de manera precisa, es entonces donde el cerebelo empieza a intervenir.

