



WINNY FISIOLOGÍA

UNIDAD TEMÁTICA 1: FISIOLOGÍA CELULAR Y NERVIOSA

Autores:

Sánchez Estrada Daniela
Hernández Ceballos Winston

Colaboradores:

Sierra Salazar Álvaro Abiel
Betanzos Fernández J. Gad
Rivera Montalvo Francisco
Almora Pineda Eunice
Orendain Maldonado Emiliano
Velázquez García Diego

Revisores:

Dra. Adriana Robles Cabrera



WINNY

ÍNDICE

ÍNDICE.....	2
1.1 Introducción a la fisiología humana.....	8
1.2 Compartimientos líquidos del organismo.....	9
1.2.1 Diferencias entre los solutos en el LEC y LIC:.....	10
1.2.2 Diferencias entre el líquido intersticial y plasmático.....	10
1.2.3 ¿Cómo medir o estimar el agua corporal total y sus diferentes compartimentos?.....	11
1.3 Homeostasis.....	12
1.3.1 Conceptos iniciales.....	12
1.3.2 Circuitos retroalimentación.....	13
Retroalimentación negativa.....	14
Retroalimentación positiva.....	14
1.4 Mecanismos de transporte a través de la membrana celular.....	14
1.4.1 Difusión.....	14
Difusión simple.....	15
1.4.2 Potencial de difusión.....	17
1.4.3 Potencial de equilibrio.....	17
1.4.4 Ósmosis.....	18
1.4.5 Proteínas de transporte.....	20
Transporte activo primario.....	20
Transporte activo secundario.....	21
1.4.6 Características estructurales de la membrana celular.....	22
1.5 Biofísica de la membrana.....	23
1.5.1 Potencial de membrana.....	23
1.5.2 Potenciales electrotónicos.....	24
1.5.3 Excitabilidad celular.....	25
1.5.4 Potencial de acción.....	25
1.5.5 Conducción del potencial de acción.....	27
1.6 Sinapsis.....	29
1.6.1 Anatomía de la sinapsis química.....	30
1.6.2 Pasos en la sinapsis química.....	31
1.6.3 Tipos de receptores en la membrana postsináptica.....	32
1.6.4 Potenciales postsinápticos excitatorios e inhibitorios.....	34

Efectos de la excitación sináptica.....	34
Efectos de la inhibición sináptica.....	35
1.7 Contracción del músculo esquelético.....	35
1.7.1 Anatomía del músculo esquelético.....	35
Tipos de fibras musculares.....	36
1.7.2 Funciones de los filamentos en la miofibrilla.....	37
1.7.3 Contracción muscular.....	38
Potencial de acción de membrana de motoneurona somática.....	38
Potencial de acción de fibra muscular.....	39
Contracción (Ciclo de puentes cruzados).....	40
Relajación.....	41
1.7.4 Sumación.....	42
Sumación de fibras múltiples.....	42
Sumación de frecuencia.....	42
1.7.5 Fatiga.....	43
1.7.6 Contracción isotónica, de alargamiento e isométrica.....	43
2.1. Principios generales del sistema nervioso.....	44
2.1.1.A Organización anatómica del sistema nervioso y diferencias entre el sistema nervioso central y periférico.....	44
2.1.1.B Meninges (tejido conjuntivo del sistema nervioso central).....	45
Duramadre.....	45
Aracnoides.....	45
Piamadre.....	46
2.1.2 Organización funcional del sistema nervioso.....	46
2.1.3 Tipos de células y su función en el sistema nervioso.....	48
Clasificación del tipo de neuronas.....	49
Componentes de la neurona.....	49
Clasificación de células de la neuroglía.....	50
2.1.4 Líquido cefalorraquídeo/cerebroespinal y barrera hematoencefálica.....	52
2.2 Principios generales de la fisiología sensorial.....	54
2.2.1 Campo sensorial o receptivo.....	54
2.2.2 Concepto del receptor sensorial.....	55
2.2.3 Clasificación de los receptores sensoriales.....	56
2.2.4 Especificidad de los receptores, estímulo adecuado.....	57
2.2.5 Mecanismos de transducción, potencial generador y potencial de receptor.....	57
2.2.6 Relaciones estímulo-respuesta.....	58
2.2.7 Ley de Weber-Fechner.....	59
Ley de Weber.....	59
Ley de Fechner.....	59

2.2.8 Suma espacial y suma temporal.....	60
Suma espacial.....	60
Suma temporal.....	60
2.2.9 Inhibición lateral.....	61
2.2.10 Circuitos canónicos (Convergentes/divergentes, paralelos/en serie, de inhibición lateral, de retroalimentación).....	61
Circuitos divergentes.....	61
Circuitos convergentes.....	62
Circuitos de retroalimentación/oscilantes/ reverberantes.....	62
Circuito en paralelo.....	62
2.3. Sistema Somatosensorial.....	63
El sistema somatosensorial se divide en tres:.....	63
2.3.1 Tacto fino.....	63
2.3.2 Discriminación de dos puntos.....	64
2.3.3 Vibración superficial y profunda.....	65
2.3.4 Sistema somatosensorial en el sistema nervioso central y en el sistema nervioso periférico.....	65
Dermatomas.....	65
Vía del Lemnisco Medial/ Vía de la columna dorsal.....	66
Corteza somatosensitiva secundaria (SII).....	68
Corteza de asociación somatosensitiva.....	68
2.3.5 Tacto burdo.....	69
2.3.6 Dolor visceral, parietal y referido.....	73
2.3.7 Mecanismos de analgesia.....	74
2.4. Sistema Visual.....	77
2.4.1 Conceptos de Óptica.....	77
Refracción de la luz.....	77
2.4.2 Fisiología de la retina, transducción, adaptación.....	80
2.4.3 Fotorreceptores: Conos y bastones.....	81
Composición de los fotorreceptores.....	81
Pigmentos visuales.....	82
Fotorreceptor en estado basal (oscuridad).....	82
Fotorreceptor ante estímulo luminoso.....	83
Reciclamiento de la rodopsina.....	84
Espectro visible de la luz.....	85
Curvas de absorbancia.....	85
Adaptación visual.....	85
2.4.4 Circuitos neuronales de la retina.....	86
Campo receptor de los fotorreceptores.....	86
2.4.5 Células ganglionares.....	87

Tipo de células ganglionares.....	88
2.4.6 Vía visual.....	88
Núcleo geniculado lateral.....	88
Corteza visual primaria (V1).....	89
Tipos celulares.....	90
Corteza visual de asociación.....	90
2.4.7 Otras vías visuales.....	91
Colículo superior (CS).....	91
Núcleo pretectal.....	91
Núcleo supraquiasmático.....	91
Lesiones de la vía visual.....	92
2.4.8 Movimientos oculares.....	93
Movimientos conjugados.....	93
Movimientos de vergencia.....	94
Movimientos reflejos.....	94
2.4.9 Reflejos.....	96
Reflejo fotomotor.....	96
Reflejo consensual.....	96
Reflejo corneal.....	97
Reflejo palpebral.....	97
2.5 Sistema auditivo y vestibular.....	98
2.5.1 Sistema Auditivo.....	98
El sonido.....	98
Frecuencia de onda.....	98
Amplitud de onda.....	99
Umbral auditivo y audiograma.....	99
Normalidad del audiograma.....	101
2.5.2 Transducción del sonido.....	102
Oído externo.....	102
Oído medio.....	102
Oído interno.....	103
Organización tonotópica del sistema auditivo.....	105
2.5.3 Vía auditiva.....	106
2.5.4 Sistema vestibular.....	107
Crestas ampollares de los conductos semicirculares (CSC).....	108
Cada par de canal semicircular se encarga de un plano de movimiento:.....	108
Ejemplo de operación de los conductos semicirculares horizontales.....	109
La mácula del utrículo y sáculo.....	109
2.5.5 Vías vestibulares.....	110

2.5.6 El cerebelo y el equilibrio.....	111
Respuesta a la aceleración de la cabeza mediante reflejos.....	111
Nistagmo vestibular.....	112
2.6. Sentidos químicos.....	112
2.6.1 Olfato.....	112
Epitelio olfatorio.....	112
Umbrales olfatorios.....	114
Diferenciación olfatoria.....	114
Adaptación al olor.....	115
Bulbo olfatorio.....	115
Vía olfatoria.....	116
2.6.2 Gusto.....	117
Botones y papilas gustativas.....	117
Sensaciones gustativas.....	118
Codificación del gusto.....	121
Vías gustativas.....	121
2.7. Control de la postura y el movimiento.....	122
2.7.1 Conceptos generales.....	122
2.7.2 Organización de la médula espinal.....	122
Sustancia gris.....	123
Asta posterior.....	123
Otras células.....	124
2.7.3 Husos musculares y órganos tendinosos de golgi.....	125
Huso muscular.....	125
2.7.4 Mecanismo de acción entre fibras sensitivas y motoneuronas.....	128
Parte sensitiva.....	128
Parte motora.....	128
Órgano tendinoso de Golgi.....	129
2.7.5 Reflejos.....	130
Reflejo miotático muscular/ estiramiento muscular.....	130
Reflejo tendinoso de Golgi.....	130
Reflejo flexor de retirada.....	131
Reflejo extensor cruzado.....	131
Inhibición e inervación recíprocas.....	131
Reflejo postural y locomotor.....	132
2.7.6 Corteza motora y movimiento voluntario.....	132
Corteza motora primaria/Área motora primaria.....	132
Corteza premotora / Área premotora.....	133
Área motora complementaria /Área motora suplementaria.....	134

Áreas especializadas.....	134
Corteza Parietal posterior.....	135
2.7.7 Patrones de movimiento complejos.....	135
Aferencias sensitivas hacia la corteza motora.....	135
Transmisión de la corteza a los músculos:.....	136
2.7.8 Fascículo corticoespinal / vía piramidal.....	137
2.7.9 Vías extrapiramidales.....	137
Fascículo rubroespinal.....	138
2.7.10 Regulación de movimientos por núcleos basales.....	138
Circuito del putamen.....	139
Circuito del caudado.....	139
Modificación de la secuencia y la intensidad del movimiento.....	140
2.7.11 Cerebelo.....	141
Anatomía del cerebelo.....	141
Funciones del cerebelo en el control motor.....	141
Aferencias del cerebelo.....	142
Célula de Purkinje en el cerebelo.....	143
Eferencias del cerebelo.....	144
2.7.12 Actividad funcional del cerebelo.....	145
División funcional del cerebelo.....	145
Coordinación de músculos.....	146
Aprendizaje del movimiento.....	146
2.8 Sistema nervioso autónomo.....	147
2.8.1 Sistema nervioso autónomo: Papel en el control de la homeostasis.....	147
2.8.2 Sistema simpático y parasimpático.....	149
Sistema Nervioso Autónomo Simpático (SNAs).....	149
Sistema nervioso autónomo parasimpático (SNAp).....	150
2.8.3 Sistema Nervioso Autónomo Entérico (SNAE).....	152
2.8.4 Organización funcional.....	152
Neurotransmisores:.....	153
Sistema colinérgico (acetilcolina).....	153
Sistema adrenérgico (noradrenalina, adrenalina).....	154
2.9 Sistema límbico.....	154
Función.....	155
Estructuras.....	155
2.9.1 Hipotálamo.....	155
Eferencias.....	156
Funciones vegetativas.....	156
Funciones conductuales.....	157

2.9.2 Mecanismos de recompensa y castigo en el sistema límbico.....	158
Centros de recompensa.....	158
Centros de castigo.....	158
2.9.3 Hipocampo.....	159
Hipocampo y aprendizaje.....	159
2.9.4 Amígdala.....	159
Aferencias.....	159
Eferencias.....	160
Efectos causados por su estimulación.....	160
2.9.5 Corteza límbica.....	160
2.10. Actividad eléctrica del cerebro, estados de sueño-vigilia y ritmos circadianos..	161
2.10.1 Sueño.....	161
Sueño REM (Sueño paradójico o desincronizado).....	161
Sueño NREM.....	162
Fases del sueño a lo largo del tiempo.....	162
2.10.2 Ondas cerebrales.....	163
2.11. Funciones integrativas: memoria y aprendizaje.....	165
2.11.1 Cuerpo calloso y comisura anterior.....	165
2.11.2 Pensamientos.....	165
2.11.3 Memoria.....	166
Clasificación de la memoria.....	166
2.11.4 Mecanismos de consolidación de memoria.....	167
Habitación.....	167
Facilitación.....	167
2.11.5 Hipocampo y memoria.....	168
2.11.6 Aprendizaje.....	169
Referencias bibliográficas:.....	169

1.1 Introducción a la fisiología humana

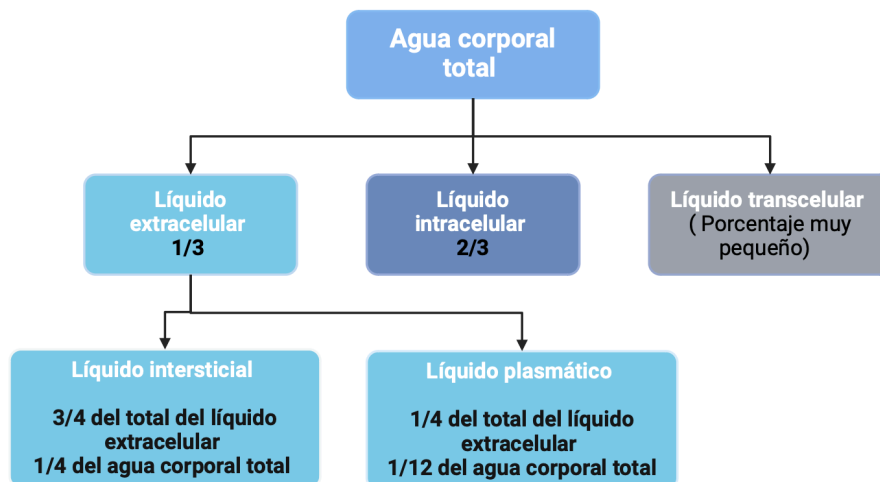
La **fisiología** es la ciencia que se encarga del estudio de las **funciones dinámicas existentes en los organismos**, esto puede ser desde el funcionamiento y los mecanismos de señalización celular hasta la interacción existente entre varios aparatos y sistemas al momento de desempeñar una actividad o función (por ejemplo, el cómo se da interacción entre sistema nervioso y cardiovascular para aumentar la frecuencia cardíaca cuando realizamos ejercicio). Así que, podemos decir que la fisiología se puede abarcar **desde una perspectiva del estudio molecular hasta el nivel de organismo interactuando con su ecosistema**.

El primer año de la carrera se centra sobre todo en el entendimiento y estudio de las ciencias morfológicas básicas (anatomía, histología, embriología, bioquímica y biología molecular); sin embargo, lo hacen en una perspectiva descriptiva. Es por ello que la fisiología toma como base el conocimiento generado de estas ciencias y se encarga de fusionarlas para **explicar los fenómenos que hacen que nuestro cuerpo “se comporte como lo hace”**.

1.2 Compartimientos líquidos del organismo

El **agua corporal total (ACT)** representa un **60%** del peso corporal de un adulto “prototipo”. Este valor no es absoluto y puede variar dependiendo del individuo del que hablemos: por ejemplo, los varones y bebés cuentan con una composición mayor de agua que las mujeres o adultos mayores.

Esta ACT se encuentra subdivida, a su vez, en **líquido extracelular** (LEC, también llamado “medio interno” – ya que este compartimiento es el que tiene los nutrientes y metabolitos necesarios para la supervivencia de las células–) y **líquido intracelular** (LIC). Mientras que el LIC representa $\frac{2}{3}$ del ACT el LEC representa $\frac{1}{3}$ de la misma. El plasma y el líquido intersticial representan cierto porcentaje del LEC.



1.2.1 Diferencias entre los solutos en el LEC y LIC:

LEC	LIC
Mayor concentración de sodio (Na^+) , cloro (Cl^-) , calcio (Ca^{2+}) y bicarbonato (HCO_3^-) .	Mayor concentración de potasio (K^+) , magnesio (Mg^{2+}) , fosfato (PO_4^{3-}) y proteínas .

Todas estas moléculas presentan cargas positivas y negativas que se encuentran en equilibrio y contrarrestándose unas con otras, por lo que todo el componente del LEC y LIC se encuentra **“eléctricamente neutro”**.

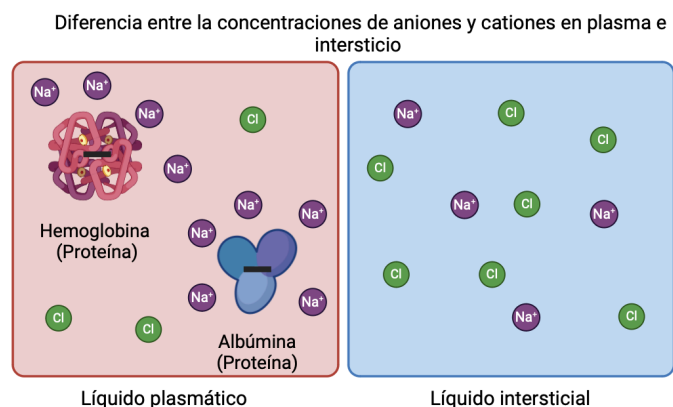
Es importante considerar esta **“regla de la neutralidad”** ya que, aunque en la membrana de las células existen proteínas que permiten transportar iones de afuera al interior de las células (como los canales de sodio, que permite al Na^+ al interior de las células) o de adentro hacia el exterior de las células (como los canales de potasio, que permite al K^+ salir de las células) solo existirá un **ligero cambio en el voltaje** en la membrana celular (es decir, la diferencia de “cargas eléctricas” entre ambos lados de la pared celular).

Más adelante se encontrarán frases como: “se abren canales de sodio dependientes de voltaje”, y no se debe pensar que entran cantidades incontables de sodio a la células haciendo que las cargas positivas de la misma aumenten y del líquido extracelular disminuyan, sino que entran pequeñas cantidades de sodio dentro de la célula que únicamente generan que exista un **cambio minúsculo** en la carga del líquido **cercano** a la membrana celular, que no modifica la carga eléctrica

de todo el líquido pero que **es suficiente para permitir que cada célula desempeñe sus funciones especiales.**

1.2.2 Diferencias entre el líquido intersticial y plasmático

Aunque ambos conforman el LEC, existe una **mayor concentración de cationes y menor de aniones en el plasma que en el líquido intersticial**; esto es debido a que las **proteínas plasmáticas** son **impermeables** para los vasos sanguíneos y éstas, al ser consideradas como moléculas con **carga negativa**, por consiguiente, condicionan que deba existir una mayor cantidad de sodio y menor cantidad de aniones (como el cloro) en el interior de las células para llegar a la “electroneutralidad”; a este efecto se le conoce como **equilibrio de Gibbs-Donnan**.



Equilibrio de Gibbs-Donnan

Se designa así al equilibrio que se produce entre los iones que pueden atravesar la membrana y los que no son capaces de hacerlo.

Es importante saber la función principal de las proteínas y cómo estas pueden funcionar como “secuestradores de cationes” no solo para sodio, sino para otros cationes como H⁺ o Ca²⁺.

1.2.3 ¿Cómo medir o estimar el agua corporal total y sus diferentes compartimentos?

Para conocer **cuánta agua hay en un compartimento** se ha propuesto utilizar un método en el cual se realiza una estimación inyectando un marcador (como un colorante vegetal) y esperar a que este se diluya en el recipiente del que necesitamos saber su volumen/cantidad de agua (por ejemplo un vaso con agua) y se mide la concentración final del biomarcador diluido en el recipiente. Esto se le conoce como **“método de dilución”** y se simplifica en la siguiente fórmula:

Fórmula del método de dilución

$$\frac{\text{Concentración de nuestro marcador}}{\text{Cantidad de biomarcador inyectado al recipiente}} = \frac{\text{Concentración del marcador DILUIDO EN EL RECIPIENTE}}{\text{Volúmen total del recipiente o Agua total del recipiente}}$$

Un ejemplo sería, si quisiéramos saber cuánta agua tiene una jarra: le ponemos jugo de limón puro y podemos sustituir y despejar la ecuación de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Concentración del jugo de limón a agregar}}{\text{Cantidad de jugo de limón concentrado que colocaremos}} = \frac{\text{Concentración de jugo de limón una vez DILUIDO EN LA JARRA}}{\text{Volúmen total de la jarra o Agua total de la jarra}}$$

Y finalmente...

$$\text{Volumen de agua en la jarra} = \frac{(\text{Concentración de jugo de limón DILUIDO EN LA JARRA}) (\text{Cantidad de jugo de limón concentrado que colocaremos})}{\text{Concentración del jugo de limón a agregar}}$$

Para el cálculo del ACT, LEC, LIC, líquido intersticial o plasma debemos utilizar marcadores específicos (por ejemplo, para calcular el ACT debemos usar un biomarcador que pase por todos los compartimientos del cuerpo, mientras que para calcular el plasma necesitamos uno que no salga de la sangre). Se muestran unos ejemplos a continuación:

Marcadores utilizados para medir el agua en los diferentes compartimentos	
ACT	• T₂O/³H₂O/agua tritiada • ²H₂O/óxido de deuterio • agua pesada • antipirina
LEC	• ²²Na • ¹²⁵I-iotalamato • tiosulfato • inulina • manitol
LIC	• No existe marcador, se calcula (ACT - LEC)
Intersticial	• No existe marcador, se calcula (LEC - plasma)
Plasmático	• ¹²⁵I-albúmina • Azul de Evans

Finalmente, como último punto, mencionamos que podemos calcular el volumen de agua en la sangre (es decir el plasma) pero aún no hemos mencionado cómo calcular el volumen de sangre total, esto lo podemos saber con el hematocrito (que es el porcentaje de células en la sangre) con la siguiente operación:

Cálculo del volúmen total de sangre

$$\text{Volumen de sangre} = \frac{\text{volumen del plasma}}{1 - \left(\frac{\text{hematocrito expresado en porcentaje}}{100} \right)}$$

O...

$$\text{Volumen de sangre} = \frac{\text{volumen del plasma}}{1 - (\text{Hematocrito expresado en número decimal})}$$

1.3 Homeostasis

1.3.1 Conceptos iniciales

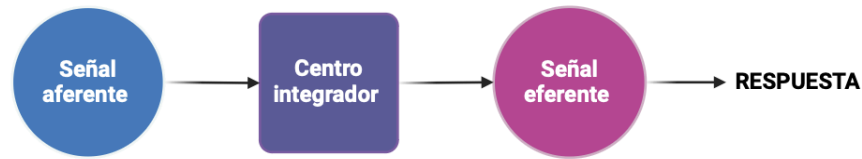
Podemos definir al **medio interno** como el líquido que baña todos tejidos y células del organismo, separándolos del medio externo y brindándoles todos los elementos necesarios para su correcto funcionamiento.

Al hablar de este “mar interior”, nos referimos al **líquido extracelular**, el cual fluye por todos los compartimentos del organismo para mantener una composición constante; compuesta por el pH, temperatura, presión osmótica, gases, iones y nutrientes.

La **homeostasis** se define como el “**mantenimiento de las condiciones casi constantes del medio interno**”, en otras palabras, mantener valores como pH, temperatura, tensión arterial y osmolaridad plasmática dentro de intervalos normales que, a su vez, mantienen saludable el cuerpo humano.

Para llegar a la homeostasis, nuestro cuerpo tiene diversos sistemas de control que se encargan de manejar las muchas variables de nuestro organismo, los cuales, *grosso modo*, se componen de una **señal aferente** que manda información de un estímulo, un **centro integrador** que analiza la información y una **señal eferente** que provoca un cambio en la variable estimulada.

Sistema de control simple

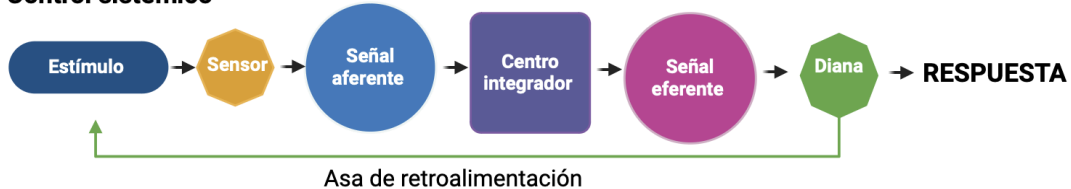


1.3.2 Circuitos retroalimentación

Los mecanismos de **control sistémicos**, también llamados controles reflejos, regulan variables multiorgánicas por medio del sistema nervioso central y el sistema endocrino y tienen un asa de respuesta compleja: un estímulo es detectado por un **sensor**, que manda señales aferentes a un **centro integrador**, que envía una señal eferente a un **órgano diana** y provoca una respuesta.

Una vez que un sistema de control tiene una respuesta, esta debe ser **regulada** para que no afecte nuevamente el equilibrio del organismo. Esto se da por las **asas o circuitos de retroalimentación**, que actúan sobre el componente aferente de los sistemas de control para regular la respuesta.

Control sistémico



Retroalimentación negativa

Las asas de retroalimentación negativa se oponen a la respuesta de los sistemas de control para que esta no desregule la variable nuevamente en dirección opuesta. Por ejemplo, en un aumento de la presión arterial, los sistemas de control buscarán disminuirla por diferentes mecanismos; mientras que el asa de retroalimentación busca regular estos mecanismos para no bajar la presión arterial por debajo de los niveles normales. **Estos circuitos son los más comunes en el organismo.**



Retroalimentación positiva

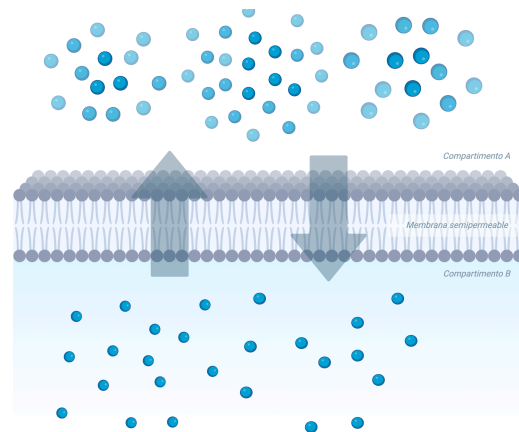
Las asas de retroalimentación positiva potencian los efectos de respuesta por un sistema de control, llevando los valores de la variable lejos de lo normal, como un círculo vicioso que altera más y más al sistema. Tal es el caso de las contracciones uterinas durante el parto, en los cuales las contracciones expulsan el producto por el cuello uterino, dilatando las paredes del mismo, lo que a su vez provoca la liberación de oxitocina y finalmente más contracciones. Otros ejemplos son la propagación de los potenciales de acción, la coagulación y el control de las hemorragias.



1.4 Mecanismos de transporte a través de la membrana celular

1.4.1 Difusión

Podemos definir a la difusión como el **movimiento de moléculas en direcciones aleatorias**, chocando entre sí y transfiriendo su energía cinética de manera constante entre ellas. Este movimiento puede ocurrir a través de una membrana celular, ya sea con o sin la ayuda de proteínas transportadoras.



Difusión simple

La **difusión simple** ocurre a través de la membrana **sin ayuda de transportadores** entre ambos lados de la membrana, es decir, un movimiento de soluto del lado con **mayor concentración al lado con menor concentración** hasta que ambos lados se igualen; ahora bien, el movimiento también ocurre en dirección contraria, por lo que para conocer la difusión neta, tenemos que restar la concentración exterior menos la concentración interior de la célula.

Difusión neta $\propto (C_e - C_i)$

La **difusión neta** también se llama **flujo** y se ve influenciada por diferentes factores:

- El primero de ellos es el **gradiente de concentración**, que funciona como fuerza impulsora, es decir, **mientras mayor la diferencia de concentración, mayor será la difusión neta**; de lo contrario, si las concentraciones son iguales, no habrá movimiento alguno.
- La **liposolubilidad** o **coeficiente de partición** nos dice qué tan soluble es un soluto en aceites, mientras mayor sea, más fácil será que un soluto atraviese la membrana celular por sí sola, sin embargo, si es bajo, la molécula no podrá pasar con facilidad y necesitará ayuda de canales, como se verá más adelante.
- El **coeficiente de difusión** nos dice qué tanto puede difundir un soluto dependiendo de su tamaño y de la viscosidad del medio; mientras mayor sea el tamaño de la molécula y la viscosidad del medio, menos podrá difundir la sustancia; mientras que una molécula pequeña en un medio poco viscoso podrá difundir fácilmente.
- Un alto **grosor de membrana** reduce la difusión neta al incrementar la distancia que tiene que recorrer una sustancia para llegar al otro lado de la barrera; mientras tanto una gran **superficie** de difusión permite que un mayor número de moléculas puedan pasar al otro lado de la membrana y por lo tanto incrementar la difusión neta.
- Los coeficientes de partición y difusión, así como el grosor de membrana pueden juntarse en un solo término llamado **permeabilidad**, que junto con la superficie y el gradiente de concentración, nos dan la fórmula para calcular el flujo y por ende la velocidad de difusión:

Fórmula de velocidad de difusión

$$J = PA (C_A - C_B)$$

Donde:

J= Velocidad neta de difusión (flujo)

P= Permeabilidad

A= Superficie de difusión

CA= Concentración en la solución A

CB= Concentración en la solución B

1.4.3 Difusión facilitada

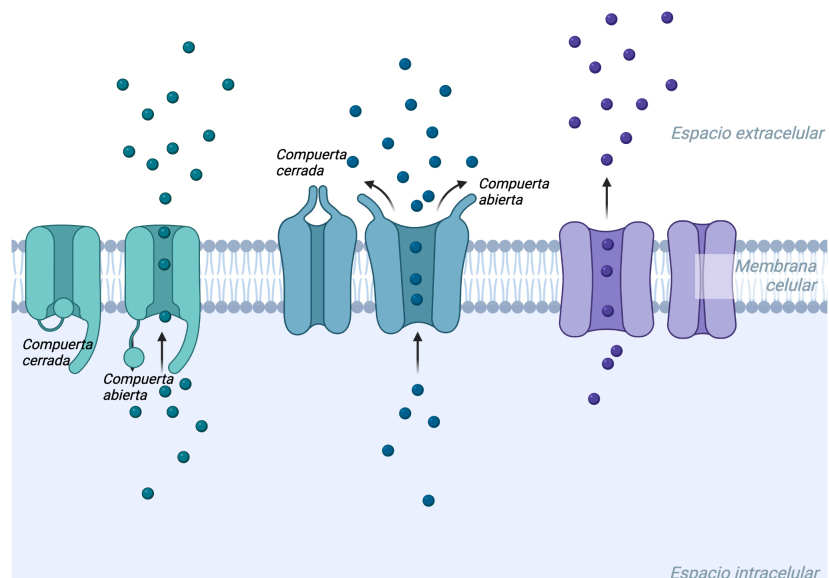
Este tipo de difusión ocurre **a favor de un gradiente de concentración**, sin embargo, **requiere de proteínas transportadoras** que mueven los solutos de un lado al otro de la membrana. Tal es el caso de la glucosa y muchos aminoácidos.

Es importante mencionar que, al estar mediada por transportadores, la difusión facilitada alcanza una **velocidad máxima** por la saturación de las proteínas transportadoras, con lo que el movimiento de solutos se estabiliza. Esto no sucede en la difusión simple, proceso en el cual la velocidad de difusión aumenta con el gradiente de concentración y se perpetúa mientras que exista el mismo.

Las **moléculas hidrosolubles** necesitan de canales para poder atravesar la membrana celular, tal es el caso de los **iones** cargados eléctricamente, los cuales utilizan canales iónicos para su difusión. Estos canales tienen selectividad para los iones que dejan pasar, dependiendo de la **carga** del canal y de su **tamaño**; si el canal tiene carga positiva, dejará pasar aniones y excluirá los cationes; al mismo tiempo, la propia estructura del canal funciona como un filtro que deja pasar solo los iones de un tamaño y forma adecuados. Ahora bien, los canales tienen compuertas que pueden encontrarse cerradas o abiertas, si es más **probable que se encuentren abiertas**, entonces habrá mayor **conductancia** o **permeabilidad** que si se encuentran cerradas.

Los canales mencionados previamente tienen distintos mecanismos o estímulos que controlan sus compuertas, activándolos o inactivándolos. Algunos canales son **dependientes del voltaje**, es decir, de los cambios en el potencial de membrana; por ejemplo, un canal puede abrirse cuando el potencial de membrana se vuelve más positivo y cerrarse cuando se vuelve menos positivo, mientras que a otro canal le ocurrirá lo contrario. Otros canales son activados por sustancias químicas; si estas sustancias provienen de otra célula, como una hormona, entonces es un canal **dependiente de ligando**, en cambio, si son controlados por moléculas de una cascada de señalización intracelular, entonces son **dependientes de segundos mensajeros**.

Antes hemos mencionado que la difusión se ve influenciada por factores como el gradiente de concentración y el grosor de membrana, sin embargo, estos no son los únicas variables de importancia cuando hablamos de un ion eléctricamente cargado.



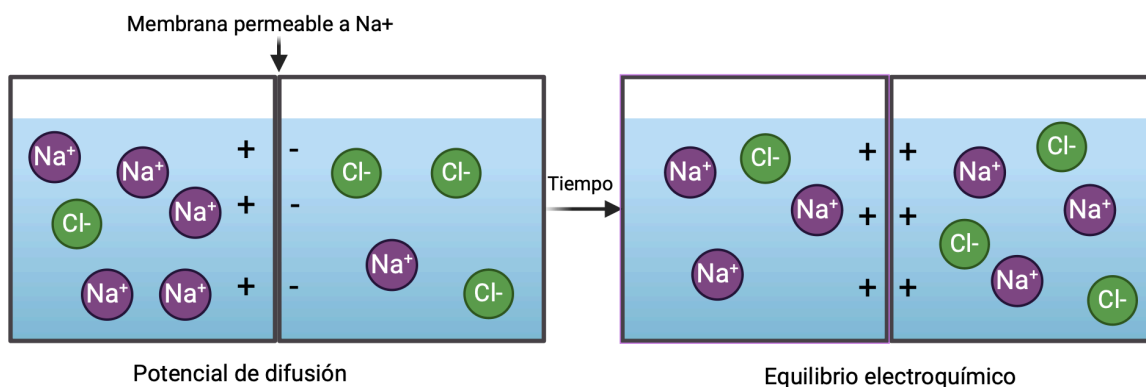
1.4.2 Potencial de difusión

El **potencial de difusión** es la diferencia de potencial generado a través de una membrana cuando un ion difunde a favor de su gradiente de concentración; este potencial se mide en milivoltios (mV), depende del tamaño del gradiente de concentración y su signo depende de la carga del ion, es decir, un catión llevará una carga positiva y un anión una carga negativa.

1.4.3 Potencial de equilibrio

El **potencial de equilibrio** se refiere al potencial de difusión que se **opone** directamente a un mayor movimiento de soluto causado por gradiente de concentración; visto de otra forma, **la diferencia de potencial causada por la difusión finalmente termina deteniendo la difusión por las cargas eléctricas**, ya sea positivas o negativas, que han pasado al otro lado de la membrana.

Por ejemplo, digamos que un catión difunde de la solución A con carga positiva a la B con carga negativa gracias a un gradiente de concentración, al difundir, el catión lleva una carga positiva a la solución B, sin embargo, esa misma carga positiva repele al catión e impide que siga difundiendo a favor de su gradiente de concentración; una vez que las fuerzas químicas y eléctricas se contrarrestan una a la otra para que no exista difusión neta, se dice que hemos llegado al **equilibrio electroquímico**.



Para calcular el potencial de equilibrio específico de cada ion capaz de difundir por la membrana celular, utilizamos la **ecuación de Nernst**, que utiliza el gradiente de concentración para un ion y lo convierte en el voltaje necesario para detener la difusión; esto utilizando diferentes variables.

Ecuación de Nernst

Donde:

E_x= Potencial de equilibrio para un ion específico

R= Constante de los gases

T= Temperatura absoluta

$$E_x = \frac{-RT}{zF} \log_{10} \frac{(C_i)}{(C_e)}$$

F= Constante de Faraday
z= Carga del ion
C_e= Concentración extracelular
C_i= Concentración intracelular

La **fuerza impulsora** es aquella que promueve la difusión de solutos a través de una membrana; para las moléculas no cargadas es el **gradiente de concentración**, sin embargo, para los iones, también se debe tomar en cuenta la **diferencia de potenciales** entre la membrana y el potencial de equilibrio del ion en cuestión. Entonces, para calcular la fuerza impulsora para un ion, tenemos:

$$\text{Fuerza impulsora neta} = E_m - E_x$$

Donde:
E_m= Potencial de membrana en reposo
E_x= Potencial de equilibrio del ion

Por ejemplo, si el potencial de membrana es negativo, los cationes buscarán llevarlo a su propio potencial, mientras que si el potencial de membrana es positivo, los aniones buscarán llevarlo a su potencial de equilibrio.

La **corriente iónica** se produce cuando hay movimiento de iones a través de la membrana gracias a la fuerza impulsora y la conductancia, siendo ambas las que determinan la magnitud del flujo, mientras que solo la fuerza impulsora determina la dirección del mismo.

Corriente iónica

$$I_x = G_x (E_m - E_x)$$

Donde:
I_x= Corriente iónica
G_x= Conductancia iónica
E_m - E_x= Fuerza impulsora del ion

1.4.4 Ósmosis

La **ósmosis** puede definirse como el flujo de agua a través de una membrana por la diferencia de concentración de solutos a ambos lados; desde el compartimiento con menor cantidad de soluto, al compartimiento con mayor cantidad de soluto.

El movimiento de agua ocurre gracias a la **presión osmótica**, que funciona como la fuerza impulsora para el flujo de agua y es generada por una diferencia de concentración entre soluciones, la cual a su vez genera una diferencia de presión hidrostática, que mueve el agua de la solución con menos soluto (más agua), hacia la que tiene más soluto (menos agua). También podemos decir que la presión osmótica es la presión necesaria para detener el flujo de agua a través de la membrana, o la

presión que debería aplicarse para equilibrar ambas soluciones y disipar el gradiente de presión que promueve el flujo de agua.

La presión osmótica depende de la concentración de solutos osmóticamente activos y de su permeabilidad, es decir, si pueden pasar fácilmente a través de la membrana. Se puede calcular por medio de la **ecuación de Van't Hoff**:

Ecuación de Van't Hoff

$$\pi = g C \sigma R T$$

Donde:

π = Presión osmótica

g = Número de partículas por mol en solución

C = Concentración del soluto

σ = Coeficiente de reflexión

R = Constante de gases

T = Temperatura absoluta

La **osmolaridad** es la concentración de partículas osmóticamente activas, expresada como **osmoles** o miliosmoles **por litro de solución**. Podemos calcular la osmolaridad al multiplicar la concentración del soluto y el número de partículas en las que se disocia. Por ejemplo, la glucosa no se disocia, por lo que un mol de glucosa equivale a un osmol de glucosa; por otro lado, el NaCl se disocia en dos partículas, por lo que un mol de NaCl equivale a dos osmoles en solución.

Si dos soluciones tienen la misma osmolaridad son **isoosmóticas**; si una tiene más osmolaridad que otra se llama **hiperosmótica** y la de menor osmolaridad es **hipoosmótica**.

La **osmolalidad** es parecida a la osmolaridad, solo que en este caso se expresa como **osmoles por Kg de agua**.

El **coeficiente de reflexión** nos dice qué tan fácilmente difunde un soluto a través de la membrana. Si es **1**, la membrana es completamente impermeable y el soluto ejerce su máxima presión osmótica; si es **0**, la membrana es completamente permeable y el soluto no ejerce presión osmótica; si el valor se encuentra **entre 0 y 1**, la membrana es parcialmente permeable y el soluto ejerce sólo cierta presión osmótica, dependiendo si el coeficiente se acerca más a 1 o a 0.

Si dos soluciones tienen la misma presión osmótica, son **isotónicas** y no habrá flujo entre ellas; si tienen diferentes presiones, la que tenga mayor presión es **hipertónica** y la que tenga menor presión es **hipotónica**, entonces, el agua fluirá de la solución hipotónica a la hipertónica.

Ahora, como la membrana celular es impermeable a moléculas hidrosolubles y por lo tanto al agua, ésta se debe mover a través de canales que llamamos **acuaporinas**. Se han descubierto 13 hasta el momento y cada uno puede cumplir funciones específicas en distintos órganos y células del cuerpo.

1.4.5 Proteínas de transporte

Antes hemos mencionado las proteínas transportadoras, sin embargo, no se han detallado todas las características que influyen en el transporte de sustancias. Primero tenemos a la **saturación** , la cual se refiere a que las proteínas sólo pueden unir un número limitado de moléculas hasta llegar a su transporte máximo, cuando todos los sitios de unión están ocupados y la velocidad de transporte no puede aumentar más. También tenemos la **estereoespecificidad** , la cual nos dice que cada transportador solo acepta ciertas moléculas en específico y excluye a las demás; sin embargo, si un soluto es muy parecido, puede unirse al transportador y reemplazar al original, característica que llamamos **competición** .

Es hora de hablar del **transporte activo** , un proceso en el cual los solutos se mueven a través de la membrana gracias a proteínas transportadoras, solo que en este caso, es en contra de su gradiente de concentración. Ahora bien, este transporte se divide en dos tipos dependiendo el tipo de energía que utiliza para mover las moléculas.

Transporte activo primario

En el **transporte activo primario** , el ATP se une a la proteína transportadora, es hidrolizado en ADP y fosfato para brindar energía directamente y así llevar a cabo el proceso de transporte.

La **bomba Na^+/K^+** o **Na^+/K^+ ATPasa** es un gran ejemplo de este tipo de transporte, ya que se encarga de bombear 3 iones Na^+ del LIC al LEC y 2 iones K^+ del LEC al LIC, manteniendo así los gradientes de concentración de cada ion, así como la carga negativa dentro de la célula. Otra función de gran importancia es mantener el volumen celular, ya que, al tener una gran cantidad de cargas negativas en su interior, la célula atrae cationes, los cuales, ya dentro de la célula, provocan osmosis y lisis celular.

La **Ca^{2+} ATPasa** o **bomba de Calcio (PMCA)** , se encarga de bombear un ion de Calcio desde el LIC hacia el LEC para mantener una baja concentración intracelular; sin embargo, las bombas de calcio no solo se encuentran en la membrana celular, también están presentes en las membranas del retículo sarcoplásmico (**SERCA**) de los miocitos para llevar a cabo funciones adecuadas de contracción.

La **bomba H^+/K^+** se encuentra en las células parietales del estómago bombeando H^+ a la luz del estómago para acidificar su contenido y en las células intercaladas alfa del túbulo colector renal, donde se encarga de secretar H^+ a la luz tubular y que estos sean excretados en la orina.

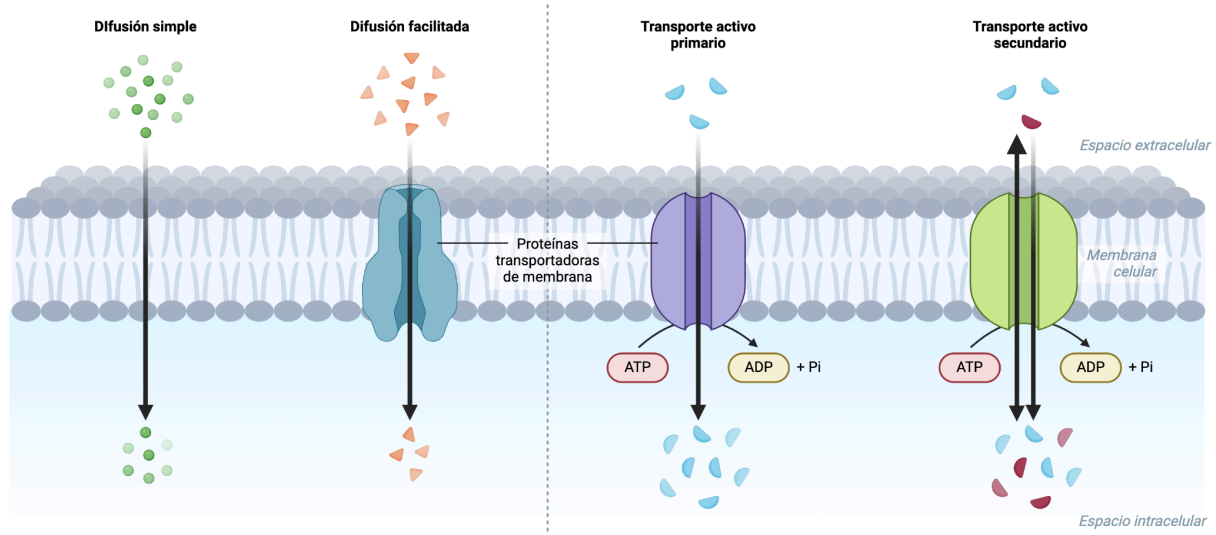
Transporte activo secundario

En el **transporte activo secundario** , 2 o más moléculas se mueven al mismo tiempo, unas a favor de su gradiente y otras en contra del mismo. Las moléculas que se mueven en contra de su gradiente utilizan la energía generada por el movimiento de

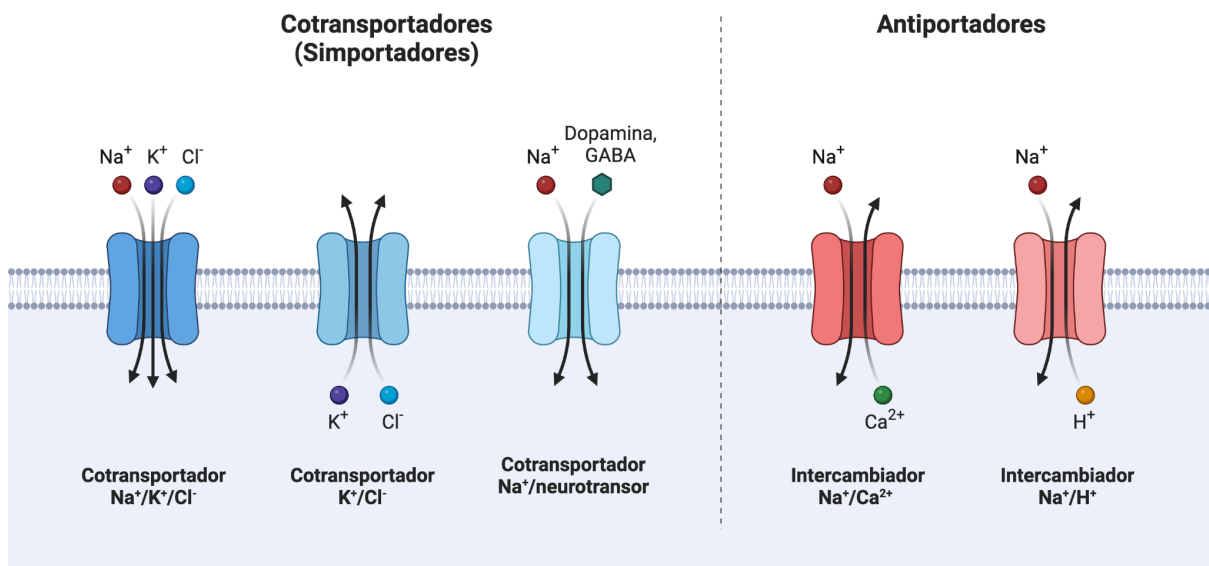
otra molécula a favor de su propio gradiente para vencer las fuerzas que se oponen al movimiento; la molécula que se mueve a favor del gradiente, lo hace porque un transportador activo primario ya ha generado la diferencia de concentración suficiente para que pueda hacerlo (Na^+/K^+ ATPasa en la mayoría de los casos); por ello se dice que el transporte activo secundario utiliza el ATP como fuente de energía indirecta.

En el **cotransporte** (también llamado simporte), un tipo de transporte activo secundario, las moléculas en cuestión se mueven en la misma dirección, es decir, todos al interior o todos al exterior. Un buen ejemplo de cotransporte es el que llevan a cabo los transportadores SGLT en el intestino, al mover sodio y glucosa al interior de la célula, utilizando la energía generada por el movimiento de sodio a favor de su gradiente electroquímico para impulsar el de la glucosa.

En el **contratransporte** (también llamado antiporte), los solutos se dirigen en direcciones opuestas, uno a favor de su gradiente y otro en contra. Un ejemplo de transportador puede ser el que intercambia calcio y sodio, el cual ayuda a mantener una baja concentración de calcio en el interior de la célula al transportarlo en contra de su gradiente electroquímico.



Ejemplos de transporte activo secundario



1.4.6 Características estructurales de la membrana celular

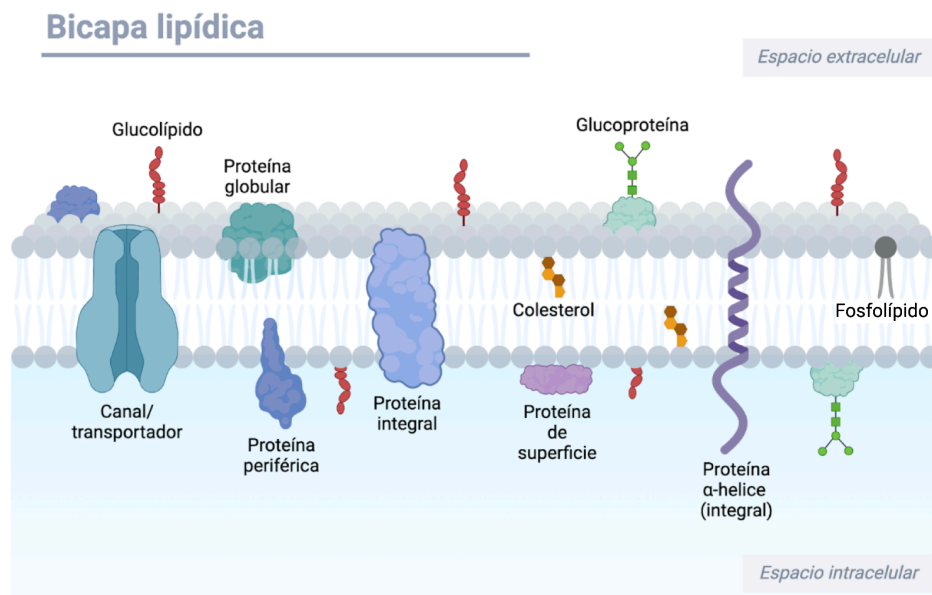
La membrana celular se encarga de separar el líquido intracelular del líquido extracelular gracias a sus componentes lipídicos (fosfolípidos, colesterol y esfingolípidos) y proteicos.

Los **fosfolípidos** se conforman por cabezas de glicerol de carácter hidrofílico y dos colas de ácidos grasos de carácter hidrofóbico. Los fosfolípidos se acomodan de tal forma que las cabezas de glicerol se alejan entre ellas, mirando hacia el interior y el exterior de la célula, mientras que las colas de ácidos grasos quedan juntas unas con otras en medio de las cabezas, así formando una **bicapa lipídica** que es permeable a

compuestos liposolubles como el oxígeno y el dióxido de carbono, mientras es impermeable a elementos hidrosolubles como glucosa iones y aminoácidos.

Los **esfingolípidos** de la membrana son de carácter anfipático y, por lo general, sirven como sitios de adhesión a otras células; mientras que el **colesterol** presente en la membrana le otorga fluidez y permeabilidad a elementos hidrosolubles.

Las proteínas presentes en la membrana celular se dividen en integrales y periféricas. Las **proteínas integrales** están incrustadas fuertemente en la membrana y pueden atravesarla en su totalidad, es por ello que generalmente sirven como canales para sustancias hidrosolubles, transportadores o receptores de productos químicos provenientes de otras células. Por otro lado, las **proteínas periféricas** no están incrustadas en la membrana y solo se encuentran del lado intracelular o extracelular de la misma; pueden encontrarse cumpliendo funciones estructurales en el citoesqueleto o como anclaje.



1.5 Biofísica de la membrana

1.5.1 Potencial de membrana

El **potencial de membrana** es la diferencia de potencial que existe a ambos lados de la membrana celular por los iones permeables a través de ella y los potenciales de difusión que estos generan. Este potencial depende de los gradientes de concentración de cada ion y su permeabilidad. Mientras más permeable sea un ión, influirá más sobre el potencial de membrana, tal es el caso del **potasio**, ion que

contribuye en gran parte al potencial de membrana; mientras que el **cloro**, el **calcio** y el **sodio** contribuyen en menor medida al potencial por su baja permeabilidad.

Como ejemplo, si la membrana fuera permeable únicamente al potasio, y existiera un alta concentración intracelular, el catión difundiría hasta llevar el potencial de membrana a su propio potencial de equilibrio, dejando una carga negativa intracelular y positiva extracelular, Si el ion en cuestión fuese sodio con alta concentración extracelular, difundiría al interior de la célula y llevaría el potencial de membrana hasta su propio potencial de equilibrio, dejando una carga positiva intracelular y negativa extracelular.

Visto de otra manera, cada ion permeable tiende a llevar el potencial de membrana hasta su propio potencial de equilibrio. Sin embargo, como existen varios iones, es necesario considerar el potencial de difusión de cada uno para determinar el potencial de membrana final. Este puede calcularse mediante la **ecuación de Goldman-Hodgkin-Katz**, que realiza una suma ponderada de los potenciales de difusión de todos los iones involucrados y se utilizada para estimar el potencial de membrana al interior de una célula permeable a Na^+ , K^+ y Cl^- .

Ecuación de Goldman-Hodgkin-Katz

$$\text{FEM}(\text{milivoltios}) = 61,4 \log \frac{C_{\text{Na}_e^+} P_{\text{Na}^+} + C_{\text{K}_e^+} P_{\text{K}^+} + C_{\text{Cl}_i^-} P_{\text{Cl}^-}}{C_{\text{Na}_i^+} P_{\text{Na}^+} + C_{\text{K}_i^+} P_{\text{K}^+} + C_{\text{Cl}_e^-} P_{\text{Cl}^-}}$$

Donde:

FEM= Fuerza electromotriz

C=Concentración del ion

P=Permeabilidad de la membrana al ion

Así, podemos enfatizar que cuanto mayor permeable sea la membrana a un ion, mayor será su influencia sobre el potencial de membrana en comparación con otro ion menos permeable. Por esta razón, en condiciones de reposo –cuando no se genera un potencial de acción– el potencial de membrana se aproxima al potencial de equilibrio del potasio, aunque con menor negatividad, debido a que el sodio presenta una ligera permeabilidad a través de la membrana.

El potencial de membrana en reposo se encuentra alrededor de los -90 mV, sin embargo, dependiendo de la literatura, también puede establecerse entre los -70 mV -80 mV.

1.5.2 Potenciales electrotónicos

Cualquier cambio en el potencial de membrana que no cause el disparo de un potencial de acción, se denomina **potencial electrotónico**. Estos cambios pueden ser **despolarizantes**, si se vuelve menos negativo el potencial de membrana por el flujo de

cargas positivas al interior de la célula; o **hiperpolarizantes**, si aumenta la electronegatividad por el flujo de cargas positivas fuera de la célula.

1.5.3 Excitabilidad celular

Las células capaces de responder a estímulos químicos, eléctricos o mecánicos por medio de potenciales locales o propagados, son células excitables; como son las neuronas del sistema nervioso y las células musculares (esquelético, liso y cardíaco).

1.5.4 Potencial de acción

Los potenciales de acción son cambios rápidos en el potencial de membrana, primero con una despolarización seguida de repolarización. Estos cambios se propagan a lo largo de la membrana hasta que llegan a transmitir una señal por medio de sinapsis.

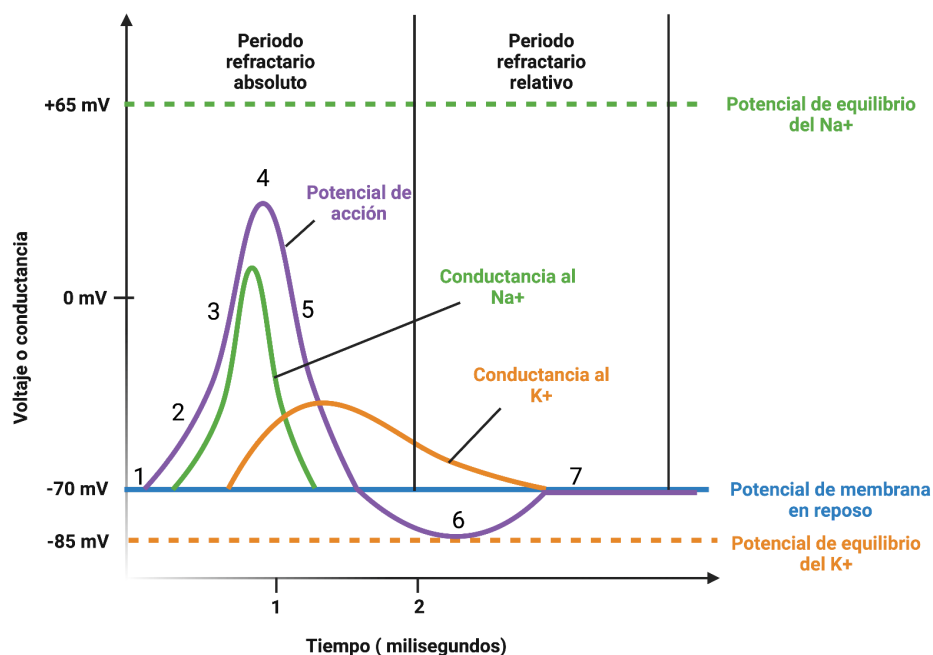
Es importante mencionar que todos los potenciales de acción presentan un **tamaño y una forma estereotipados**; en otras palabras, todos los potenciales de acción de un mismo tipo celular específico son idénticos entre sí. Siempre se despolarizan y repolarizan a los mismos voltajes que los demás. Además, son fenómenos de carácter **"todo o nada"**: si un estímulo no alcanza el umbral, no se producirá ningún potencial de acción; en cambio, si lo alcanza, siempre generará un potencial de acción. Por último, los potenciales de acción se **propagan** a lo largo de la membrana, como se verá más adelante.

Los potenciales de acción tienen varias fases sucesivas en las cuales intervienen **canales de sodio activados por voltaje** y **canales de potasio activados por voltaje**, principalmente. Los canales de sodio tienen compuertas de activación cercanas al exterior celular y compuertas de inactivación cercanas al interior celular; mientras que los canales de potasio solo tienen una compuerta. La importancia de estos canales y sus compuertas se explica a continuación con las fases del potencial de acción.

- I. **Fase de reposo:** Aquí el potencial de membrana se acerca al del potasio y el cloro por sus conductancias elevadas, con alrededor de -90 mV, ya que los canales para ambos iones se encuentran abiertos; al contrario, la conductancia para el sodio es baja, porque la compuerta de activación del **canal de sodio activado por voltaje** se encuentra cerrada e impide el paso de los iones a través del canal.
- II. **Fase de ascenso/despolarización:** Cuando un estímulo despolariza la membrana hasta su **potencial umbral** (el cual puede variar dependiendo de la célula) por la entrada de sodio, las compuertas de activación de los canales de sodio dependientes de voltaje se abren y permiten una mayor entrada al catión, lo cual eleva aún más el potencial de membrana, con la posibilidad de hacerlo ligeramente positivo, fenómeno llamado **sobretiro**; sin embargo, no se llega al potencial de equilibrio para el sodio, siempre se mantiene por debajo de éste.

- III. **Fase de descenso/repolarización:** Tras llegar a un punto máximo de despolarización, el potencial busca llegar al estado de reposo volviéndose más negativo. Esto sucede por el **cierre de las compuertas de inactivación en los canales de sodio**, proceso que se da milésimas de segundo después que la apertura de las compuertas de activación y con menor velocidad. Asimismo, los canales de potasio activados por voltaje se empiezan a abrir por despolarización de la membrana, al mismo tiempo que se abren los canales de sodio durante la despolarización, permitiendo la salida de iones potasio al LEC. Así la membrana se repolariza y se vuelve más negativa que en estado de reposo, estado llamado **hiperpolarización**. Posteriormente la conductancia para el potasio regresa al estado de reposo al igual que el potencial de membrana, sin una mayor negatividad de la que se presentaría en reposo.

Conductancias del sodio y potasio durante un potencial de acción



Existen periodos en los que una célula no puede producir un potencial de acción, llamados **periodos refractarios**:

Un **periodo refractario absoluto** es aquel en el que no se puede producir un potencial de acción por cualquier motivo, sin importar el estímulo y su intensidad; el periodo refractario absoluto comprende el potencial de acción en su totalidad y se da por el cierre de las compuertas de inactivación presentes en los canales de sodio, los cuales una vez inactivados impiden la entrada de iones sodio a la célula e imposibilitan la generación de un potencial de acción.

Un **periodo refractario relativo** es aquel punto donde se puede generar un potencial de acción, solo que se necesita un estímulo más potente que si la membrana estuviera en reposo. Este periodo se encuentra inmediatamente después del periodo refractario absoluto y comprende el momento en el que la célula está hiperpolarizada por la mayor conductancia a los iones potasio que se da tras un potencial de acción.

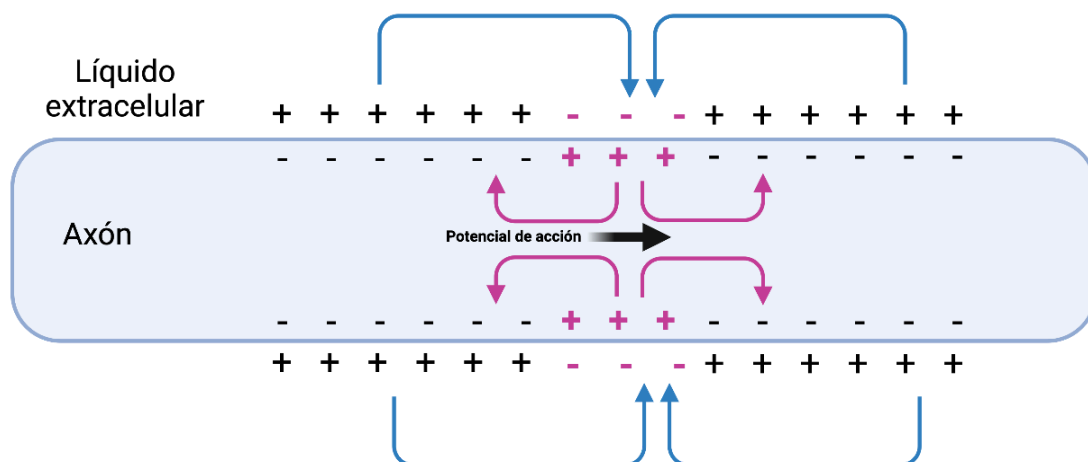
Si una célula se despolariza lentamente o permanece en un estado de despolarización constante a partir de un estímulo débil, entonces los canales de sodio se cerrarán y la célula no podrá producir ni conducir potenciales de acción de forma adecuada, fenómeno que llamamos **acomodación**. Este se puede dar en casos de hiperpotasemia, trastorno en el que la mayor concentración extracelular de potasio lleva a la despolarización de la célula de forma constante y el cierre de los canales de sodio durante periodos prolongados de tiempo.

1.5.5 Conducción del potencial de acción

Como ya se mencionó antes, los potenciales de acción pueden propagarse a lo largo de la membrana, esto ocurre por el **flujo de corrientes locales**.

Recordemos que la membrana se encuentra polarizada, con carga positiva en el exterior y negativa en el interior. Durante el potencial de acción, las cargas se invierten debido al ingreso de sodio al LIC. Las cargas positivas que entran se desplazan hacia la región adyacente de la membrana que aún está en reposo, despolarizándola hasta alcanzar el umbral, mientras que la zona previamente activada comienza a repolarizarse. De esta manera, los potenciales de acción se propagan a lo largo de la membrana.

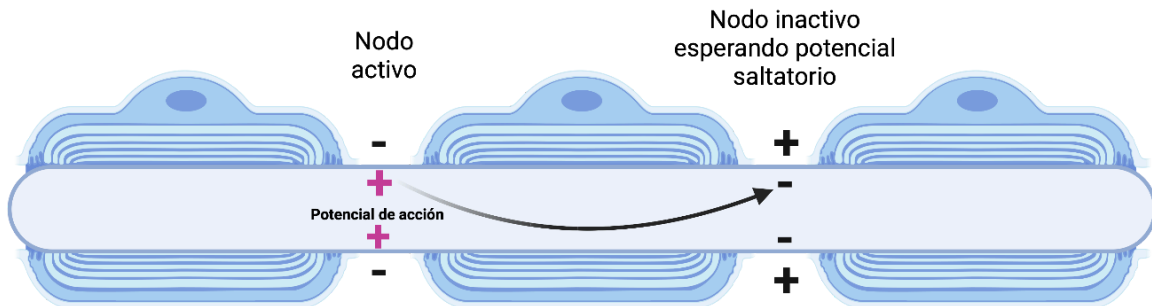
Propagación del potencial de acción en un axón amielínico



La propagación del potencial de acción se produce en todas direcciones, hasta que toda la membrana de la célula excitable se ha despolarizado.

En las neuronas sobre los cuales las células de Schwann han formado vainas de mielina alrededor de sus axones, el proceso de propagación ocurre por **conducción saltatoria** a través de los nodos de Ranvier, los cuales son puntos de membrana celular no mielinizados por las células de Schwann.

Propagación del potencial de acción en un axón mielínico



Es en estos puntos sin mielina, que ocurren los potenciales de acción, cuya corriente de iones positivos al interior de la célula despolariza la membrana sólo en los nodos cercanos, como si la corriente diera saltos de un punto a otro hasta llegar a una sinapsis. Este proceso se da por la gran resistencia que ofrecen las vainas de mielina para conducir la corriente, por lo que esta debe buscar una "ruta" más accesible y llegar a despolarizar la membrana en otros puntos con menor resistencia. Es así que la conducción nerviosa tiene gran velocidad y no se pierde la corriente con el recorrido.

La velocidad con la que las células excitables conducen los potenciales de acción es la **velocidad de conducción**, y dependen de las **propiedades del cable**, es decir, las constantes de tiempo y longitud. La **constante de tiempo** nos dice qué tan rápido se despolariza o hiperpolariza una membrana con una corriente de entrada o de salida, respectivamente; visto de otra forma, es el tiempo que tarda la corriente inicial en reducirse un 37% de su valor inicial. Esta constante depende de la **resistencia de la membrana** y la **capacitancia de la membrana**; mientras mayor sea la resistencia, más difícil será cambiar el potencial de membrana, con lo que aumenta la constante de tiempo. La capacitancia es la capacidad de almacenar carga, mientras mayor sea, más tiempo se necesitará para "llenar" de carga a la célula, con lo que también aumenta la constante de tiempo y, mientras mayor sea la constante de tiempo, más tardará en reducirse la corriente inicial.

Constante de tiempo

$$T = R_m \times C_m$$

Donde:

T= Constante de tiempo

R_m= Resistencia de membrana

C_m= Capacitancia de membrana

La **constante de longitud** nos dice la distancia que viajará la corriente despolarizante en la membrana o, visto de otro modo, la distancia desde el sitio de inicio de la corriente hasta el punto en el que se pierde un 63% de la carga original; mientras mayor sea esta constante, más lejos llegará la despolarización. Se ve afectada por la resistencia de la membrana y la resistencia interna, esta última nos dice que tan fácil es que fluya la corriente en el LIC y, mientras más alta sea, mayor será la constante de longitud.

Constante de longitud

$$\Delta \propto \sqrt{R_m / R_i}$$

Donde:

Δ= Constante de longitud

R_m= Resistencia de membrana

R_i= Resistencia interna

En los nervios mielinizados, en los cuales las vainas de mielina ofrecen mayor resistencia de membrana y reducen la capacitancia de la misma, lo que disminuye el tiempo necesario para la despolarización y aumenta la velocidad de conducción. Otro aspecto de importancia en la conducción por las células nerviosas, es el tamaño de las fibras, ya que, mientras mayor diámetro tengan, menor será la resistencia interna y por lo tanto, aumentará la constante de longitud.

1.6 Sinapsis

La sinapsis es el proceso mediante el cual las neuronas **se comunican entre sí** para transmitir información.

Existen dos principales tipos de sinapsis:

Sinapsis química	Sinapsis eléctrica
Se compone de:	Se compone de:

Neurona presináptica, neurona postsináptica y un neurotransmisor

La primera neurona segrega un neurotransmisor a nivel de su terminación nerviosa, el cual actúa sobre los receptores en la membrana de la segunda neurona.

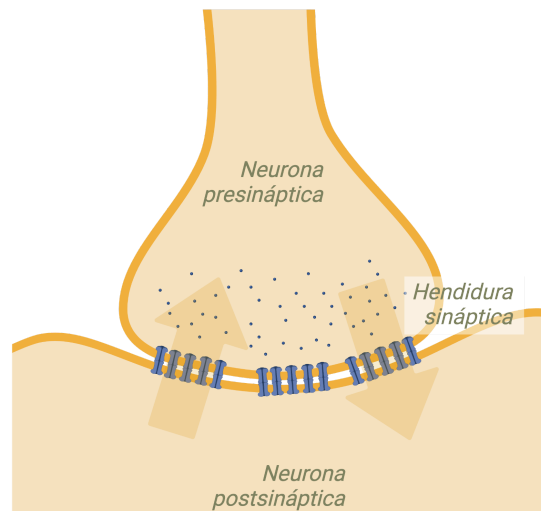
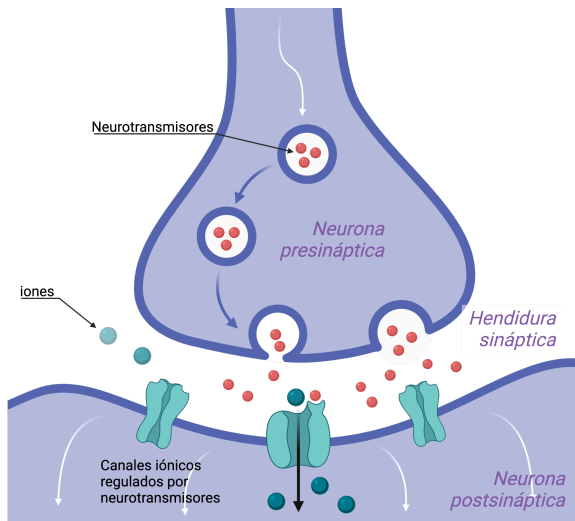
Son de transmisión unidireccional.

Representan la mayoría de las sinapsis utilizadas en el sistema nervioso central

2 neuronas, iones y uniones en hendidura.

Los citoplasmas de las células se conectan a través de uniones en hendidura que permiten el movimiento de iones desde el interior de la neurona 1 hasta el interior de la siguiente neurona.

Son de transmisión bidireccional.



1.6.1 Anatomía de la sinapsis química

Terminales o botones presinápticos

Son el extremo final de las fibras nerviosas originadas en una neurona. Zona encargada de segregar el neurotransmisor excitador o inhibidor.

Hendidura sináptica

Espacio que existe entre la terminal presináptica y la membrana de la neurona postsináptica. Su anchura es de 200 a 300 angstroms.

Vesículas sinápticas transmisoras

Contienen el neurotransmisor que será liberado en el terminal presináptico hacia la hendidura sináptica.

Mitocondrias

Aportan ATP para suministrar energía para sintetizar más sustancia neurotransmisora.

Membrana postsináptica

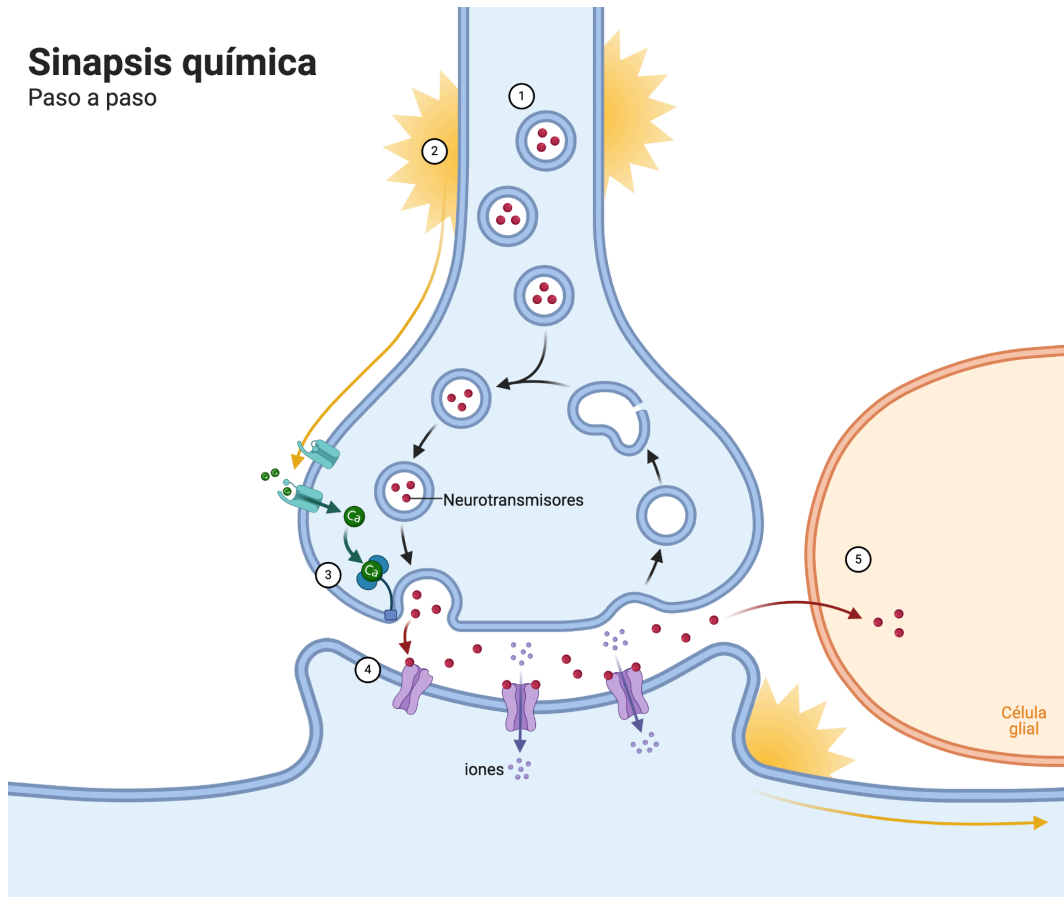
Contiene a los receptores del neurotransmisor. Una vez que es estimulada ya sea excitatoriamente o inhibitoriamente, desencadena cambios en su permeabilidad a diferentes iones.

1.6.2 Pasos en la sinapsis química

1. Los neurotransmisores son sintetizados en la neurona presináptica y almacenados en vesículas.
2. Propagación del potencial de acción en neurona presináptica
 - a. La membrana del terminal presináptico contiene abundantes canales de calcio dependientes de voltaje.
 - b. Cuando llega un potencial, la neurona se despolariza y se abren los canales de calcio.
 - c. Iones calcio entran en la neurona y se unen a proteínas en la cara interna de la terminal presináptica llamados puntos de liberación.
3. Liberación del neurotransmisor hacia hendidura sináptica
 - a. Los puntos de liberación generan una zona de apertura en la terminal presináptica y permiten que las vesículas internas liberen sus neurotransmisores hacia la hendidura.
 - b. La cantidad de neurotransmisor liberado es proporcional al total de calcio entrante.
 - i. Una vez que la vesícula libera su contenido, puede ser reciclada.
4. Unión de neurotransmisor a receptor en neurona postsináptica
 - a. Cada receptor contiene
 - i. Un componente de unión que queda por fuera de la membrana postsináptica y es el sitio a donde se une el neurotransmisor
 - ii. Un componente intracelular que desencadena la apertura de canales iónicos (receptor ionotrópico) o activa segundos mensajeros (receptor metabotrópico)
5. Los neurotransmisores sobrantes son recapturados por células gliales para su reciclaje.

Sinapsis química

Paso a paso



1.6.3 Tipos de receptores en la membrana postsináptica

- Inotrópicos
- Metabotrópicos

Receptor ionotrópico

Su apertura y cierre ocurre **rápidamente**.

Actúa a través de canales iónicos, los cuales son de dos tipos:

Canales catiónicos

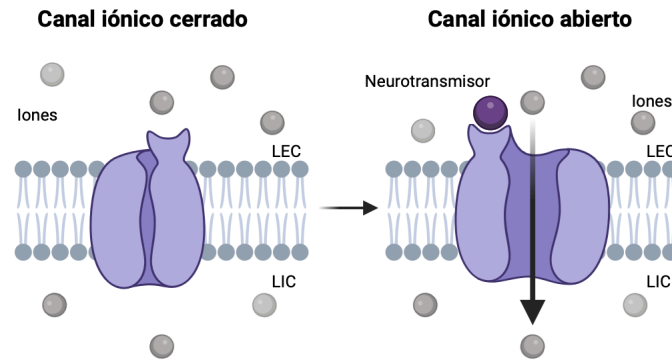
Permiten el paso de Na^+ , K^+ , Ca^{2+}

Desencadenan una respuesta excitatoria

Canales aniónicos

Permiten el paso de Cl^- u otros aniones pequeños.

Desencadenan una respuesta inhibitoria.

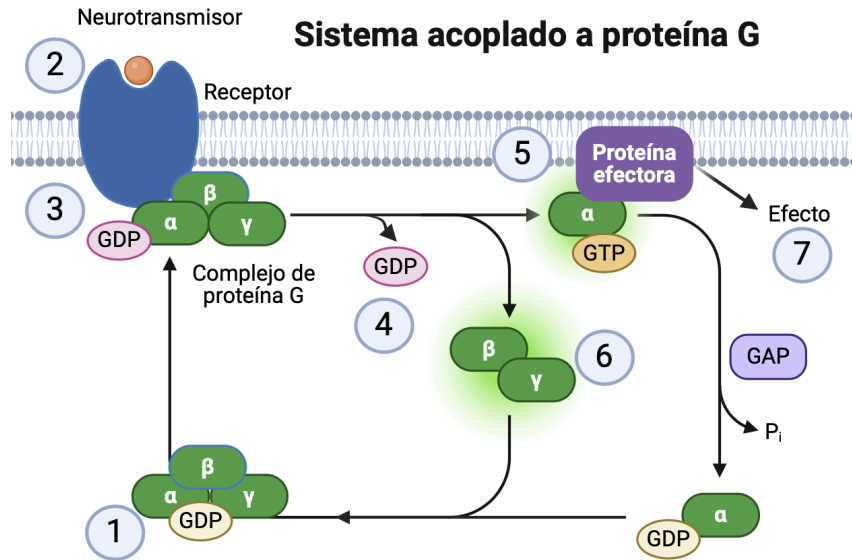


Receptor metabotrópico

Su inicio es rápido y el **efecto puede ser prolongado**.

actúa a través de segundos mensajeros, la más utilizada es la proteína G.

1. En reposo, el complejo de proteínas G (Porción alfa, beta y gamma) está unido al GDP y se encuentra inactivo.
2. Cuando el receptor se activa por un neurotransmisor, se deja expuesto el sitio de unión del receptor al complejo de proteínas G .
3. El complejo viaja a través del citoplasma y se une al sitio de unión del receptor previamente activado.
4. Se libera el GDP
5. Se une GTP a la porción alfa.
6. Se desprende la porción B y Gamma.
7. La porción alfa unida al GTP puede producir cualquiera de los siguientes cambios:
 - a. Apertura de canales iónicos
 - b. Activación del AMPc o GMPc
 - c. Activación de alguna enzima intracelular
 - d. Activación de la transcripción génica



Cada impulso puede tener diferentes formas de transmitirse a través de las neuronas, a lo cual llamamos funciones sinápticas:

1. Ser bloqueado
2. Generar una cadena de impulsos
3. Integrarse con otros impulsos

1.6.4 Potenciales postsinápticos excitatorios e inhibitorios.

Hay que recordar que existen diferencias en la concentración de iones a ambos lados de la membrana de un soma neuronal.

- La concentración de Na^+ y cloruro es mayor en el espacio extracelular y baja en el interior de la célula
- La concentración de K^+ es mayor en el interior de la célula y baja en el espacio extracelular.

El interior de un soma neuronal contiene una solución electrolítica altamente conductora y su diámetro es muy grande, por lo que casi no genera resistencia, por lo que cualquier cambio en el potencial de alguna zona del líquido, se propagará rápidamente hacia todo el soma neuronal.

Efectos de la excitación sináptica

Un transmisor debe actuar sobre el soma neuronal ocasionando la entrada de iones sodio a la neurona, haciendo que su potencial de acción cambie de -65 mV hasta -45 mV. A este **ascenso positivo** en el voltaje por arriba del potencial en reposo, se le llama **potencial postsináptico excitatorio (PPSE)**.

Cuando el PPSE continúa haciéndose menos negativo, se pone en marcha un potencial de acción en la neurona, pero es importante mencionar que el potencial

empezará en el **segmento inicial del axón** neuronal que es la región que contiene una **mayor cantidad de canales de sodio** dependientes de voltaje y dará inicio cuando la región alcance entre +10 mV y +20 mV, a diferencia del soma que contiene una menor cantidad de canales de sodio.

El potencial de acción generado, viajará a través del axón y de forma retrógrada hacia el soma neuronal.

Es importante mencionar que la excitación de un solo terminal presináptico sobre la superficie de una neurona, casi nunca activa a esa célula, se necesita la **suma de varios potenciales** mediante la activación de múltiples terminales presinápticos, a esto se le denomina **sumación espacial**.

Además, cada que ocurre un potencial de acción postsináptico, este dura aproximadamente 15 ms, por lo que durante este tiempo pueden estar ocurriendo más sinapsis excitatorias, y con esto lograr una **sumación a través del tiempo**, por lo que este fenómeno es llamado **sumación temporal**.

Efectos de la inhibición sináptica

Las sinapsis inhibitorias en su mayoría, abren canales de cloruro, lo que vuelve más negativo el potencial de membrana interna, **acercándose a -70 mV**.

También ocurre una salida de iones potasio, lo que hará que el interior se haga aún más negativo. A este **aumento de la negatividad** se le denomina **potencial postsináptico inhibitorio (PPSI)**.

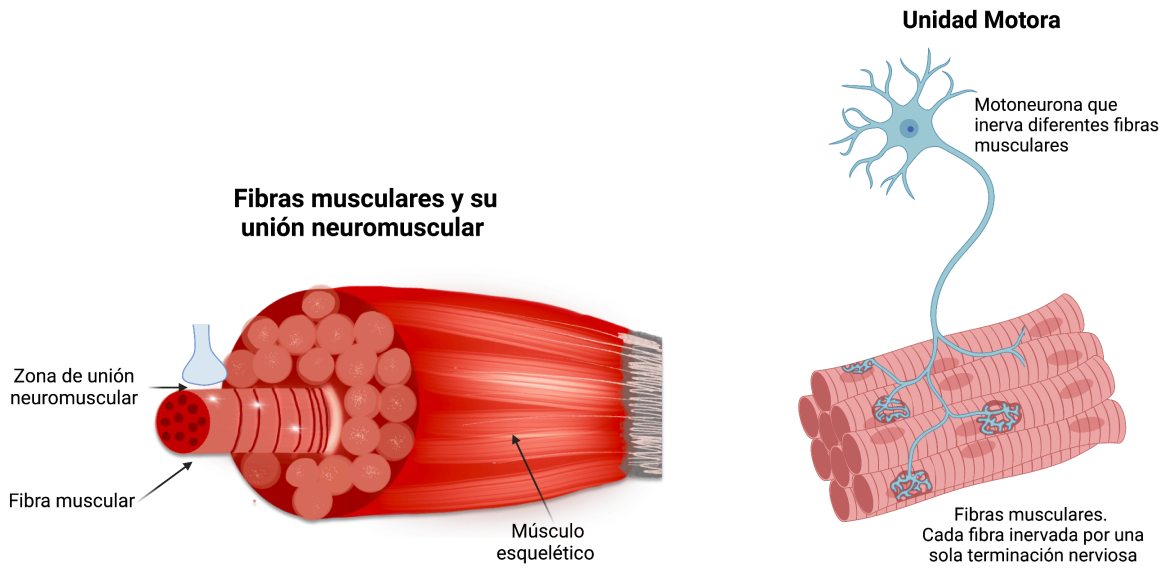
1.7 Contracción del músculo esquelético

Basados en porcentaje, el músculo esquelético es el que se encuentra mayoritariamente en el cuerpo, seguido por el liso y cardiaco.

1.7.1 Anatomía del músculo esquelético

Cada músculo esquelético está conformado por numerosas **fibras musculares** que se extienden en toda la longitud del músculo y cada una de ellas está inervada por una sola **terminación nerviosa** (unión neuromuscular) proveniente de una unidad motora.

La definición de unidad motora es una neurona motora somática que inerva a un grupo de fibras musculares.



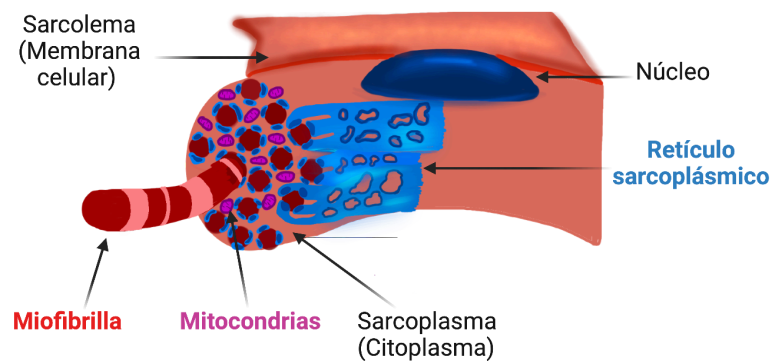
Tipos de fibras musculares

Característica	Oxidativas de contracción lenta Músculo rojo Tipo I	Oxidativo-glucolíticas de contracción rápida Músculo rojo Tipo IIA	Glucolíticas de contracción rápida Músculo blanco Tipo IIB/IIX
Velocidad de desarrollo de tensión máxima	Lentas	Intermedias	Rápidas
Actividad de miosina ATPasa	Lenta	Rápida	Rápida
Diámetro	Pequeño	Medio	Grande
Duración de contracción	Larga	Corta	Corta
Resistencia	Resistente a fatiga	Resistente a fatiga	Fatigable fácilmente
Uso	Postura	Estar de pie, caminar	Saltar, movimientos rápidos o finos
Densidad de capilares	Alta	Media	Baja

sanguíneos			
Mitocondrias	Numerosas	Moderadas	Escasas
Color	Rojo oscuro (mioglobina)	Rojo	Pálido

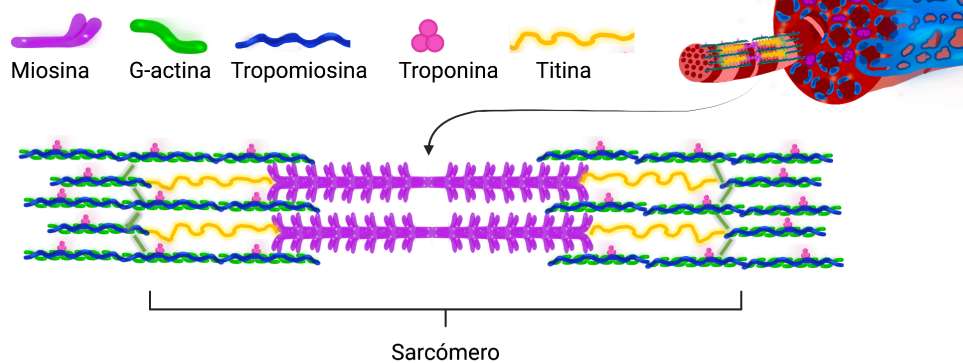
A su vez, cada fibra muscular está conformada por **miofibrillas** y otros elementos como su sarcoplasma, sarcolema, núcleo, mitocondrias y retículo sarcoplásmico.

Componentes de una fibra muscular



Cada miofibrilla está formada por **filamentos gruesos** de miosina y **filamentos delgados** de G-actina, tropomiosina y troponina y proteínas como la titina.

Filamentos de las miofibrillas



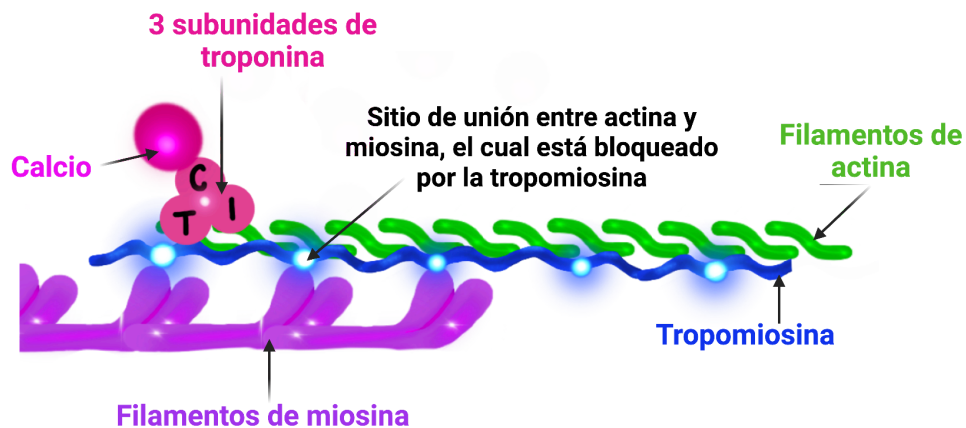
1.7.2 Funciones de los filamentos en la miofibrilla

La miosina tiene un sitio de unión a actina y adicionalmente, su **cabeza** funciona como **enzima de adenosina trifosfatasa (ATPasa)**. En reposo, los filamentos de tropomiosina cubren los sitios de unión entre actina y miosina.

La troponina está unida a la actina y tropomiosina y se compone de 3 subunidades:

- Troponina I: unión actina
- Troponina T: Tropomiosina
- Troponina C: calcio

Interacción entre los filamentos del músculo esquelético

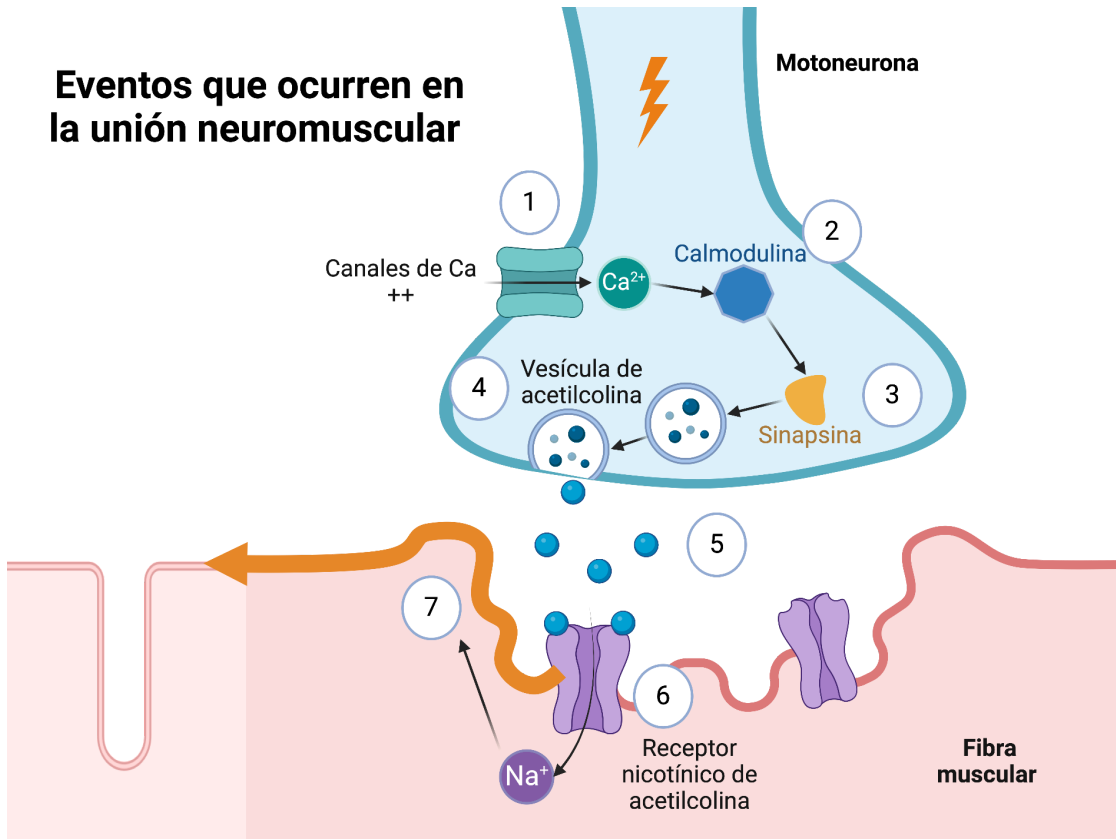


1.7.3 Contracción muscular

Potencial de acción de membrana de motoneurona somática

1. Se genera un **potencial de acción** a nivel de la motoneurona y genera la apertura de **canales de Ca^{2+}** .
2. El calcio entra en la motoneurona y activa a la calmodulina.
3. La calmodulina activa a las sinapsinas.
4. Las sinapsinas promueven que las vesículas de acetilcolina se dirijan y fusionen con la membrana presináptica.
5. Se da la **exocitosis de acetilcolina** hacia la hendidura sináptica.
6. Dos moléculas de acetilcolina se unen a su receptor en el sarcolema de la fibra muscular y activan canales de sodio activados por voltaje en la fibra muscular.
7. Comienza la despolarización de la fibra muscular y se genera el **"potencial de la placa terminal"**.

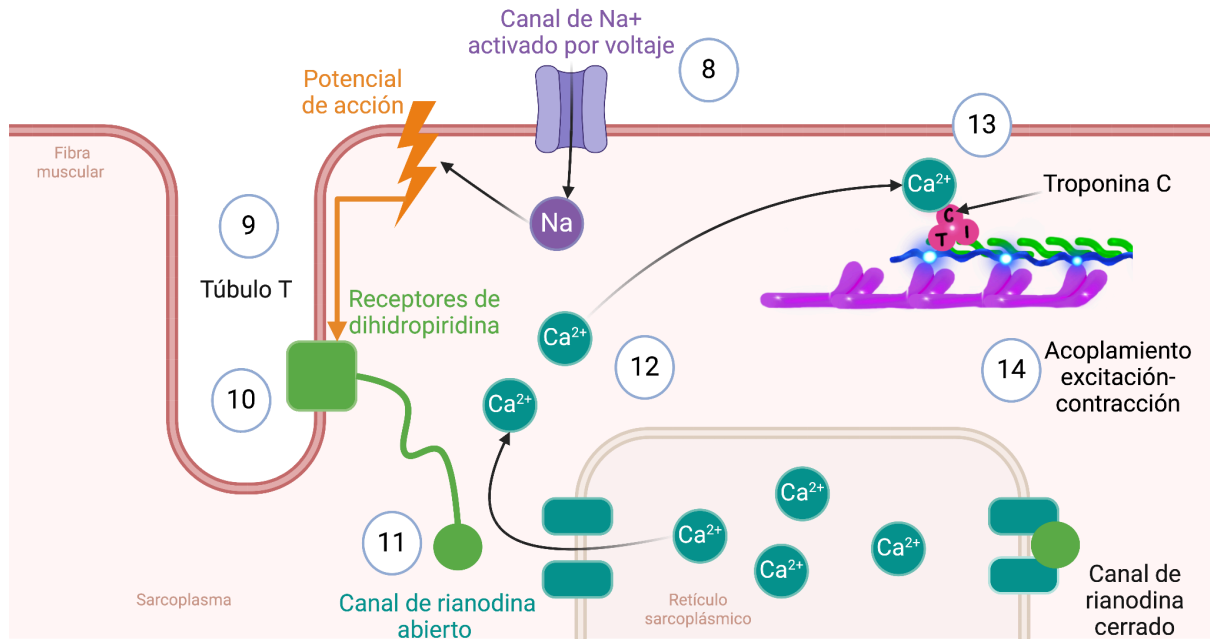
Eventos que ocurren en la unión neuromuscular



Potencial de acción de fibra muscular

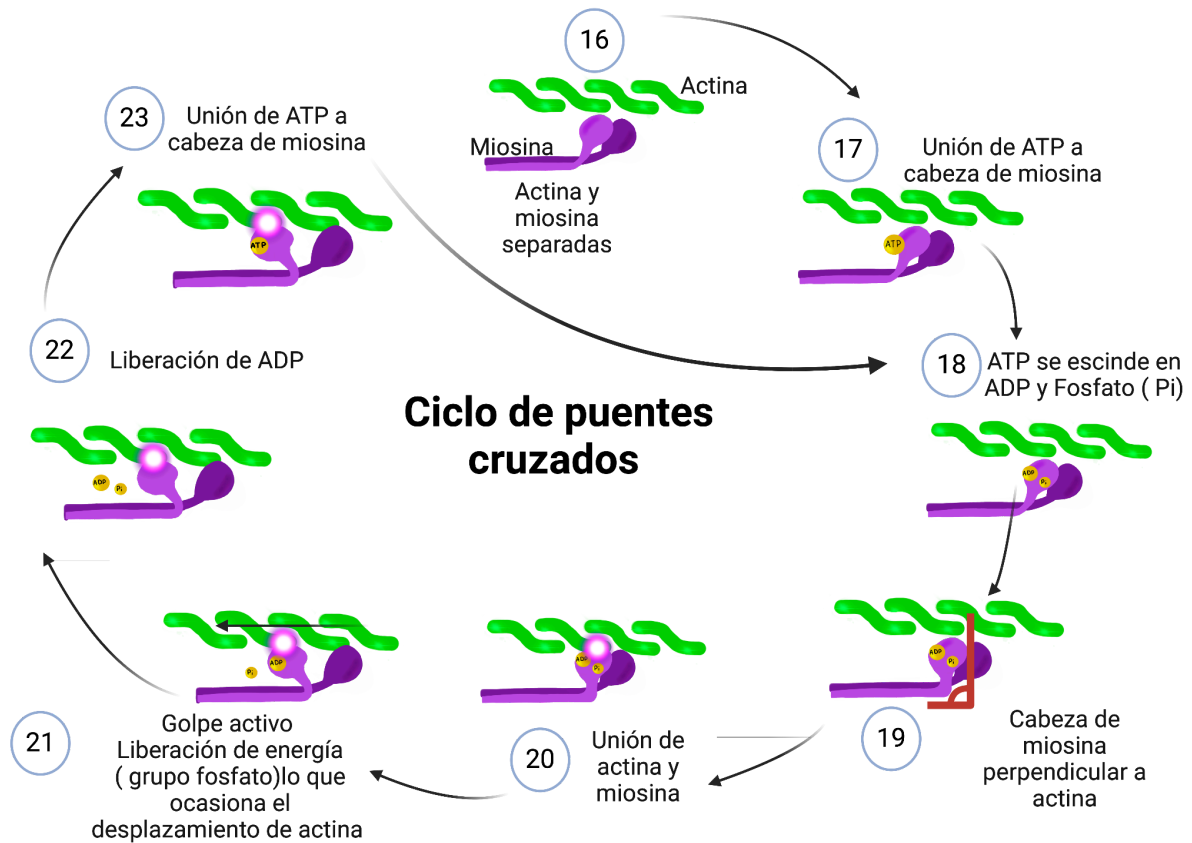
8. Conforme el potencial de la placa terminal se hace menos negativo, se activan más **canales de sodio activados por voltaje** hasta que se supera el umbral y se genera un potencial de acción que se propaga por toda la fibra muscular.
9. Los **túbulos T** tienen un papel importante ya que propagan el potencial de acción hacia la profundidad de la fibra muscular.
10. El cambio de voltaje en la membrana en los túbulos T es captado por **receptores de dihidropiridina**.
11. Los receptores de dihidropiridina están ligados a canales de liberación de calcio en el retículo sarcoplásmico (**canales de rianodina**) los cuales se abren.
12. Se da la liberación de calcio desde el retículo sarcoplásmico hacia el sarcoplasma.
13. Parte del **calcio liberado se une a la troponina en su subunidad C**.
14. En este momento debe iniciar un acoplamiento entre estos fenómenos de excitación y los próximos fenómenos de contracción (acoplamiento excitación-contracción).

Potencial de acción y eventos en la fibra muscular



Contracción (Ciclo de puentes cruzados)

15. La troponina sufre un cambio conformacional y “arrastra” consigo a la tropomiosina. Hay que recordar que en reposo, los filamentos de tropomiosina cubren los sitios de unión entre actina y miosina.
16. Cuando la troponina la arrastra **los sitios de unión entre actina y miosina quedan libres**.
17. Las cabezas de los puentes cruzados de miosina (ATPasa) se unen al ATP proveniente de las mitocondrias.
18. El ATP que se unió, se escinde y forma ADP y un fosfato.
19. La cabeza de miosina se coloca perpendicular a la actina.
20. Gracias al cambio de posición de la miosina, esta **se une a la actina**.
21. Inmediatamente que se da la unión la cabeza de miosina libera un grupo fosfato y genera un “**golpe activo**” que consiste en desplazar a la actina utilizando la energía al liberar al fosfato.
22. Una vez que termina el golpe activo, se libera el ADP.
23. Se une una nueva molécula de ATP y esto regresa a la miosina a su posición original.
24. **Se separa la miosina de actina que se desplazó** y avanza hacia el siguiente filamento más cercano (Se repite paso número 18).



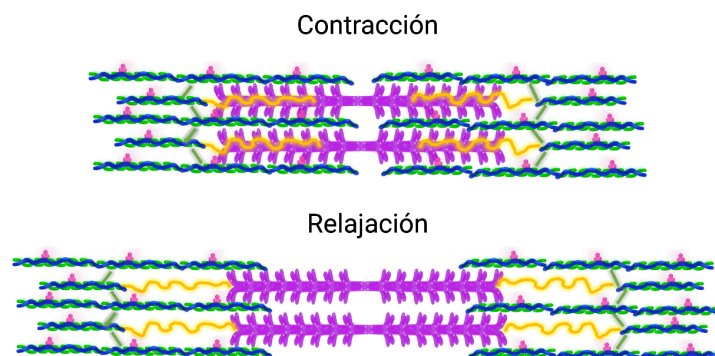
Esta secuencia de **unión-golpe activo** es lo que favorece que los filamentos delgados se deslicen sobre los filamentos gruesos y con esto se genere una contracción en el sarcómero.

Relajación

25. Cuando cesa el potencial de acción en la motoneurona, se detiene la liberación de acetilcolina en la hendidura sináptica.
26. La acetilcolina presente es degradada rápidamente por la enzima acetilcolinesterasa, y sus productos son recaptados para resintetizar nueva acetilcolina.
27. Al dejar de estimularse los receptores nicotínicos, los canales de sodio de la fibra muscular se cierran y la membrana comienza a repolarizarse.
28. La repolarización cierra los canales de liberación de calcio (canales de rianodina) en el retículo sarcoplásmico.
29. Las bombas de calcio dependientes de ATP (SERCA) en el retículo sarcoplásmico reintroducen activamente el calcio al retículo, disminuyendo su concentración en el sarcoplasma.
30. Al disminuir el calcio libre en el sarcoplasma, éste se disocia de la troponina C.

31. La troponina regresa a su conformación original y arrastra de nuevo a la tropomiosina, que vuelve a cubrir los sitios de unión de la actina para la miosina.
32. Al quedar bloqueados estos sitios, cesa el ciclo de puentes cruzados y la contracción se detiene.
33. Finalmente, el músculo retorna a su longitud de reposo, en parte por la elasticidad de los tejidos y por la acción de fuerzas externas.

Comparación entre relajación y contracción a nivel del sarcómero



1.7.4 Sumación

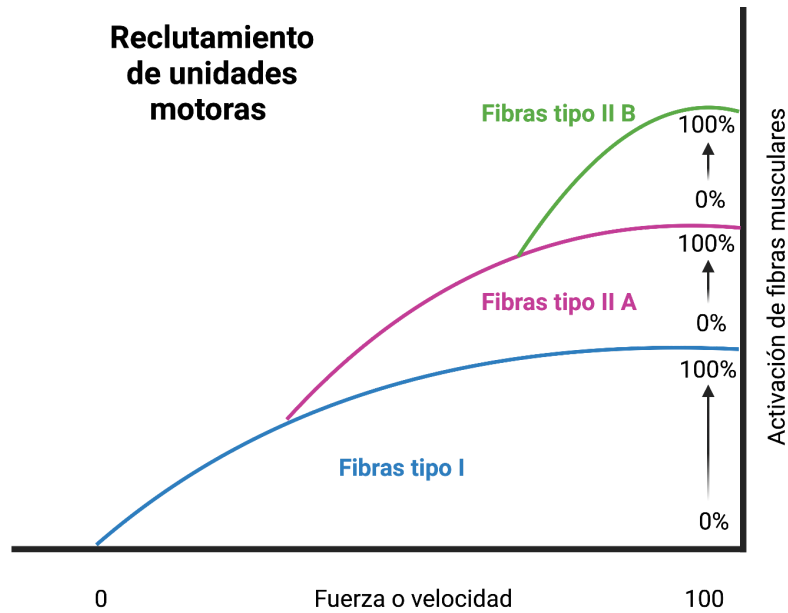
El concepto de sumación hace referencia a la adición de espasmos individuales para aumentar la intensidad de la contracción muscular global.

Se puede generar a través de dos procesos:

- A. **Sumación de fibras múltiples:** Aumentando el número de unidades motoras que se contraen de manera simultánea
- B. **Sumación de frecuencia :** Aumentando la frecuencia de contracción.

Sumación de fibras múltiples

La Ley de Henneman establece que dado que el tamaño de las motoneuronas determina su umbral de excitación, durante la aplicación de una **fuerza muscular** las unidades motoras de **menor tamaño serán las primeras en reclutarse**, y en la medida en que el esfuerzo lo requiera, se irán reclutando más unidades motoras en un patrón estereotipado según su progresivo tamaño.



Sumación de frecuencia

A medida que **aumenta la frecuencia**, se llega a un punto en el que cada nueva contracción se produce antes de que haya finalizado la anterior. En consecuencia, **la segunda contracción se suma parcialmente a la primera**, resultando en una fuerza total de contracción que va aumentando progresivamente.

Se puede alcanzar un nivel crítico en el que todas las contracciones comienzan a suceder con muy poco tiempo de intervalo y se llegan a fusionar entre sí y la contracción parece ser continua, proceso al cual se le llama **tetanicación**.

1.7.5 Fatiga

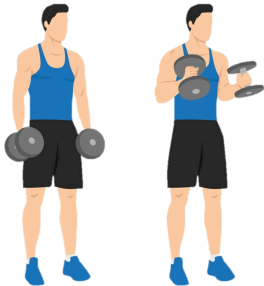
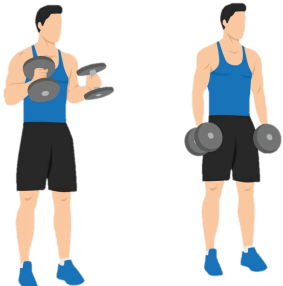
Después de un tiempo de contracción sostenida e intensa, se puede generar fatiga muscular. Se considera una **condición reversible** y se define como la incapacidad para seguir generando un nivel de fuerza o una intensidad de ejercicio.

La fatiga aumenta entre mayor sea la **velocidad de depleción de glucógeno**.

- Factores: Intensidad, duración de la actividad, ejercicio aerobio o anaerobio, nivel de aptitud física.

1.7.6 Contracción isotónica, de alargamiento e isométrica

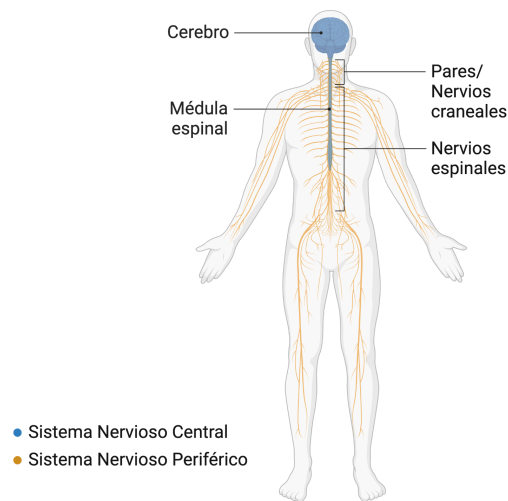
Tipo de contracción	Característica	Ejemplo
---------------------	----------------	---------

Isotónica (Concéntrica)	Crea fuerza y mueve una carga.	
De alargamiento (Excéntrica)	Crea fuerza y mueve una carga en sentido de estiramiento. Es la fase que genera mayor parte del daño celular.	
Isométrica	Genera fuerza pero no mueve carga	

2.1. Principios generales del sistema nervioso

El sistema nervioso está conformado por tejidos sumamente complejos encargados de **recibir, analizar, generar, transmitir y almacenar** información proveniente tanto del interior del organismo como fuera del mismo. Se encarga de funciones vitales como la respiración, alimentación, sueño, digestión, etc. Aunque también da origen a funciones tan complejas y abstractas como el pensamiento, la memoria y el razonamiento.

Organización Anatómica del Sistema Nervioso



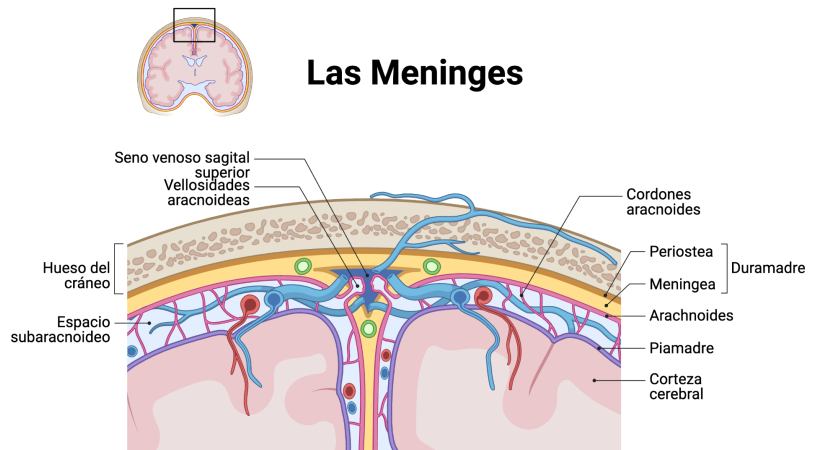
2.1.1.A Organización anatómica del sistema nervioso y diferencias entre el sistema nervioso central y periférico

De forma general, el sistema nervioso se puede dividir en 2 partes principales:

SUBDIVISIÓN	COMPONENTES	PARTICULARIDADES
Sistema Nervioso CENTRAL (SNC)	→ Encéfalo (cerebro, cerebelo, tronco encefálico). Delimitado por la cavidad craneana. → Médula espinal. Ubicada dentro del conducto vertebral.	● Fibras mielinizadas por oligodendrocitos ● Los axones no se pueden regenerar ● Recubierto por meninges (duramadre, aracnoides y piamadre)
Sistema Nervioso PERIFÉRICO (SNP)	→ Nervios craneales, espinales y periféricos (aferentes y eferentes), → Receptores sensoriales → Ganglios.	● Fibras mielinizadas por células de Schwann ● Los axones pueden regenerarse ● Ganglio: conjunto de somas neuronales ubicados fuera del SNC.

2.1.1.B Meninges (tejido conjuntivo del sistema nervioso central)

El sistema nervioso **central** está recubierto por tejido conjuntivo, las **meninges**, que le brindan protección. Son 3 de ellas y se agrupan de acuerdo a su grosor en **paquimeninge (duramadre)** y **leptomeninges (aracnoides y piamadre)**. Éstas últimas dos derivan de una capa simple de mesénquima de cuya hoja visceral corresponde a la piamadre y la parietal a la aracnoides, este origen común se evidencia al observar la gran cantidad de tejido que discurre entre ellas.



Duramadre

- *Lat. dura mater* = dura madre
- La capa más **externa** y la más **gruesa**.
- En contacto hacia la superficie externa con el periostio del cráneo.
- **Senos venosos (durales)**: espacios dentro de la duramadre revestidos por endotelio que actúan como conductos para la sangre desde las venas cerebrales hacia las venas yugulares internas.

Aracnoides

- *Gr. aracnoides* = parecido a telaraña
- La capa **intermedia**.
- **Cordones aracnoides**: son hebras de tejido conjuntivo laxo que se extienden desde la duramadre hasta la aracnoides. El espacio que cruzan estos cordones es el **espacio subaracnoideo** y contiene **líquido cerebrospinal**.

Piamadre

- *Lat. pia mater* = tierna madre
- La capa más **interna** y la más **delgada**.
- Está en contacto directo con la superficie del encéfalo y la médula espinal.
- Continúa con la vaina del tejido perivascular de los vasos sanguíneos encefálicos y medulares.

2.1.2 Organización funcional del sistema nervioso

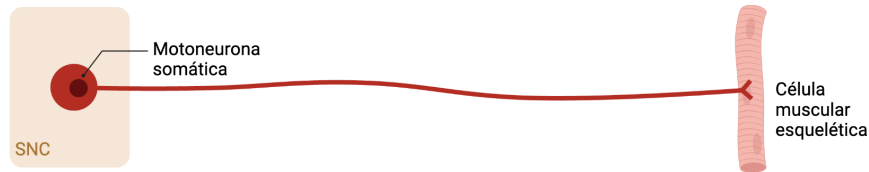
Sistema Nervioso SOMÁTICO/VOLUNTARIO (SNS)

Se encarga del control de funciones que son **voluntarias/conscientes**

- Inervación sensitiva y motora a todo el cuerpo excepto vísceras, músculo liso/cardíaco y glándulas

Organización del Sistema Nervioso Somático y el Sistema Nervioso Autónomo

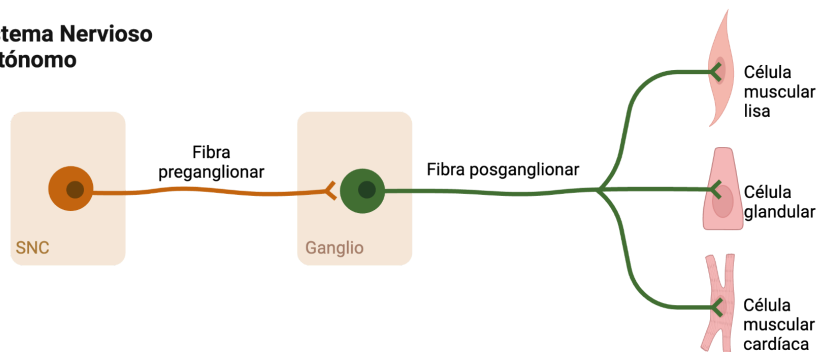
Sistema Motor Somático



Sistema Nervioso AUTÓNOMO (SNA)

Controla las funciones **independientes del SNP y SNC**. Inervación motora al músculo liso, sistema de conducción cardíaca y glándulas; inervación sensitiva desde las vísceras.

Sistema Nervioso Autónomo



Se subdivide en 2:

SNA Simpático

- Toracolumbar

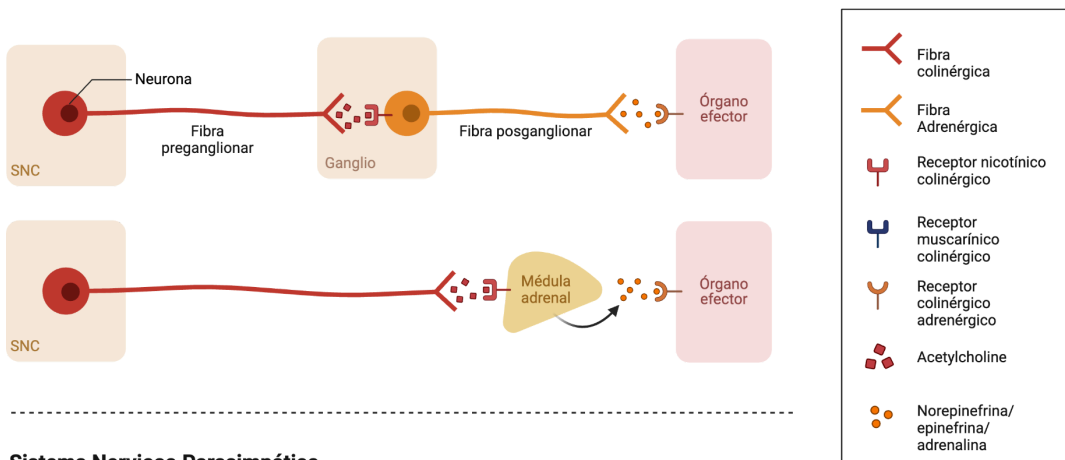
SNA Parasimpático

- Craneosacro

- Conexión con ganglios para- y prevertebrales
- Funciones asociadas con el estrés o "supervivencia".
- Nervios craneales III, VII, IX y X
- Ganglios viscerales/terminales
- Funciones asociadas con la "relajación".

Organización del Sistema Nervioso Simpático y Parasimpático

Sistema Nervioso Simpático



Sistema Nervioso Parasimpático



También se considera actualmente una tercera rama del sistema nervioso autónomo correspondiente al **SN entérico**, el cual inerva al tubo digestivo y, por medio de fibras simpáticas y parasimpáticas, se comunica con el SNC.

2.1.3 Tipos de células y su función en el sistema nervioso

El sistema nervioso, así como otros, está compuesto principalmente por **células, tejido conjuntivo y vasos sanguíneos**. Las células se agrupan **2 principales tipos**:

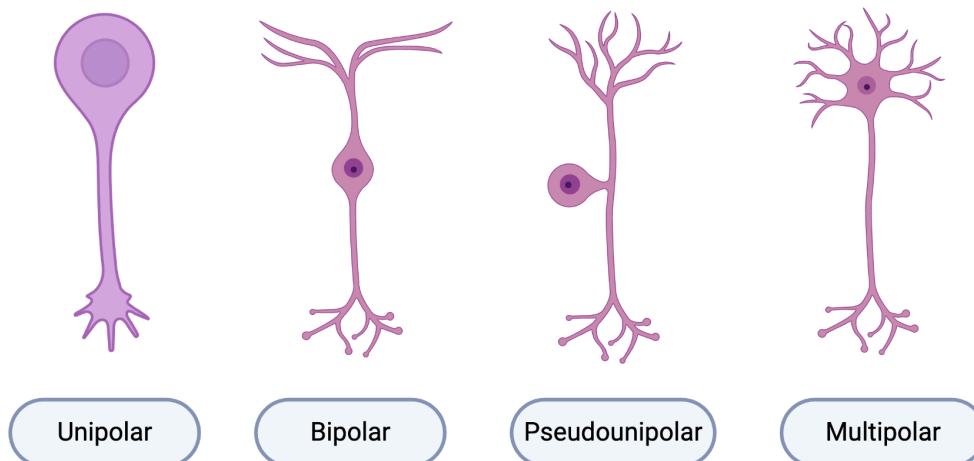
- **Neuronas:** células nerviosas *per se*. Si bien su estructura varía de acuerdo a la localización dentro del sistema nervioso, su función se mantiene en la transmisión de la actividad eléctrica y la liberación de neurotransmisores.
 - El cerebro contiene al menos 10^{11} neuronas.

- **Neuroglia (glía):** células de soporte que dan apoyo metabólico y físico a las neuronas. Mantienen el medio interno del sistema nervioso favoreciendo su funcionamiento.
 - A veces también llamado “*pegamento nervioso*” por la etimología griega (*glía*, “pegamento”)
 - Por cada neurona hay de 10-50 células de neuroglía

Clasificación del tipo de neuronas

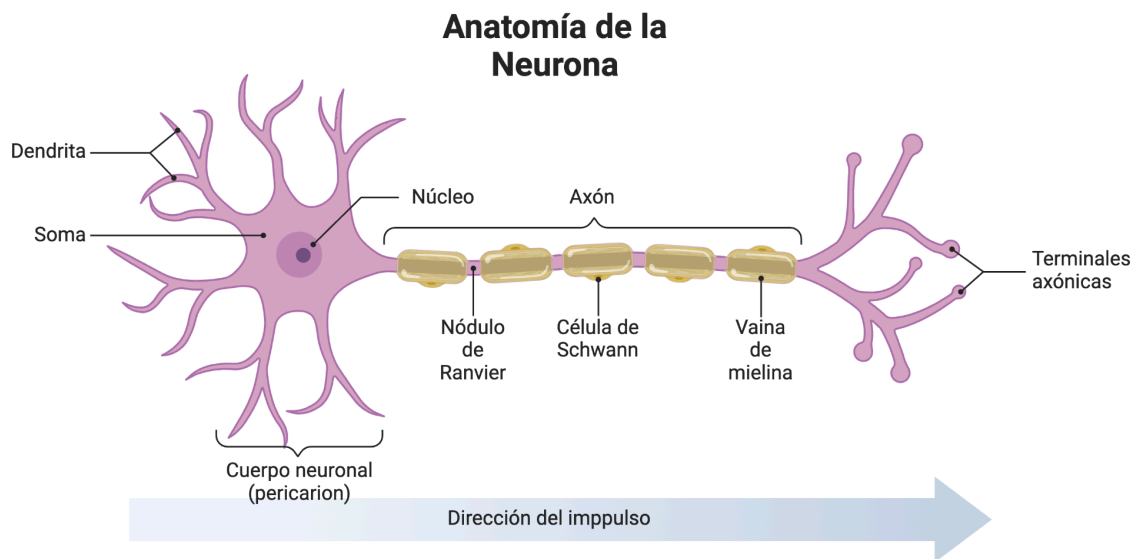
- **De acuerdo a sus prolongaciones dendríticas:**
 - **Unipolar:** una sola proyección del cuerpo neuronal.
 - **Pseudounipolar:** una sola proyección axónica en forma de T.
 - **Bipolar:** cuenta con dos proyecciones, una dendrita y un axón en polos opuestos.
 - **Multipolar:** la más abundante del sistema nervioso, cuenta con dos ramas dendríticas que se ramifican, así como un axón.
- **De acuerdo a su función**
 - **Aferente (sensitiva):** reciben estímulos sensitivos y los conducen hacia el SNC. Pueden ser somáticas (sensaciones de la superficie corporal y órganos como músculos) o viscerales (sensaciones de mucosas, glándulas y vasos sanguíneos).
 - **Eferente (motora):** se originan del SNC y conducen los impulsos hacia sitios efectores. Pueden ser somáticas (inervación de músculos) o viscerales (inervación glandular).
 - **Interneurona (internuncial):** son aquellas que sirven como puente o sitios de integración en circuitos neuronales.

TIPOS DE NEURONAS (Clasificación anatómica)



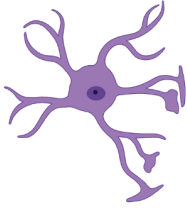
Componentes de la neurona

1. **Dendritas:** procesos cortos que se extienden del cuerpo neuronal y se encargan de ser las principales áreas de recepción de información de los axones de otras neuronas. Son áreas con una gran cantidad de receptores cuya función es captar y responder a los neurotransmisores liberados en la hendidura sináptica.
2. **Cuerpo (pericarion):** porción celular que rodea el núcleo y contiene los organelos de la célula como el retículo endoplásmico y el complejo de Golgi, etc.
3. **Axón:** prolongación de la neurona encargada de transmitir potenciales de acción a las dendritas de otras neuronas con quien hace sinapsis. En algunos casos cuenta con una vaina de aislante eléctrico llamado mielina creado por células gliales, esto permite que la transmisión de la información sea más rápida (saltatoria entre segmentos de mielina).



Clasificación de células de la neuroglía

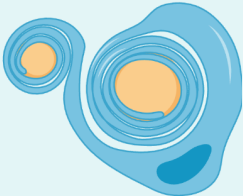
Célula	Características
Astrocitos	• Características celulares ○ De forma estrellada (gr. <i>astro</i>, "estrella").



Astrocito

- Células más grandes de la neuroglía con numerosas prolongaciones citoplasmáticas de longitud y grosor variable.
- Existen 2 tipos:
 - **Astrocitos fibrosos:** se asocian con fibras de la sustancia blanca con pocas prolongaciones largas, finas y rectas.
 - **Astrocitos protoplasmáticos:** asociadas con la sustancia gris, presentan núcleo ovalado con prolongaciones cortas, gruesas y ramificadas.
- **Funciones**
 - Regulación del metabolismo energético y equilibrio iónico del microambiente neuronal.
 - Brindan metabolitos a las neuronas para su funcionamiento.
 - Suministro de glucosa a las neuronas.
 - Eliminación de productos tóxicos, medicamentos o metabolismo de nutrientes.
 - Formación de la barrera hematoencefálica
 - Formación de tejido cicatrizal.
 - Sostén y guía de la migración de las células en la neurogénesis.

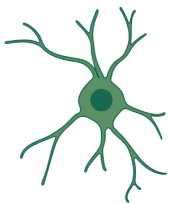
Células de Schwann



Célula de Schwann

- **Características celulares**
 - Núcleo alargado y aplanado con aparato de Golgi pequeño y con pocas mitocondrias.
 - Se enrolla alrededor del axón.
- **Funciones**
 - Mielinización de los axones del SNP (una célula de Schwann mieliniza una sola fibra axonal)

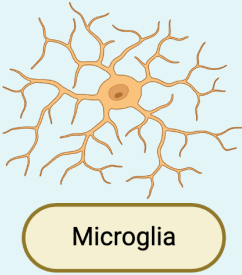
Oligodendrocito



Oligodendrocito

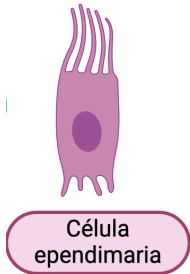
- **Características celulares**
 - Células de núcleo pequeño y esférico, con citoplasma con orgánulos abundantes
- **Hay 3 tipos:**
 - Oligodendrocitos satélite.
 - Oligodendrocitos interfasciculares.
 - Oligodendrocitos perivasculares.
- **Funciones**
 - Mielinización de los axones del SNC (un oligodendrocito mieliniza varias fibras axonales)

Microglia



- **Características celulares**
 - Células de pequeño tamaño de núcleo pequeño y alargado con prolongaciones ramificadas y largas. Escaso citoplasma.
- **Funciones**
 - **Macrófagos** del sistema nervioso, fagocitan y eliminan los desechos del microambiente. Tienen la capacidad de ser presentadores de antígeno, gracias a su complejo de histocompatibilidad clase II.

Células endimarias



- **Características celulares**
 - Epitelio cúbico o cilíndrico simple con cilio y microvellosidades. Citoplasma con abundantes mitocondrias.
 - Carecen de zonas de oclusión entre las células.
- **Funciones**
 - Producción y reabsorción del líquido cerebroespinal.

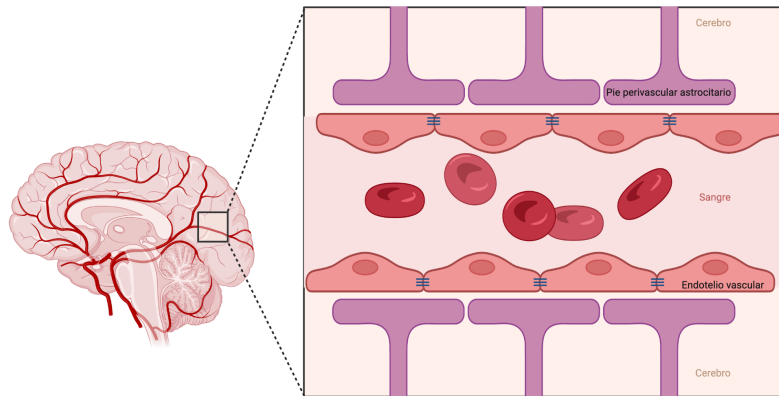
Células satélite

- **Características celulares**
 - Células cúbicas.
- **Funciones**
 - Sostén, rodean somas de neuronas pseudounipolares, ganglios raquídeos y simpáticos.

2.1.4 Líquido cefalorraquídeo/cerebroespinal y barrera hematoencefálica

La barrera hematoencefálica fue descrita por primera vez hace más de 100 años al observar que la inyección de colorantes vitales en el torrente sanguíneo teñían casi todos los órganos excepto el encéfalo. Se trata de un **medio de protección** del SNC pues mantiene el microambiente relativamente equilibrado en contraste con las fluctuaciones constantes de electrolitos, hormonas y metabolitos celulares de la circulación sistémica.

La Barrera Hematoencefálica



La barrera hematoencefálica se origina desde el desarrollo embrionario por medio de la interacción de los **astrocitos** con las **células endoteliales capilares**. Así pues, las uniones estrechas entre las células del endotelio de capilares tipo continuo, en asociación con los pies perivasculariales astrocíticos en la lámina basal endotelial, generan una barrera física hermética en contra de la difusión simple de solutos hacia el tejido nervioso.

Algunas reglas generales del pasaje de iones y sustancias a través del torrente sanguíneo son:

- Sustancias con peso molecular **>500 Da** no son capaces de atravesar.
- Gases como el **CO₂** y el **O₂** atraviesan de forma libre.
- Moléculas **liposolubles** (etanol, hormonas esteroideas, etc.) cruzan sin restricciones.
- El equilibrio de potasio (**K⁺**) es altamente regulado tanto por los **astrocitos** como por las **células endoteliales**.
- Sustancias como la **glucosa**, los **aminoácidos**, **nucleósidos** y **vitaminas** requieren de transporte activo (dependiente de proteínas).
- El **agua** puede atravesar gracias a las **acuaporinas tipo IV (AQP4)** que se encuentran en los pies perivasculariales astrocitarios.
- Ciertos metabolitos como la **dopamina**, si bien existen dentro del encéfalo, **no pueden pasar la barrera de forma libre**, solamente sus **precursores** (Levodopa).

Asociación clínica

Por este último punto es que para el tratamiento de la Enfermedad de Parkinson (caracterizado por la deficiencia de dopamina) es que se administra su precursor (levodopa) y no la dopamina *per se*.

Órganos periventriculares ("ventanas del encéfalo"): estructuras **fuera** de la protección de la barrera hematoencefálica. Están en contacto con sustancias del

torrente sanguíneo. Importantes para la **regulación de la homeostasis del líquido** y para la **actividad neurosecretora**.

- Glándula pineal
- Eminencia media
- Órgano subfornical
- Área postrema
- Órgano subcomisural
- Órgano vascular de la lámina terminal
- Lóbulo posterior de la hipófisis.

2.2 Principios generales de la fisiología sensorial

La manera en la que percibimos el medio que nos rodea y cómo interactuamos con él depende de un gran y complejo sistema sensorial que se encarga de transformar los diversos estímulos (electromagnéticos, táctiles, químicos, dolorosos, etc.) en señales eléctricas que nuestras neuronas puedan transmitir al cerebro para ser procesadas.

2.2.1 Campo sensorial o receptivo

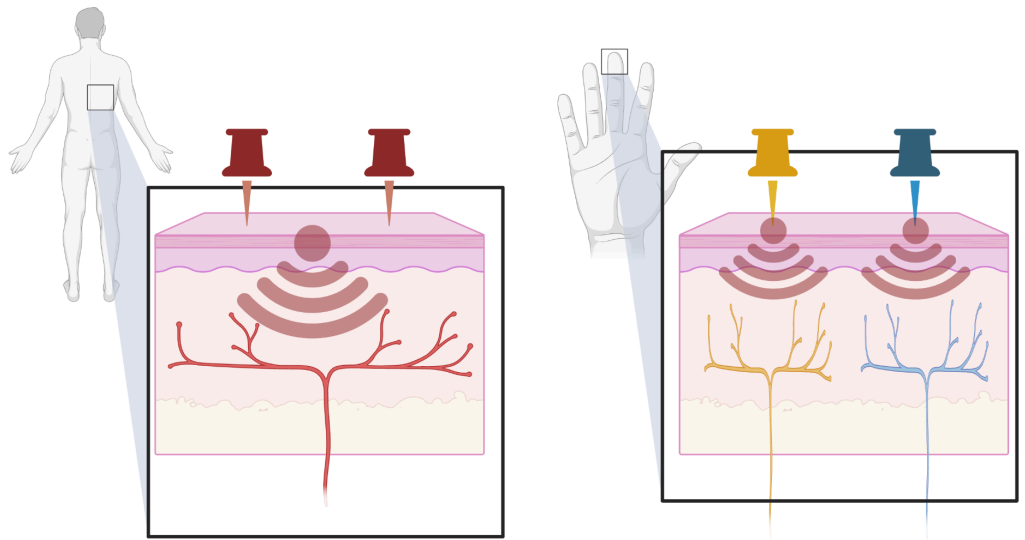
Hace referencia al **área espacial** en la que **un estímulo puede activar un receptor** sensorial o un conjunto de neuronas. A continuación algunos ejemplos:

- **Audición:** el campo receptivo de una neurona encargada de la audición hace referencia a la gama de frecuencias a la que responde mejor y transmite una señal al cerebro.
- **Piel:** las fibras nerviosas con terminaciones libres encargadas de transmitir el dolor son capaces de cubrir un área tan grande como 5 cm en diámetro en la espalda y en el dedo de la mano uno tan pequeño como de milímetros de diámetro. Mientras más pequeño sea el campo sensorial de una fibra nerviosa y mayor cantidad de fibras existan, más específica será la sensación (a la hora de diferenciar dos puntos en la piel, por ejemplo).

Cuentan también con **características específicas**:

- **Tamaño:** determina la “resolución/definición” con la que se puede sentir un estímulo. En general, mientras más cercanas sean a un órgano sensorial, tienden a tener las neuronas campos receptivos más pequeños.
- **Forma:** pueden ser diversas, desde circulares, cuadradas o incluso formas complejas.

- **Sensibilidad:** esta característica define que las neuronas sensitivas pueden responder de maneras diferentes a diversos estímulos, aunque siempre de manera más afín a uno que las caracteriza.
- **Jerarquía:** las neuronas con campos receptivos simples (responden a un solo estímulo) tienden a enviar información a aquellas con campos receptivos más complejos (respuesta a combinaciones de estímulos), lo que permite una reconstrucción más sofisticada del entorno en el cerebro.



Campo sensorial + grande =
menor definición sensitiva =
1 solo estímulo

Campo sensorial + pequeño
= mejor definición sensitiva
= 2 estímulos

2.2.2 Concepto del receptor sensorial

Se trata de una **célula especializada**, o un conjunto de células, que detecta y responde a estímulos específicos del entorno externo o interno del organismo.

Son fundamentales para la percepción sensorial, ya que convierten **(transducen)** diversas formas de energía de los estímulos en señales eléctricas que el sistema nervioso puede interpretar. Cada tipo de receptor sensorial está adaptado para detectar un tipo particular de estímulo, como luz, sonido, temperatura, presión, dolor, sustancias químicas, etc.

- **Transducción:** El receptor sensorial convierte la energía del estímulo en una señal eléctrica. Por ejemplo, cuando la luz incide en los fotorreceptores de la retina, estos convierten la energía luminosa en impulsos eléctricos.
- **Transmisión:** La señal eléctrica generada por el receptor sensorial se transmite a través de neuronas sensoriales al sistema nervioso central (SNC), generalmente a través de los nervios periféricos.

- **Procesamiento:** El SNC interpreta las señales eléctricas. Esto puede ocurrir a varios niveles, desde la médula espinal hasta la corteza cerebral, donde se produce la percepción consciente del estímulo.

2.2.3 Clasificación de los receptores sensoriales

Mecanorreceptores

Detectan compresión y estiramiento de los tejidos adyacentes.

- **Receptores táctiles de la dermis y epidermis**
 - Terminaciones libres nerviosas
 - Terminaciones expandidas
 - Discos de Merkel
 - Variantes
 - Corpúsculos de Ruffini
 - Terminaciones encapsuladas
 - Corpúsculos de Meissner
 - Corpúsculos de Kruse
 - Corpúsculos de Pacini
- **Sensibilidad profunda**
 - Terminaciones libres nerviosas
 - Terminaciones expandidas
 - Corpúsculos de Ruffini
- **Musculares**
 - Aparato tendinoso de Golgi
 - Husos musculares
- **Audición**
 - Receptores de la cóclea
- **Equilibrio**
 - Receptores vestibulares
- **Presión arterial**
 - Barorreceptores del seno carotídeo y aorta

Termorreceptores

Detectan cambios en la temperatura.

- **Frío**
 - Receptores de frío
- **Calor**
 - Receptores de calor

Nociceptores

Detectan daño físico o químico en los tejidos

- **Dolor**
 - Terminaciones nerviosas libres

Electromagnéticos

Detectan energía electromagnética (en el caso de la vista, la luz)

- **Vista**
 - Conos
 - Bastones

Quimiorreceptores

Detectan la composición química o concentración de ciertas sustancias

- **Gusto**
 - Papilas gustativas
- **Olfato**
 - Epitelio olfatorio
- **Oxígeno arterial**
 - Quimiorreceptores del cuerpo carotídeo y aórtico
- **Osmolalidad**
 - Neuronas cerca del núcleo supraóptico (productores de ADH)
- **CO₂ sérico**
 - Quimiorreceptores en los cuerpos carotídeos
- **Glucosa sérica, aminoácidos y ácidos grasos**
 - Receptores hipotalámicos

2.2.4 Especificidad de los receptores, estímulo adecuado

Cada receptor sensitivo tiene un estímulo **específico**, a esto se le llama **sensibilidad diferencial**. Esta característica le permite responder de forma sensible a los estímulos para los que fue diseñado y mantenerse sin actividad ante otros estímulos sensoriales. De igual manera, las fibras nerviosas que transmiten la información de cada receptor sensitivo son específicas al tipo de estímulo en el **principio de línea etiquetada** y llevan la información desde el sitio de estimulación hasta el área específica del cerebro donde se integra tal información.

2.2.5 Mecanismos de transducción, potencial generador y potencial de receptor

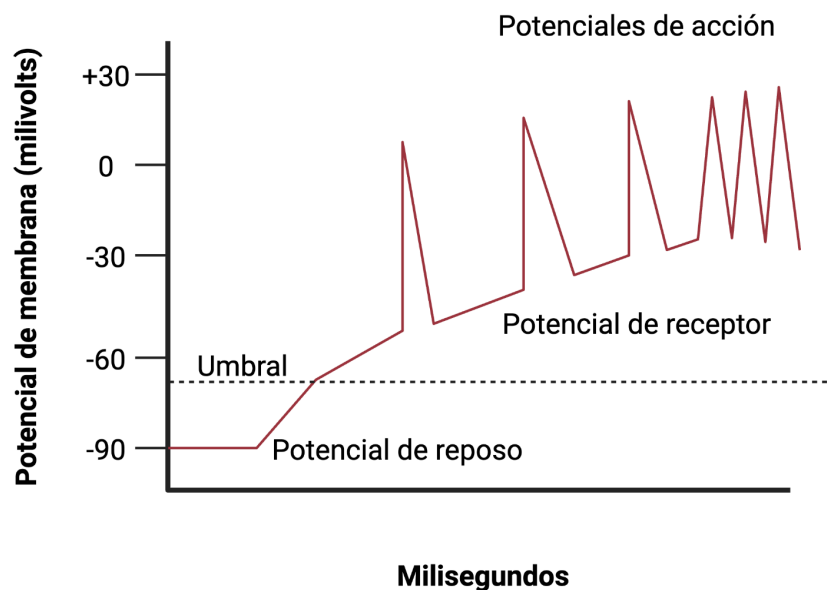
Potencial de receptor: hace referencia al cambio en el potencial de la membrana en un receptor sensorial en respuesta a un estímulo que lo excita. Existen diferentes mecanismos que pueden generar este potencial (**potencial generador**):

- **Deformación del receptor:** se estira la membrana celular lo que abre los canales iónicos.
- **Químicos:** la presencia de ciertos compuestos químicos abren los canales iónicos.

- **Cambios de temperatura:** altera la permeabilidad de la membrana celular, permitiendo la modificación de la concentración de iones.
- **Radiación electromagnética:** modifica las características de la membrana, permitiendo el ingreso de iones a través de canales específicos.

2.2.6 Relaciones estímulo-respuesta

- **Amplitud máxima de potencial de receptor:** la respuesta más intensa que puede generar un potencial de receptor es de aproximadamente 100 mV . Solamente ocurre en estímulos sensoriales excepcionales y de muy alta intensidad.
- **Potencial de receptor-acción:** cuando el cambio en la membrana generado por el potencial de receptor supera un cierto **umbral**, se dispara el potencial de acción que transmite la señal. Mientras más se eleva el potencial de receptor sobre el umbral, más frecuente serán los potenciales de acción (suma temporal) = mayor intensidad



- **Relación estímulo-respuesta:** si bien a medida que incrementa el potencial de receptor, los potenciales de acción se hacen más frecuentes, ante estímulos muy intensos se generan progresivamente menos potenciales de acción. Le permite al receptor ser muy sensible ante estímulos muy tenues y no alcanzar un tope hasta que el mismo estímulo es extremo.
- **Adaptación del receptor:** los receptores tienen la capacidad de adaptarse parcial o totalmente ante un estímulo constante, esto implica que en un principio responde con impulsos elevados y, progresivamente, va

disminuyendo su frecuencia de impulsos hasta que alcanza una frecuencia muy baja o incluso deja de producirlos.

2.2.7 Ley de Weber-Fechner

Se trata de un principio en la psicofísica que describe la **relación** entre la **magnitud de un estímulo físico** y la **intensidad percibida de ese estímulo**. Se basa en el trabajo de los psicólogos **Ernst Heinrich Weber** y **Gustav Theodor Fechner**, y consta de dos partes:

Ley de Weber

Establece que el cambio en un estímulo que se requiere para que una persona lo perciba es una fracción constante del estímulo original.

Fórmula Ley de Weber

$$\frac{\Delta I}{I} = k$$

Donde:

ΔI = es el incremento mínimo detectable en la intensidad del estímulo (umbral diferencial).

I =intensidad original del estímulo.

k =constante de Weber (depende del tipo de estímulo).

Por ejemplo

Si una persona sostiene un peso de 10 gramos, y la constante de Weber para el sentido del peso es 0.1, entonces se requiere añadir al menos 1 gramo para notar una diferencia.

Mientras más grande sea el estímulo inicial, mayor tendrá que ser el cambio para ser percibido.

Ley de Fechner

Amplía la Ley de Weber y propone una **relación logarítmica** entre la **magnitud** de un **estímulo físico** y la **intensidad percibida** de ese estímulo. Según Fechner, la percepción sensorial es proporcional al logaritmo de la intensidad del estímulo.

**Fórmula
Ley de Fechner**

$$S = k \log \frac{I}{I_0}$$

Donde:

S =magnitud percibida del estímulo.

I = intensidad del estímulo.

I_0 =intensidad umbral (nivel más bajo del estímulo que puede ser percibido).

k =constante.

Por ejemplo

Un cambio en la luminosidad de una pantalla en una habitación oscura es fácilmente detectable, mientras que el mismo cambio bajo la luz del sol puede pasar desapercibido.

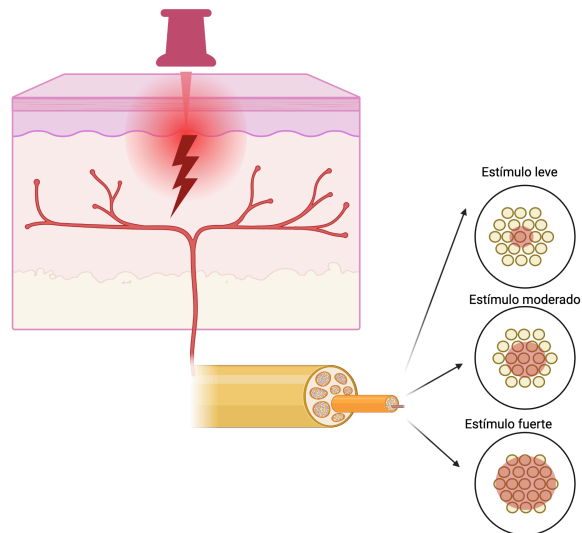
La percepción humana no es lineal sino logarítmica, de manera que a medida que el estímulo se hace más intenso, la percepción del incremento es cada vez menor.

2.2.8 Suma espacial y suma temporal

La forma en la que el cuerpo interpreta la **intensidad** de una señal depende de la cantidad de fibras que transmiten un estímulo (**sumación espacial**) o de la cantidad de potenciales de acción que se generan en una sola fibra (**sumación temporal**).

Suma espacial

La intensidad de una señal sensorial puede incrementarse a través de la activación de múltiples fibras nerviosas paralelas.

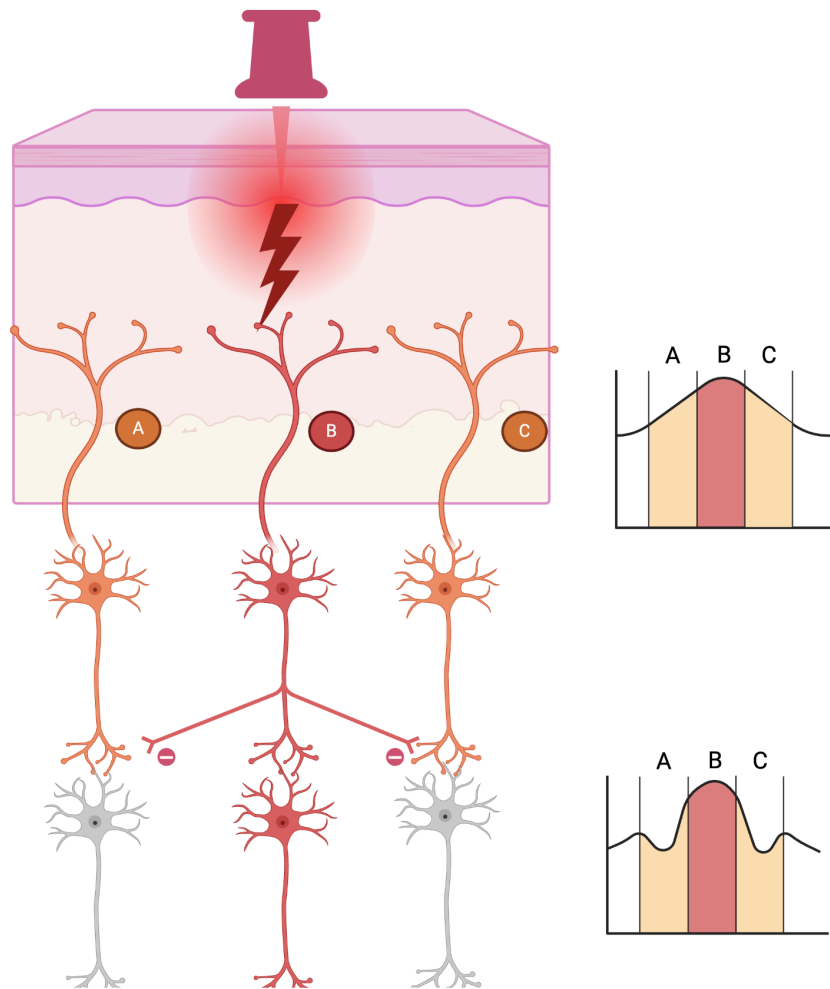


Suma temporal

La intensidad de una señal se incrementa a medida que se genera una mayor cantidad de impulsos nerviosos en la misma fibra.

2.2.9 Inhibición lateral

Hace referencia a la inhibición de neuronas menos activas adyacentes a la neurona más activa en un campo sensorial mediada por **interneuronas inhibitorias**. Se trata de una forma de **aumentar la resolución** de un estímulo para poderlo localizar y diferenciar. Así pues, un campo sensorial consiste de un centro excitador y una periferia inhibida, lo cual incrementa la precisión del estímulo.



2.2.10 Circuitos canónicos (Convergentes/divergentes, paralelos/en serie, de inhibición lateral, de retroalimentación)

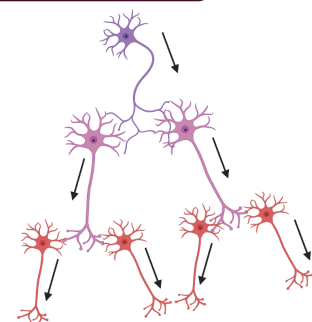
Un circuito canónico habla acerca de cómo un grupo de neuronas interactúan entre sí para cumplir funciones específicas al transmitir sus señales.

Circuitos divergentes

Una fibra nerviosa despolariza un número creciente de neuronas cada vez más alejadas del estímulo inicial.

- Permite la **amplificación de la señal**.

Circuito DIVERGENTE



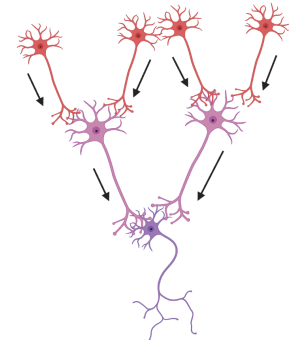
- La divergencia puede suceder a lo largo de solo una ruta individual, o también de varias rutas.

Circuitos convergentes

Opuesto al divergente. La neurona recibe impulsos desde varias neuronas presinápticas.

- Efecto **canalizador** o **concentrador de la señal**.
- El estímulo entrante puede converger desde una, o desde muchas áreas diferentes, y el resultado es una estimulación o inhibición.

Circuito CONVERGENTE

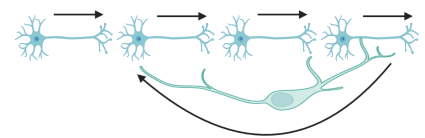


Circuitos de retroalimentación/oscilantes/reverberantes

La señal entrante viaja a lo largo de una cadena de neuronas en la que cada una de ellas hace sinapsis colaterales con neuronas en una parte previa de la cadena.

- Los impulsos se retroalimentan por lo que proporcionan una señal continua mientras ninguna de las neuronas de la cadena falle.
- Involucradas en el control de actividades rítmicas como la sucesión entre dormir y despertar, y la respiración, entre otras.
- Dependiendo del circuito, pueden oscilar segundos, horas, y hasta toda la vida (como en la respiración).

Circuito DE RETROALIMENTACIÓN

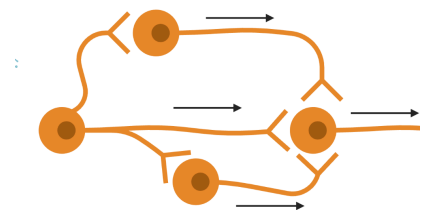


Circuito en paralelo

Una neurona estimula varias neuronas arregladas en paralelo, luego, todas en conjunto, estimulan una célula común de salida.

- Los impulsos llegan en diferentes instantes de tiempo, de modo que recibe una lluvia de impulsos.
- No hay retroalimentación. Una vez que todas las neuronas han actuado, la actividad del circuito cesa.

Circuito EN PARALELOS



2.3. Sistema Somatosensorial

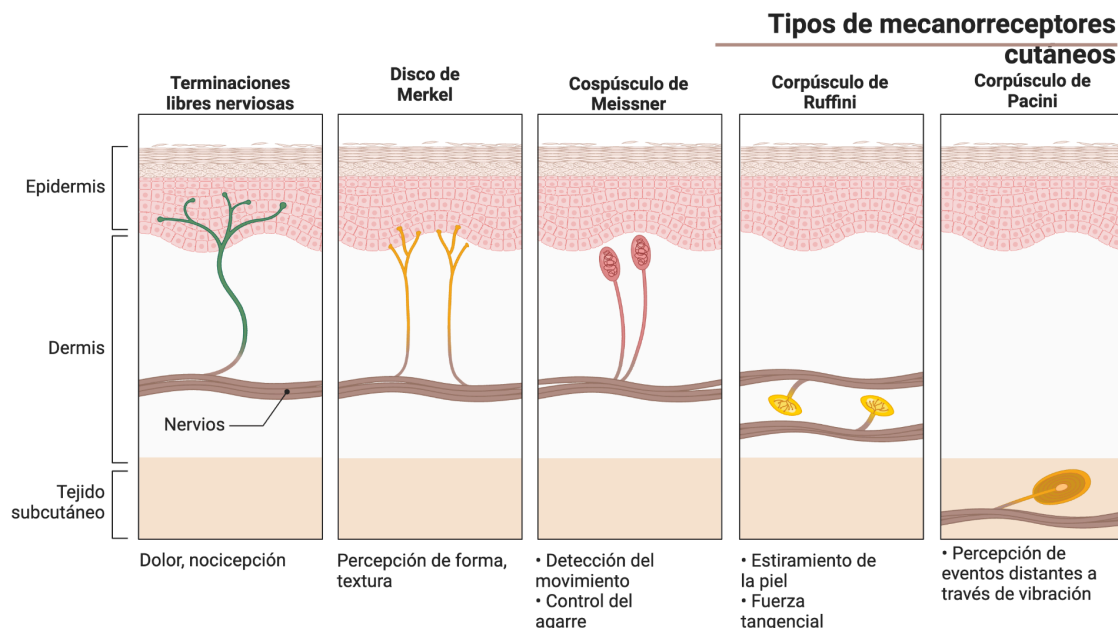
El sistema somatosensorial se divide en tres:

- **Exterocepción:** sentido de la interacción con el medio externo, y como este repercute en nuestro cuerpo. Las modalidades de este son el tacto, el dolor y la temperatura.
- **Propiocepción:** sentido de uno mismo (postura y movimientos de nuestro cuerpo).
- **Interocepción:** sentido de la función y estado interno de los principales órganos y sistemas (cardiovascular, respiratorio, renal y digestivo). Sus receptores son principalmente quimiorreceptores. Generalmente son inconscientes, pero la disfunción de un órgano o sistema puede producir dolor.

2.3.1 Tacto fino

El tacto es un sentido localizado en toda la extensión de la piel, su función es proporcionarnos **información de las características del medio o de un objeto** que hace contacto con el organismo.

El tacto fino **detecta y localiza el estímulo**. Los receptores que utiliza son mecanorreceptores, se especializan en detectar estímulos mecánicos como la **presión, la vibración, el aleteo, el estiramiento, la tensión**, etc. Las fibras de estos son de tipo **Aa** o **Aβ**.



Los mecanorreceptores se clasifican según dos criterios:

1. **Adaptación:** adaptación rápida (AR), el cual detecta los cambios del estímulo y de adaptación lenta (AL) que detecta la intensidad y duración de un estímulo constante.
2. **Tamaño del campo receptor:** A mayor profundidad mayor será el tamaño, pero su precisión será cada vez menor. Los campos de tipo 1 son pequeños, con bordes bien delimitados, lo que los hace muy precisos, los campos de tipo 2 son grandes y con bordes mal delimitados.

A partir de esto los mecanorreceptores de la piel se denominan de la siguiente forma:

- **AR1:** Corpúsculo de Meissner y fibras nerviosas de folículos pilosos
- **AR2:** Corpúsculo de Pacini
- **AL1:** Disco de Merkel
- **AL2:** Corpúsculo de Ruffini

Mecanismo de transducción de los mecanorreceptores

La conversión de energía mecánica en eléctrica consiste en utilizar la deformación física de la membrana celular con el fin de abrir canales iónicos (**Piezo 2**) y despolarizar la célula al aumentar la permeabilidad de Na^+ y Ca^{2+} . Los mecanismos son los siguientes

- **Fuerzas de tensión:** La distensión de la membrana lipídica provoca la apertura del canal
- **Proteínas estructurales unidas al canal:** Las proteínas intracelulares anclan el canal al citoesqueleto y las proteínas extracelulares actúan como un resorte que al recibir una fuerza mecánica se tensa y abre el canal
- **Vía indirecta por medio de segundos mensajeros:** Una proteína diferente al canal actúa como sensor y provoca la apertura de los canales de forma lenta y amplificada

2.3.2 Discriminación de dos puntos

Los **corpúsculos de Meissner** se encargan de esta función porque tienen los campos receptores más pequeños, lo que les da una **mayor precisión**, además, la inhibición lateral aumenta el contraste percibido en la corteza cerebral

La capacidad de discriminar dos puntos varía dependiendo del número de receptores que existe en cada región de la piel, es por ello que en la yema de los dedos se puede discriminar 2 puntos cuando están a 1-2 mm de distancia, en cambio en la espalda se requiere una distancia de 30-70 mm para poder distinguir 2 puntos de forma independiente

2.3.3 Vibración superficial y profunda

La vibración es la sensación producida por la estimulación sinusoidal de la piel (p. ej., al tocar la cuerda de una guitarra o sentir el diapasón en el examen neurológico). Los **receptores AR** se encargan de detectar la vibración.

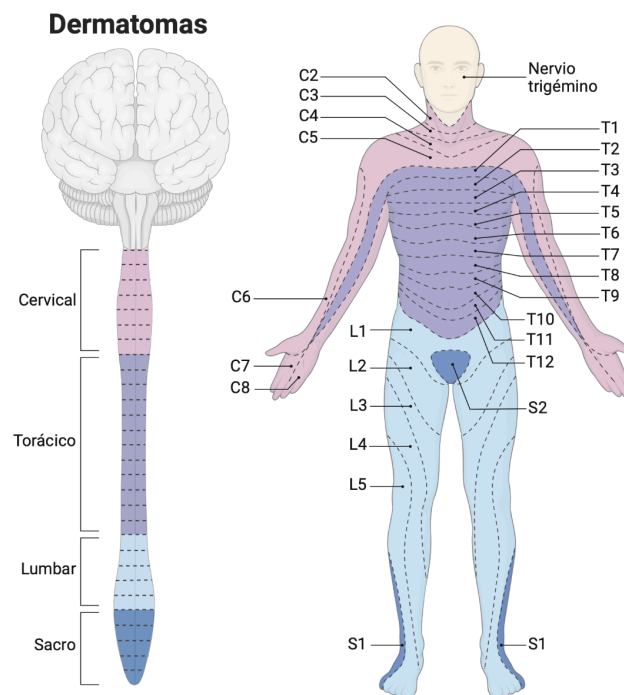
- Los **corpúsculos de Pacini** responden a vibraciones de **alta frecuencia (30-800 Hz)**,
- Los **corpúsculos de Meissner** responden a vibraciones de **baja frecuencia (2-80 Hz)**

2.3.4 Sistema somatosensorial en el sistema nervioso central y en el sistema nervioso periférico

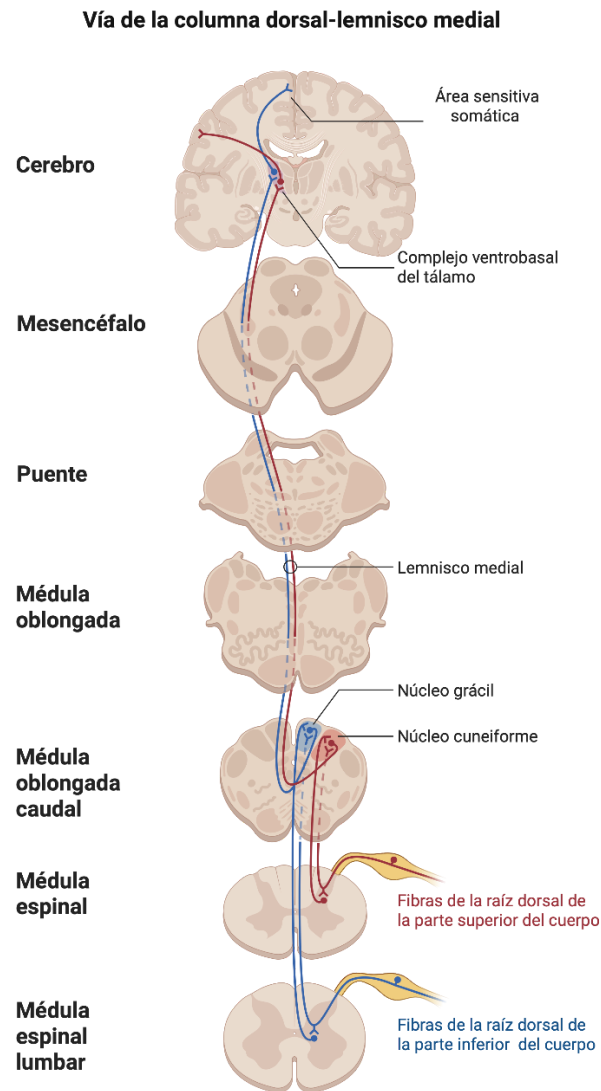
Dermatomas

El cuerpo celular de las neuronas receptoras de la información somatosensorial se encuentra en el **ganglio de la raíz dorsal (GRD)**. Cada ganglio está íntimamente relacionado con el segmento de la médula espinal adyacente.

Dermatoma: Segmento de la piel que es inervada por un ganglio de la raíz dorsal.



Vía del Lemnisco Medial/ Vía de la columna dorsal



Complejo ventrobasal del tálamo

- **Núcleo ventral posterolateral (NVPL):** Recibe las aferencias del **tronco** y de las **extremidades**
- **Núcleo ventral posteromedial (NVPM):** Recibe las aferencias de la cara, los labios, la cavidad oral, la conjuntiva y la duramadre por medio de la vía trigeminal, la cual comienza en las fibras sensoriales del ganglio de Gasser, pertenecientes a las tres ramas del NC V (oftálmica, maxilar y mandibular), estas harán sinapsis en el núcleo sensorial principal del trigémino

Corteza somatosensitiva primaria (S1)

Localización: giro poscentral/ **Áreas 1, 2, 3a y 3b de Brodmann.**

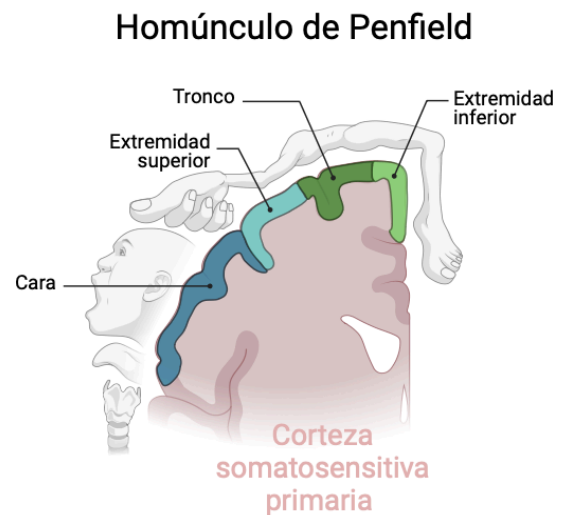
Los axones provenientes de **NVPL** y **NVPM** hacen sinapsis en el área **3b** y proyectan sus axones a las áreas **1** y **2**.

Información propioceptiva: Llega al núcleo ventral posterosuperior, los axones de esta zona se dirigen al área 3a y se proyectan principalmente al área 2

Mapa somatosensorial

S1 se organiza en **columnas**, que involucran las 6 capas de la corteza cerebral. Todas las neuronas en una columna reciben información de la misma zona del cuerpo y responden a la misma clase o clases de receptores, por lo tanto, **responden a una misma submodalidad sensorial**. Las entradas provenientes del tálamo hacen sinapsis en la **capa 4** de la columna, y de ahí se transmitirá la información de manera vertical hacia arriba y hacia abajo.

Las columnas se organizan de tal manera que hay un mapa somatotópico por cada área de Brodmann (4 mapas en total), que representan la sensibilidad de una región del cuerpo del lado contralateral al hemisferio cerebral del que se trata. El **tamaño de la zona de la corteza** que representa un segmento del cuerpo es **proporcional al número de receptores** que existen ahí. Las regiones con mayor tamaño de zona son **los labios**, seguidos de la cara, el pulgar y otros dedos.



Funciones de S1:

- **Localización** de los estímulos táctiles y dolorosos
- Valoración de la **intensidad** del estímulo
- **Duración** del estímulo
- **Textura** de los materiales
- Valoración del **peso** de los objetos
- Valoración de la **forma/configuración** de los objetos

Corteza somatosensitiva secundaria (SII)

Localización: Margen superior de la Cisura de Silvio y opérculo parietal

Las **Funciones** de SII son de tipo cognitivas:

- **Estereognosia:** Reconocimiento de objetos usando sólo el tacto
- **Nombramiento** de objetos
- **Memoria táctil** de objetos

Corteza de asociación somatosensitiva

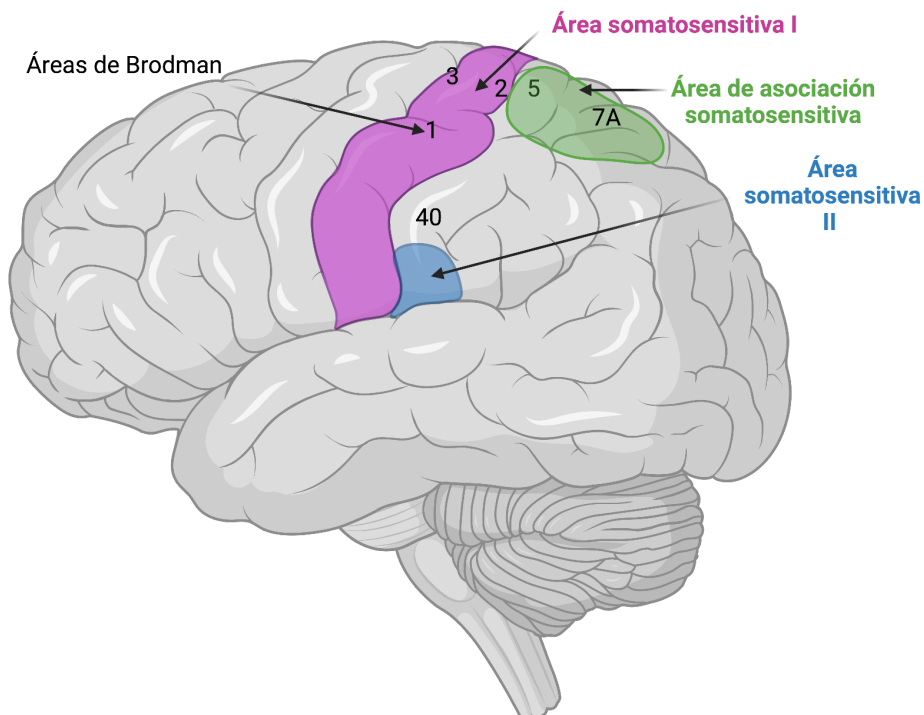
Localización: Lóbulo parietal superior/ **Áreas 5 y 7 de Brodmann**

El área 5 recibe información de la postura de la piel de la muñeca, codo y hombro, de los receptores articulares de estas articulaciones y de los husos musculares del brazo para conocer su movimiento. Además, recibe información táctil y postural de la mano.

El área 7 **integra la información táctil con otros sentidos**, como la **visión**, para coordinar la ubicación espacial de la mano

Función:

- Actúa como un circuito de retroalimentación con las áreas motoras de la corteza cerebral. **Planea y ajusta la forma y la postura de las manos en la manipulación de objetos** (acercamiento y agarre).



2.3.5 Tacto burdo

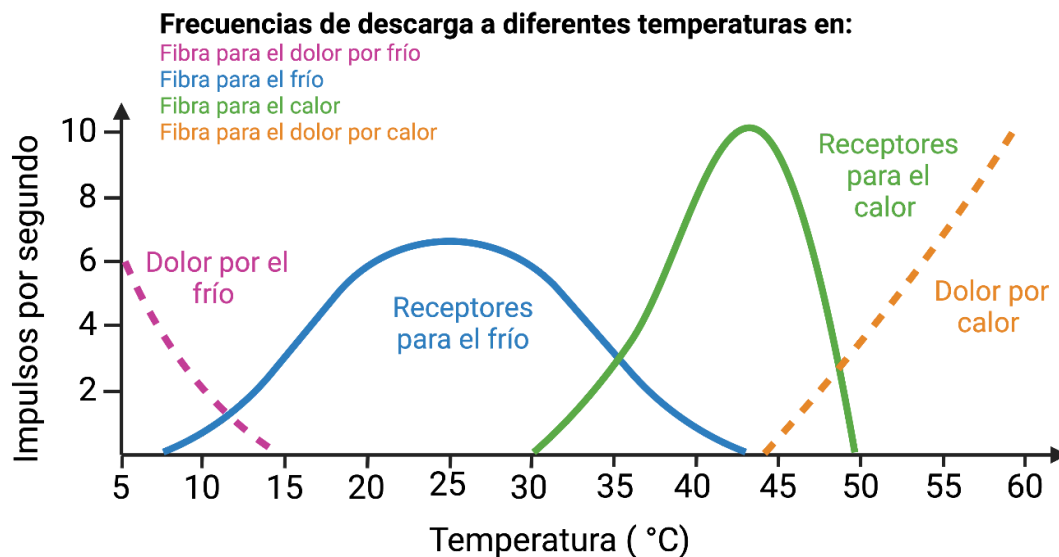
El tacto burdo **detecta el estímulo** pero **no puede localizarlo**. Las modalidades sensoriales que detecta son la **temperatura y el dolor**. Los receptores de ambos son **terminaciones nerviosas libres**

Receptores de temperatura/ Termorreceptores

Conducción: Fibras de tipo **Aδ** y **C**.

Los seres humanos reconocen cuatro tipos de sensaciones térmicas: **frío, fresco, tibio y caliente**. Los **canales de potencial de receptor transitorio (TRP)** son los encargados de registrar el cambio de la temperatura. Se abren cuando la temperatura alcanza su rango de activación, además, los TRP pueden activarse por medio de ligandos específicos:

- **TRPV1:** >43 °C / **Capsaicina**
- **TRPV2:** >52 °C
- **TRPV3:** >31-39 °C / Alcanfor
- **TRPV4:** >27 °C
- **TRPM8:** <25 °C / Mentol
- **TRPA1:** <17°C / Aceite de mostaza



Receptores de dolor/ Nociceptores

El dolor es una experiencia sensorial con componentes afectivos y emocionales, tiene como función informarnos sobre lesiones que requieren evasión o tratamiento. Se clasifica en dos tipos: rápido (inicio en 0.1 s) y lento (luego de 1 s).

Dolor rápido

Fibras tipo **Aδ mielinizadas** que se localizan en la **piel**.

Neurotransmisor: Glutamato

Tipos:

- **Térmicos:** Son activados por **temperaturas extremas: <15°C y >45°C**
- **Mecánicos:** Son activados por presiones intensas aplicadas a la piel

Dolor lento/crónico

Fibras tipo **C amielínicas** que se localizan en la piel y tejidos profundos (periostio, paredes arteriales, superficies articulares, hoces, tienda de la bóveda craneal, etc.)

Neurotransmisor: Glutamato / Cotransmisores: Sustancia P (es el **principal**, prolonga el tiempo de despolarización generado por el glutamato y lo potencia), péptido relacionado con el gen de la calcitonina (CGRP), somatostatina y galanina,

Tipos:

- **Polimodales:** Son activados por estímulos mecánicos, químicos (p.ej., capsaicina) o térmicos intensos.
- **Silentes:** Se encuentran en las vísceras, la inflamación y agentes químicos reducen mucho su umbral de disparo. Su activación contribuye a la aparición de la hiperalgesia y la sensibilización central

Mecanismo de transducción de los nociceptores

La membrana celular de los nociceptores contienen receptores que convierten la energía mecánica, química y térmica en estímulos dolorosos al despolarizar la membrana. Algunos ejemplos son los siguientes

- Canales **TRP:** Térmico y químico
- Receptor **PTX3:** Químico, se activa por el ATP liberado de las células dañadas
- Canal de Na⁺ **SCN9A:** Propagación del potencial de acción
- Familia de receptores acoplados a proteína G relacionados con Mas (**Mrg**): Se activan por ligandos peptídicos (p.ej., **sustancia P**) y sensibilizan los nociceptores a otras sustancias químicas liberadas

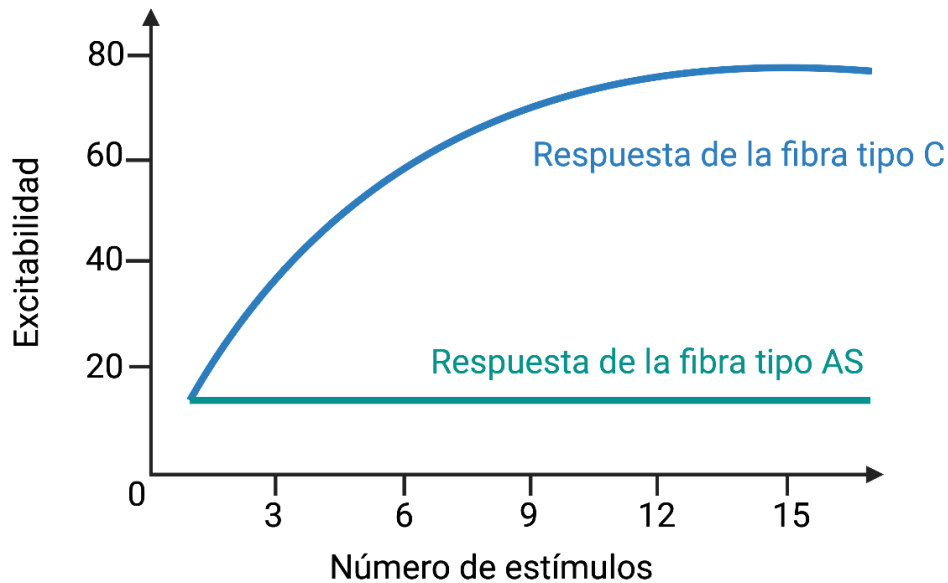
Hiperalgesia

En un tejido que ha sido dañado la transmisión del dolor es potenciado debido a la liberación de productos **químicos (bradicinina, histamina, serotonina, acetilcolina, K⁺, ácidos, enzimas proteolíticas)** de las células lesionadas. Estas sustancias **aumenta la sensibilidad de los nociceptores** al reducir su umbral de activación

Sensibilización central

La **exposición repetitiva** a estímulos nocivos provenientes de fibras C provoca cambios a largo plazo (memoria) en la excitabilidad de las neuronas de la columna dorsal, provocando que los estímulos dolorosos se exacerben cada vez más. Este cambio es mediado por algunos factores, entre ellos la **acumulación de Ca^{2+} intracelular en la célula**, producto de la despolarización prolongada de este tipo de fibras.

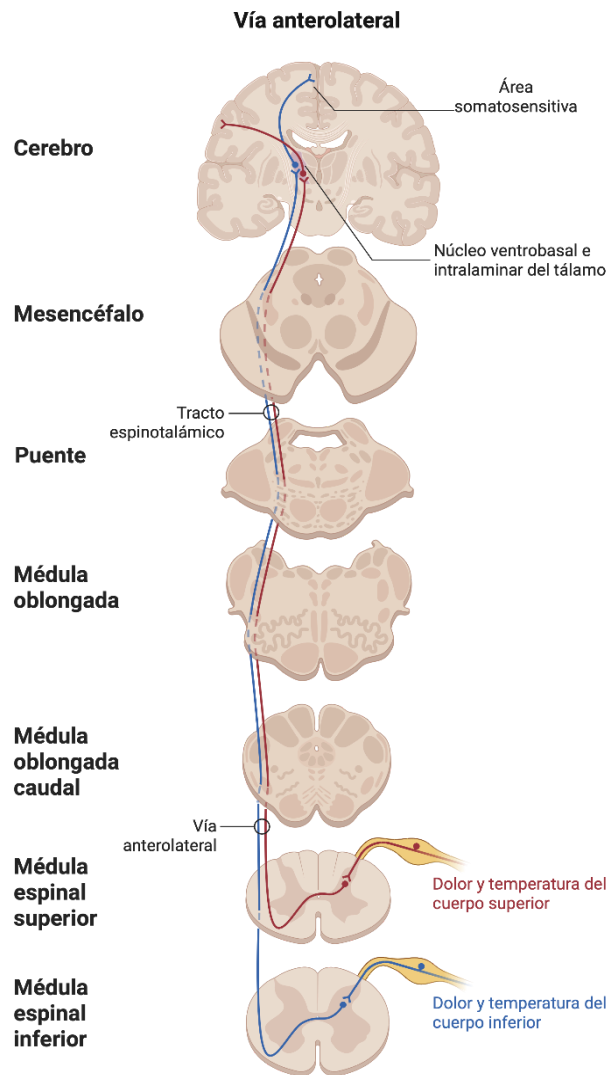
Respuesta de las fibras C y AS ante una estimulación repetitiva



Organización del tacto burdo en la sustancia gris de la médula espinal

- **Lámina I:** Recibe aferencias de las fibras tipo $\text{A}\delta$ y C.
- **Lámina II:** Contiene interneuronas que modulan la proyección de la información del dolor hacia centros superiores
- **Lámina III y IV:** Contienen interneuronas que reciben aferencias de fibras $\text{A}\beta$
- **Lámina V:** Recibe aferencias tanto de receptores de la piel ($\text{A}\beta$ y $\text{A}\delta$), como de receptores viscerales encargados de la interocepción (tipo C).
- **Lámina V y VII:** Reciben aferencias de las vísceras, por lo tanto, transmiten el dolor difuso.

Vía Espinotalámica



La vía espinotalámica inicia en las **neuronas del GRD**, las cuales hacen sinapsis en las láminas **I, V, VII y VIII** de rexed

La mayoría de las fibras **decusan en la médula espinal** y **ascienden de forma contralateral hacia el tálamo**, donde hacen sinapsis con un grupo de núcleos distinto según el tipo de dolor que transmiten

Tracto neoespinotalámico

- Transmite el **dolor rápido**
- Sinapsis en tálamo: **Grupo nuclear lateral (NVPL, NVPM y núcleo posterior)**. Reciben información de la lámina I y V.
- Esta vía es importante para la **localización del dolor**

Tracto paleoespinotalámico/ espinoreticulotalámico

- Conduce el **dolor lento** y se encarga del reconocimiento del **dolor visceral**
- Sinapsis en tálamo: **Grupo nuclear medial (Núcleo dorsomedial, centrolateral y complejo intralaminar)**. Reciben información de la lámina VII y VIII.
- La formación reticular y el complejo intralaminar son zonas que poseen un potente efecto activador en todo el encéfalo, es por eso que es casi imposible que una persona pueda conciliar el sueño cuando sufre un dolor intenso

Áreas de la corteza implicadas en el procesamiento del dolor

- **SI:** Localización del dolor
- **Giro del cíngulo anterior:** Percepción del dolor y procesamiento de estados emocionales asociados con el dolor
- **Lóbulo de la ínsula:** Recibe aferencias del grupo nuclear medial y del NVPM. Las neuronas de este lóbulo procesan información sobre el estado interno del cuerpo y contribuyen a las respuestas autonómicas asociadas al dolor. Es un área de integración de los componentes sensoriales, afectivos y cognitivos del dolor. Por último, es una región cortical primaria para procesar las sensaciones térmicas y viscerales

Tracto espinomesencefálico

. Inicia en las láminas **I** y **V**, hace sinapsis en distintas zonas del tronco encefálico:

- **Formación reticular mesencefálica**
- **Sustancia gris periacueductal (SGP)**
- **Núcleo parabraquial**, el cual se proyecta hacia la **amígdala**. Esta conexión se encarga de regular el **componente afectivo del dolor**

Tracto espinohipotalámico

Comienza en las láminas **I**, **V** y **VIII**, hace sinapsis en los núcleos hipotalámicos encargados de regular las respuestas autonómicas asociadas al dolor: **neuroendocrinas** y **cardiovasculares**

2.3.6 Dolor visceral, parietal y referido

Dolor visceral

El dolor visceral se produce cuando **un grupo considerable y difuso de nociceptores se activa**, provocando un dolor intenso, los daños de una zona pequeña de una víscera rara vez producen dolor intenso

Las causas de esta activación difusa de nociceptores son: Isquemia, estímulos químicos, espasmo de vísceras huecas, hiperdilatación y estiramiento del tejido conectivo que rodea o es contenido dentro de la víscera

Dolor parietal

La **capa parietal** de las membranas serosas que recubren las cavidades corporales (**pleura, pericardio y peritoneo**) están inervadas ampliamente por nociceptores con fibras A δ . Es por ello que el dolor de las capas parietales es agudo, intenso y se localiza directamente sobre ella

Dolor referido

En las neuronas de la **lámina V converge información** nociceptiva de regiones **somáticas y viscerales**. Las proyecciones de estas neuronas llegan a los centros superiores sin informar sobre la fuente del dolor, por lo cual el cerebro atribuye incorrectamente el dolor a la piel, ya que sus señales son las predominantes y tienen una mayor representación en la corteza cerebral. El **dolor referido** es el fenómeno en el cual **el dolor producido de una lesión visceral se percibe como originado de una región de la superficie corporal**.

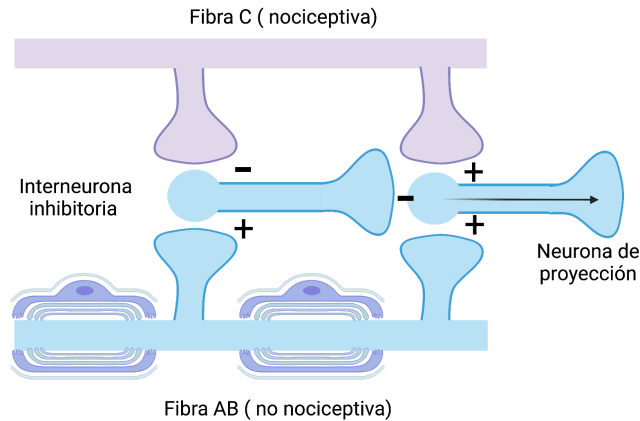
La superficie corporal del dolor referido corresponde al dermatoma del segmento cervical que inerva la víscera. Esto explica porque al sufrir un infarto agudo de miocardio, el dolor queda referido a ciertas áreas del lado izquierdo (parte lateral del cuello, el hombro y la parte interna del brazo) que corresponden a los dermatomas de los segmentos C3 a T5.

2.3.7 Mecanismos de analgesia

Teoría del control de la compuerta del dolor

Estímulos inocuos, como uno mecánico al frotar una herida puede bloquear y reducir las sensaciones dolorosas por medio de este mecanismo mediado por fibras de tipo A β las cuales activan interneuronas de la Lámina II de Rexed para inhibir a las neuronas de proyección del dolor

Teoría de la compuerta



Sistema de supresión del dolor/ Sistema de analgesia

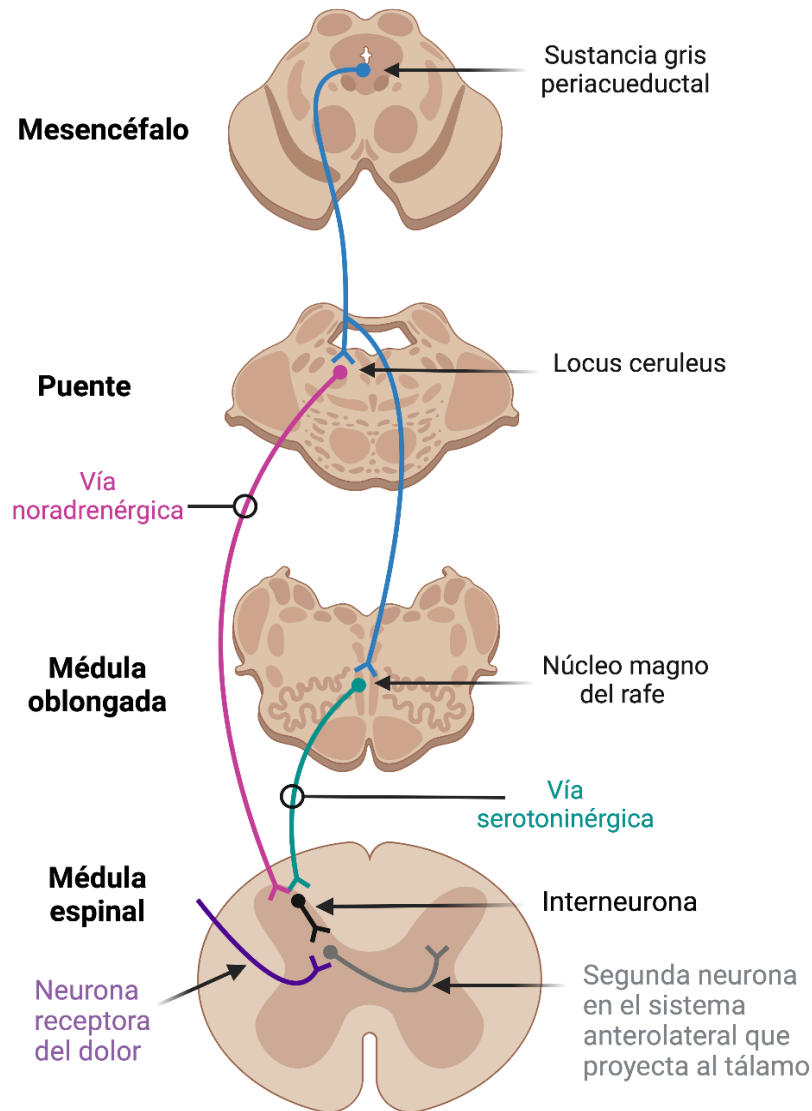
Complejo de **vías descendentes** que se originan del tronco encefálico y del hipotálamo, tienen como objetivo **suprimir la entrada de señales de dolor, principalmente de estímulos persistentes (dolor lento)**

Estas vías utilizan un grupo de neuropéptidos conocidos como **opioides endógenos**, los cuales se dividen en 4 grupos según la molécula precursora, los opioides principales son: **encefalinas (metencefalina y leuencefalina), β -endorfina y dinorfinas (A y B)**. Los receptores de los opioides también son 4, y tienen afinidad por un tipo de opioide específico, estos son: **μ , δ , κ** y el receptor orphan **ORL-1**

Propéptido	Péptido	Receptor preferencial
POMC	B-endorfina Endomorfina 1 Endomorfina 2	μ / δ μ
Proencefalina	Met-encefalina Leu-encefalina	δ
Prodinorfina	Dinorfina A Dinorfina B	κ
Pro-orfanina FQ	Orfanina FQ	Receptor orphan ORL-1

El mecanismo del sistema de analgesia es el siguiente:

Sistema de supresión del dolor



1. Neuronas provenientes de los **núcleos periventriculares del hipotálamo** sintetizan **β -endorfina**, activan a la **sustancia gris periacueductal (SGP)**, al **locus coeruleus (LC)** y núcleos noradrenérgicos de la médula oblongada y el puente.
2. La **SGP** libera **encefalinas** y **dinorfinas** al **núcleo magno del rafe (NMR)**, causando que se despolarice.
3. Las neuronas **noradrenérgicas** del **LC** y de otros núcleos, así como neuronas **serotoninérgicas** del **NMR** llegan a la médula espinal y hacen sinapsis con interneuronas de las láminas I, II y V.
4. Las **interneuronas se despolarizan, liberan encefalinas y endorfinas** a la sinapsis entre las fibras C y las neuronas de proyección del asta dorsal, **inhibiendo la neurotransmisión** de dos formas:

Terminal presináptica: disminuyen la conductancia del Ca^{2+} , por lo tanto la concentración intracelular del ión baja y los neurotransmisores no se liberan de la vesícula.

Terminal postsináptica: aumentan la conductancia del K^+ , esto produce hiperpolarización y aumento del umbral de activación de la neurona.

2.4. Sistema Visual

2.4.1 Conceptos de Óptica

La óptica es la rama de la física que se encarga del estudio del comportamiento y las **propiedades de la luz**, incluidas sus interacciones con la materia, así como la construcción de instrumentos que se sirven de ella o la detectan. Para entenderla, primero debemos revisar algunos conceptos:

Refracción de la luz

Índice de refracción (IR) de un medio transparente: es el cociente de la velocidad de la luz en el aire y la velocidad en dicho medio.

Cuando un rayo de luz que viaja en un medio (aire), choca contra la superficie limitante de un medio diferente que es perpendicular (90°) a dicho rayo, penetrará a este nuevo medio con un cambio en su velocidad y de la longitud de onda.

En cambio, si al atravesar este medio forma un ángulo diferente a 90° cuando penetra en el nuevo medio con IR diferente, **cambiará de dirección**. Este fenómeno tendrá una **mayor magnitud** entre más grande sea la diferencia entre los índices de refracción de cada medio y a mayor sea el **grado de angulación (curvatura)**.

Índice de refracción del vidrio = $V_{\text{aire}} (300.000 \text{ km/s}) / V_{\text{vidrio}} (200.000 \text{ km/s}) = 1.5$

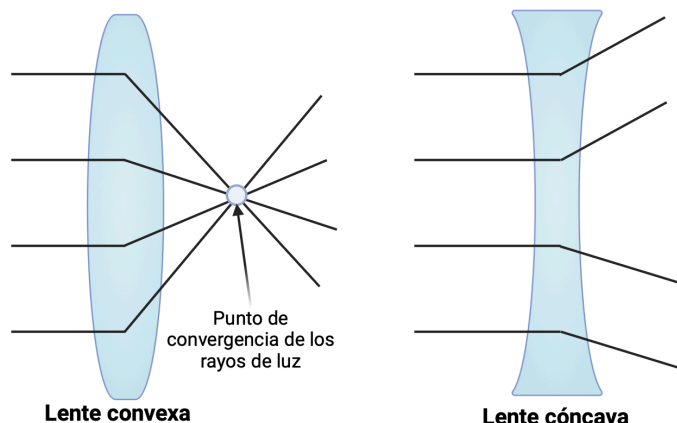
Lentes

Son dispositivos que utilizan el fenómeno de refracción para



Fenómeno de refracción en un vaso de agua

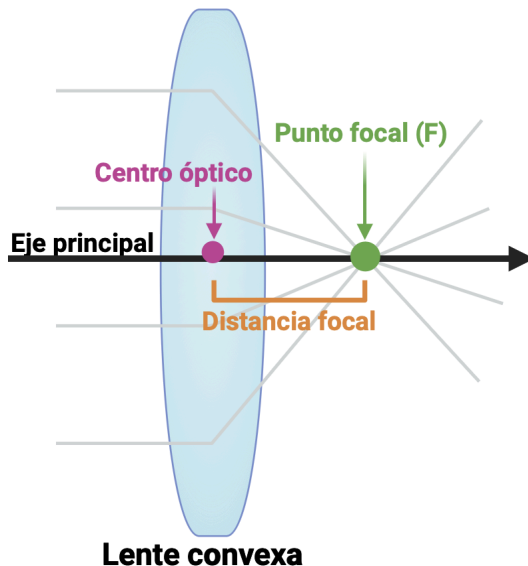
Formas de refracción de la luz



concentrar o dispersar rayos luminosos, esta capacidad depende de su IR y de su curvatura.

Lentes convexos: Concentra los rayos de luz paralelos / Convergencia

Lentes cóncavos: Dispersa los rayos de luz paralelos/ Divergencia



Centro óptico: Punto donde se encuentra el **centro de la lente en su eje principal**, dicho eje se traza **perpendicular a la superficie de la lente**

Punto focal: Punto donde convergen los rayos de luz. En el caso de los lentes convexos este punto se encuentra por detrás de la lente, mientras que en los cóncavos este punto es "virtual" y se encuentra por delante de la lente

Distancia focal: Distancia que existe entre el centro óptico y el punto focal

Poder dióptrico de una lente: Es la capacidad de una lente de desviar un haz

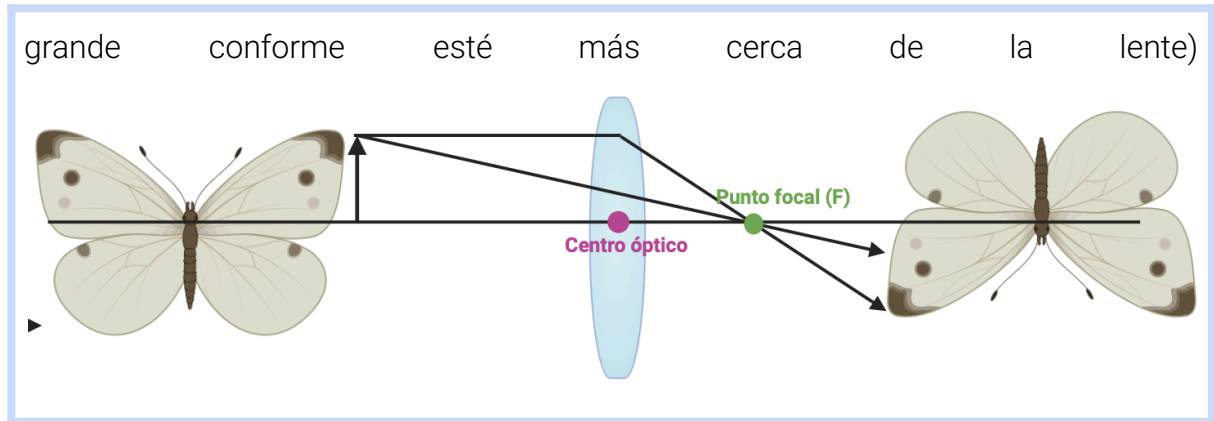
de luz, mientras más grandes sean el IR y la curvatura mayor será el poder dióptrico. Se mide en **dioptrías**, que equivale al **inverso de la distancia focal**. El valor de las dioptrías será positivo en lentes convexos y negativo en lentes concavos.

Formación de una imagen por una lente convexa

Para comprender los campos visuales es importante comprender cómo una lente forma una imagen:

1. Un objeto se compone de varias fuentes puntuales de luz, que varían en su intensidad luminosa y color.
2. Una fuente focal emite varios rayos de luz, pero los requeridos para formar la imagen son dos. El primero se dirige a 90° de la superficie de la lente, se refracta, pasa por el punto focal y continúa su camino. El segundo se dirige hacia el centro óptico sin sufrir refracción, lo atraviesa y continúa su trayectoria
3. En un punto ambos rayos se encontrarán, y ahí se formará la imagen de la fuente focal correspondiente. La imagen se completará cuando todas las fuentes focales del objeto hayan formado su propia imagen al encontrarse sus rayos respectivos.

En el caso de una lente convexa, un objeto que se encuentre alejado más allá de 1 distancia focal formará una **imagen real, invertida** y con **tamaño variable** (será más



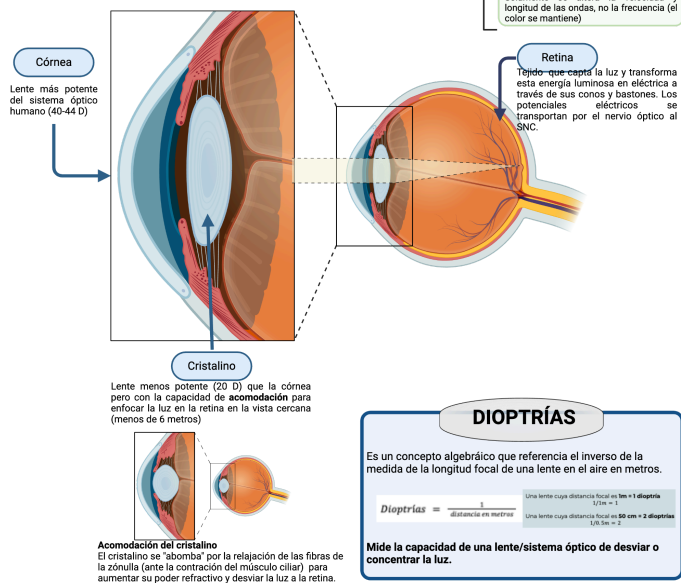
El ojo humano

El **ojo** puede considerarse como una lente convexa con un punto focal de 17 mm por delante de la retina y con un poder dióptrico que depende de 2 estructuras:

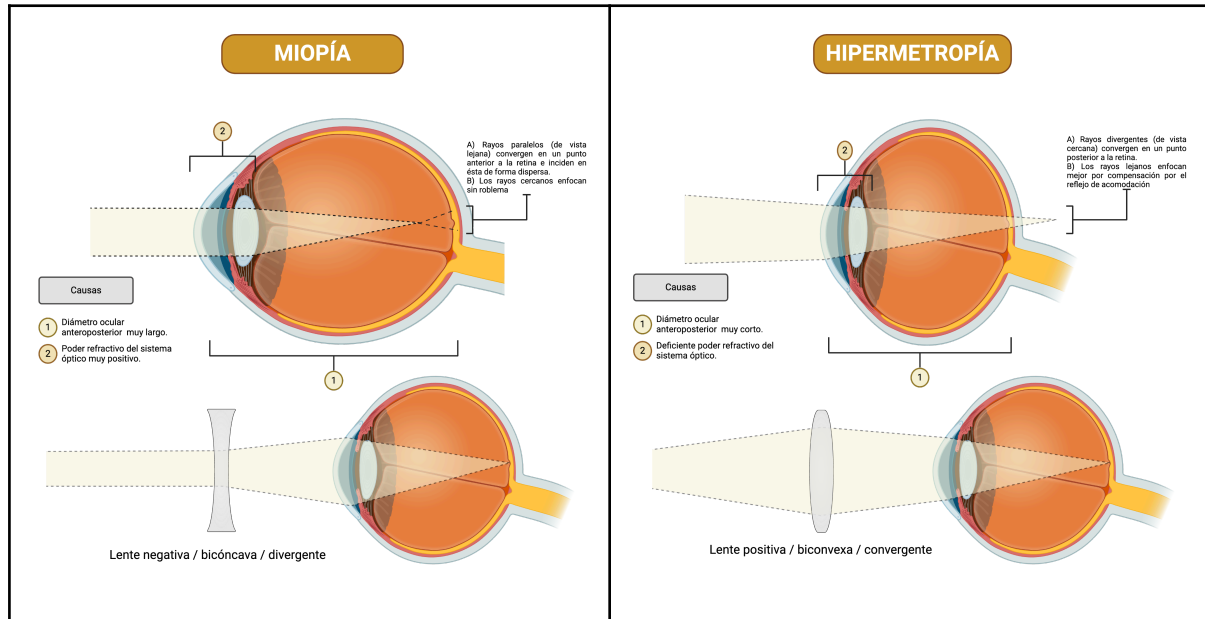
Córnea: 2/3 del poder dióptrico: 43 dioptrías

Cristalino: 1/3 del poder dióptrico: 20 dioptrías. Su curvatura puede aumentar para **acomodar** la visión (20-34 dioptrías)

EL SISTEMA ÓPTICO HUMANO



Si el ojo no es capaz de lograr una adecuada acomodación en el sitio de incidencia de los rayos de luz en la retina, tendremos alteraciones como la miopía y la hipermetropía.

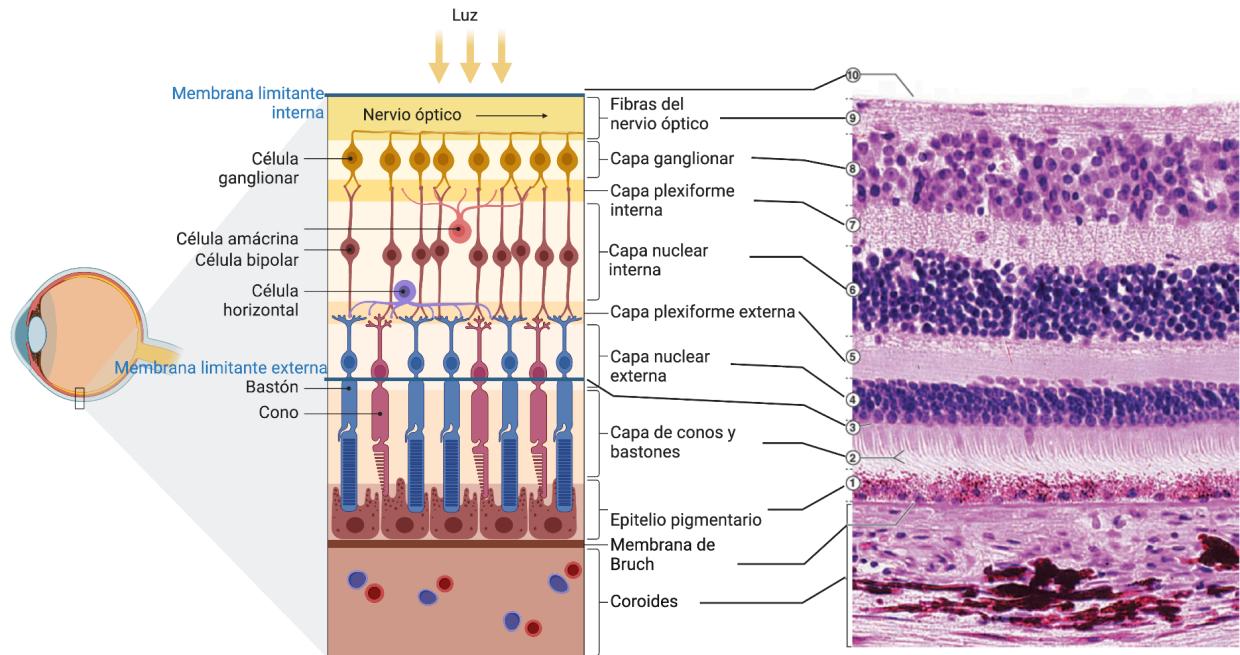


2.4.2 Fisiología de la retina, transducción, adaptación

La retina se divide en 10 capas

1. **Epitelio pigmentario:** Proporciona nutrientes, elimina los discos receptores gastados y restaura el fotorreceptor 11-cis-retinal
2. **Capa de fotorreceptores:** Discos receptores de conos y bastones
3. **Membrana limitante externa:** Las células de Müller son células gliales que mantienen la forma de la retina. Sus extremos forman uniones intercelulares con los segmentos internos de los fotorreceptores para dar forma a esta membrana
4. **Capa nuclear externa:** Cuerpo y núcleo de los conos y bastones,
5. **Capa plexiforme externa:** Sinapsis entre fotorreceptores y células bipolares u horizontales
6. **Capa nuclear interna:** Cuerpo y núcleo de células bipolares, horizontales, amacrinas, interplexiformes y de Müller
7. **Capa plexiforme interna:** Sinapsis entre células bipolares y amacrinas con las células ganglionares
8. **Capa de células ganglionares:** Cuerpo y núcleo de células ganglionares
9. **Capa de fibras nerviosas:** Axones de las células ganglionares, que viajan hacia la papila óptica y se unirán formando el nervio óptico
10. **Membrana limitante interna:** Pies de las células de Müller que forman uniones intercelulares para dar forma a esta membrana.

CAPAS DE LA RETINA Y CORRESPONDENCIA CON TOMOGRAFÍA DE COHERENCIA ÓPTICA (OCT)



2.4.3 Fotorreceptores: Conos y bastones

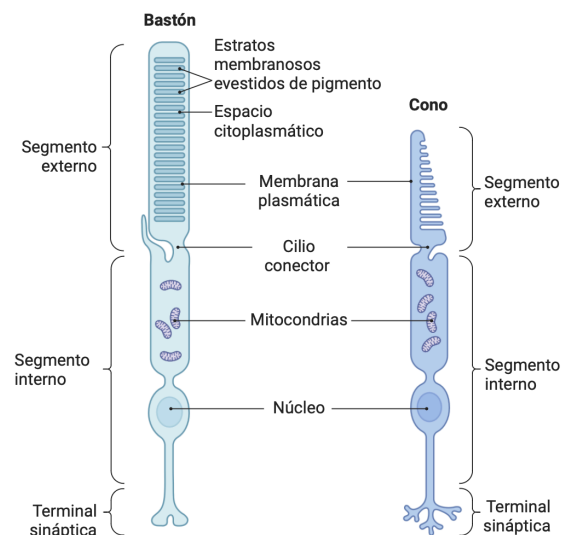
Composición de los fotorreceptores

Segmento externo: contienen los discos receptores, los cuales son repliegues de membrana plasmática, en estos discos se encuentran los pigmentos fotosensibles

Segmento interno: citoplasma y núcleo, contiene los organelos, principalmente mitocondrias, además de canales selectivos de K^+ . Un tallo ciliar conecta el segmento interno como el externo

Cuerpo sináptico: conexión con células que continúan la vía visual

Morfología de los fotorreceptores



Pigmentos visuales

La luz se detecta por medio de un pigmento fotosensible, el cual se compone de un **cromóforo, el 11-cis retinal**, el cual se fusiona con una **opsina**, que son un grupo de proteínas acopladas a proteína G. La opsina del bastón se denomina **escotopsina**, y la opsina de los conos se denomina **fotopsina**.

El pigmento de los bastones es la rodopsina (11-cis retinal + escotopsina).

Componentes de la Rodopsina



El pigmento de los conos es la yodopsina (11-cis retinal+fotopsina). Los conos se clasifican en 3 según el pigmento (**yodopsina**) que contienen en sus discos: **S (azul)**, **M (verde)** y **L (rojo)**. El nombre proviene del tipo de longitud de onda que puede captar cada pigmento.

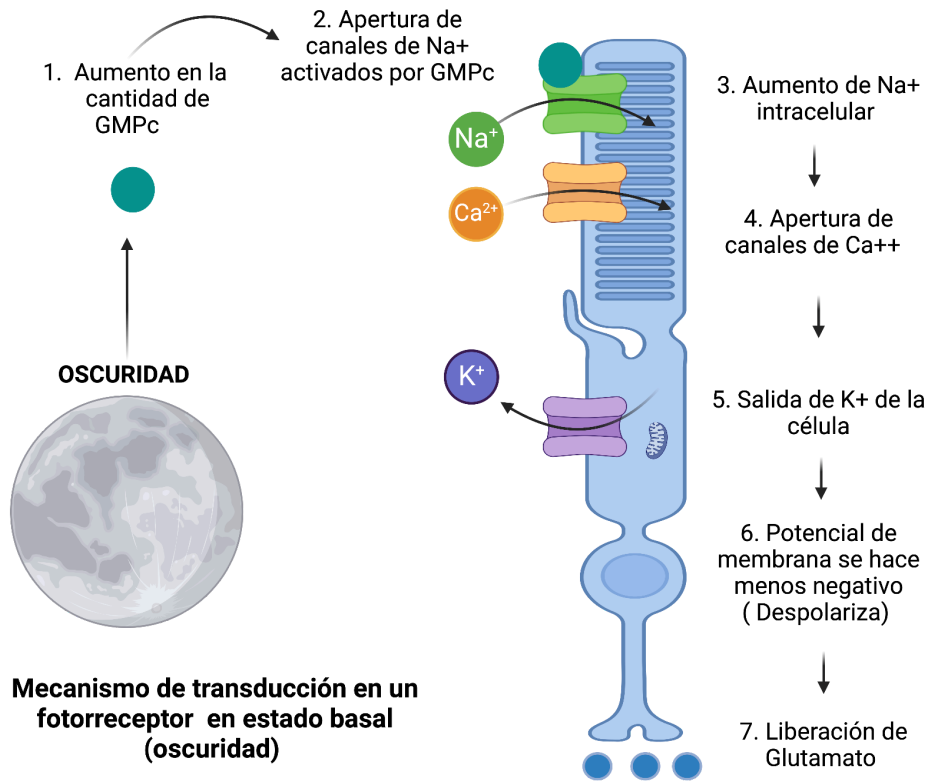
Además de las conos y bastones, las **células ganglionares retinianas intrínsecamente fotosensibles (ipRGC)** también son capaces de detectar la luz por medio de su pigmento, la **melanopsina**. Sus funciones se encuentran en la regulación del ciclo sueño-vigilia y en la inhibición de la producción de **melatonina**.

Fotorreceptor en estado basal (oscuridad)

El potencial de membrana se encuentra ligeramente despolarizado (**-40 mV**) porque los **canales catiónicos regulados por GMPc** se encuentran abiertos ya que la **Guanilato Ciclasa** sintetiza GMPc de forma constitutiva.

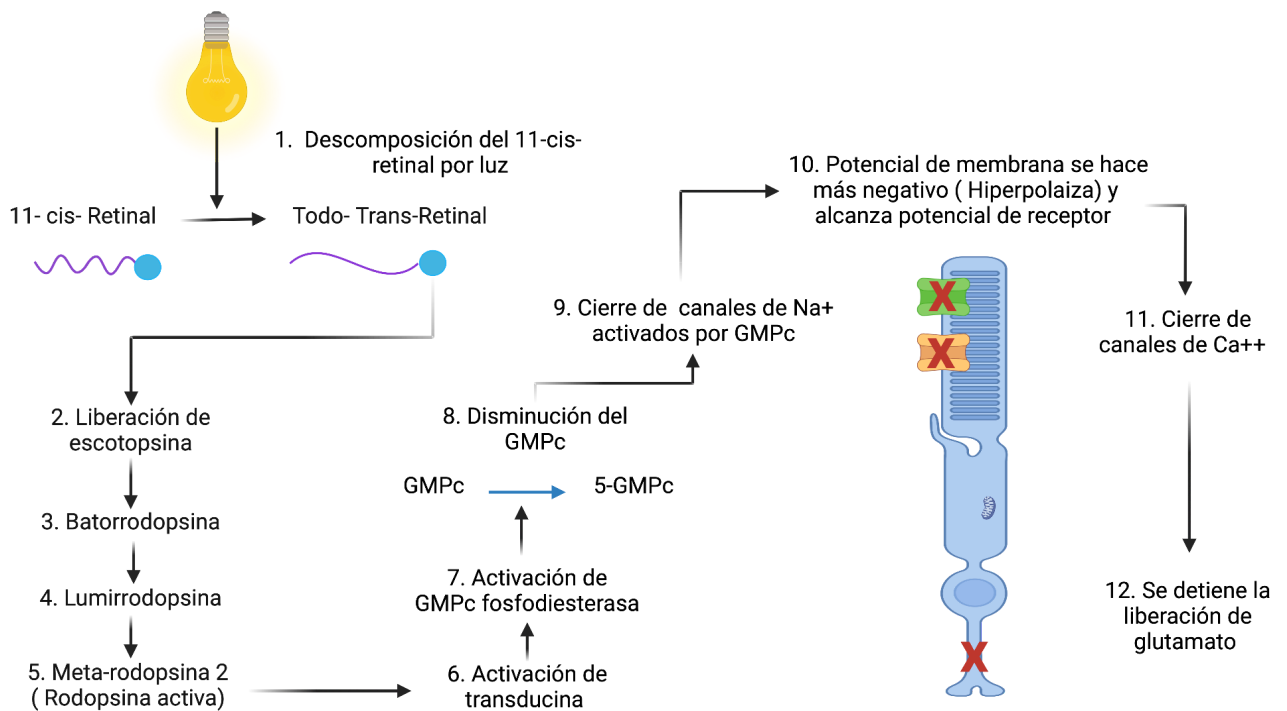
La entrada de Na^+ y Ca^{2+} en el segmento externo, y la salida de K^+ en el segmento interno generan la **corriente de oscuridad** que induce la **liberación constante de glutamato** en la hendidura sináptica

El **mecanismo de transducción visual** en un bastón es la siguiente:



Fotorreceptor ante estímulo luminoso

Mecanismo de transducción ante un estímulo luminoso



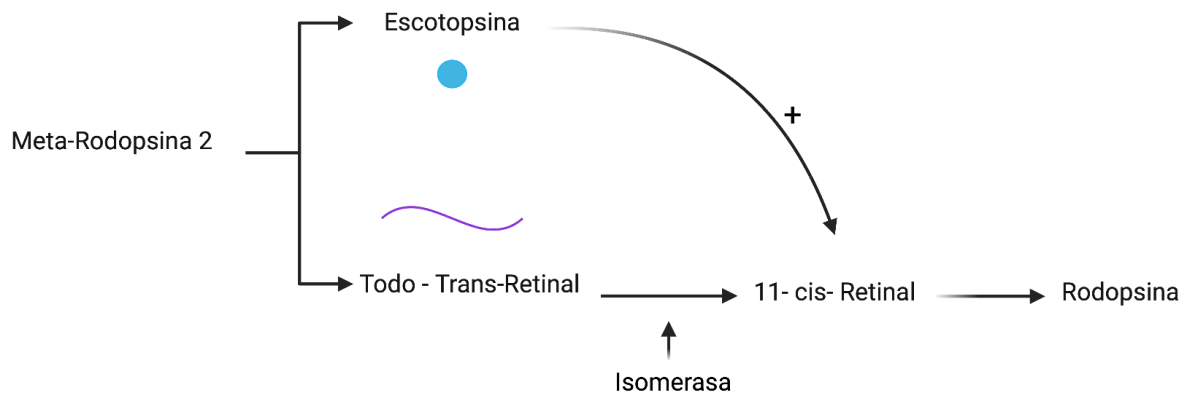
Terminación de la transducción

Los componentes de la transducción se inactivan de la siguiente forma: La **rodopsina-cinasa** fosforila la metarrodopsina II para que la **arrestina** la reconozca y la inhibe, con ello toda la cascada de transducción queda inactivada.

Reciclamiento de la rodopsina

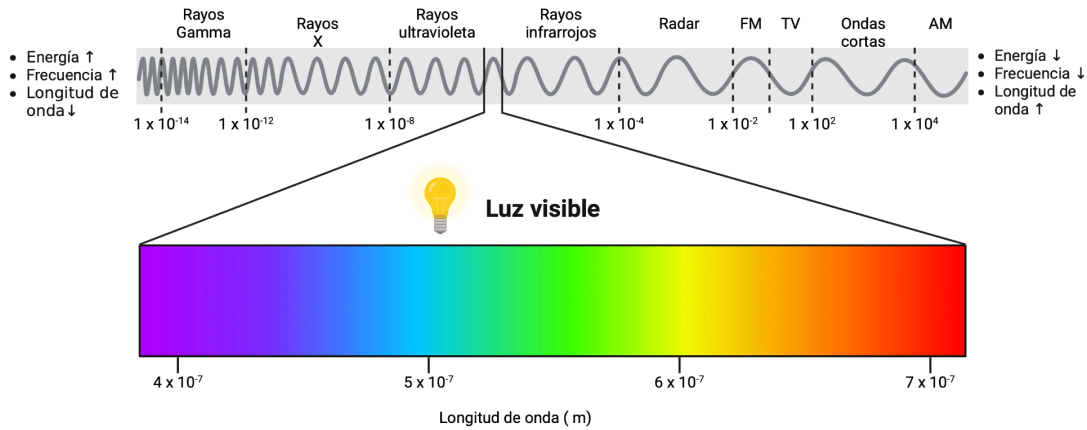
Luego de unos segundos la metarrodopsina II se separa en escotopsina y en todo-trans retinal, este proceso se llama "blanqueamiento". La rodopsina se dirige al epitelio pigmentario donde la enzima isomerasa de retinal formará 11-cis retinal, y este se unirá de nuevo a la escotopsina restaurando la rodopsina.

Reciclamiento de la rodopsina



Espectro visible de la luz

Espectro de luz

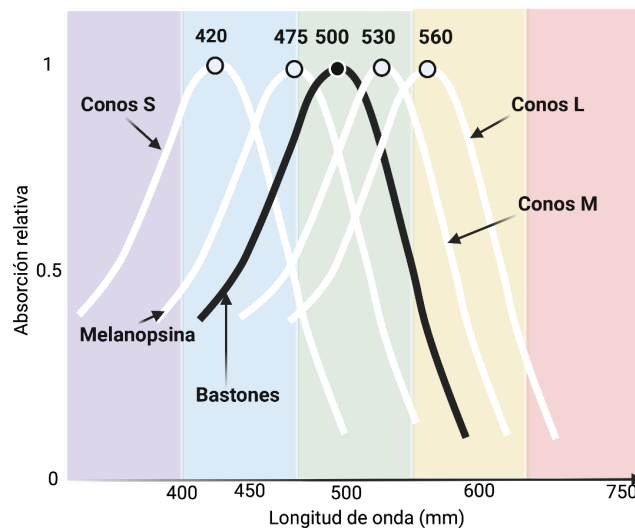


Curvas de absorbancia

El punto máximo de las curvas representa la **longitud de onda a la que el pigmento es más sensible**.

La **luz blanca** se produce por la estimulación de los 3 tipos de conos de forma equivalente.

Espectro de absorción de los fotopigmentos humanos

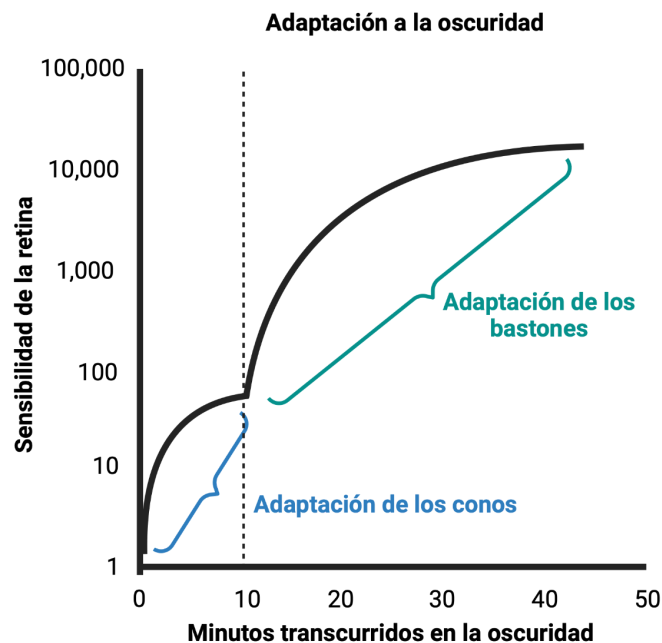


Adaptación visual

Adaptación a la luz/ Visión fotópica: Luego de estar un tiempo expuesto a una luz radiante una gran cantidad de los componentes activos se ha blanqueado, este

proceso se realiza a la misma velocidad en conos y en bastones, pero los primeros pueden regenerar el pigmento visual más rápido. Esta diferencia en la regeneración implica que **en condiciones de luz brillante los conos son los únicos que funcionan**.

Adaptación a la oscuridad/ Visión escotópica: Después de mantenerse un tiempo en la oscuridad las concentraciones de los pigmentos visuales se restauran, pero como se mencionó anteriormente, esta regeneración es más rápida en los conos, terminando la adaptación a los 10 minutos, por lo cual al inicio su sistema predomina en la visión, con el defecto de tener una sensibilidad muy baja. Por otro lado, **los bastones van regenerando la rodopsina lentamente** hasta que luego de estar 10 minutos en la oscuridad **la sensibilidad del sistema supera el de los conos** y se convierte en el principal sistema para ver; la adaptación se completará luego de más de 30 minutos.



2.4.4 Circuitos neuronales de la retina

La transmisión de los impulsos en la retina es por lo general **electrotónica**, solamente las neuronas ganglionares generan potenciales de acción. Esto permite una conducción escalonada de la potencia del impulso, es decir, **a mayor intensidad lumínica, mayor intensidad en la conducción nerviosa**.

Campo receptor de los fotorreceptores

Forma circular. El receptor al hiperpolarizarse provocará un cambio en la respuesta de las neuronas con las que hace sinapsis (bipolares y horizontales), la cual dependerá del tipo de receptor para glutamato que tenga cada neurona.

Campo receptor de neuronas bipolares

Existen 2 tipos de neuronas bipolares, cada una con un campo receptor característico:

- **Despolarizante:** Su receptor está acoplado a proteína G_i , frente a un estímulo luminoso la acción de G_i se inhibe y la neurona se despolariza. Su campo receptor es Centro ON/ Periferia OFF.
- **Hiperpolarizante:** Su receptor es un canal catiónico, frente a un estímulo luminoso el canal se cierra y produce hiperpolarización de la neurona. Su campo receptor es Centro OFF/ Periferia ON

Los campos receptores de las células bipolares tienen forma circular, con un centro, el cual está dado por la sinapsis con el fotorreceptor, y una periferia, la cual consta de los fotorreceptores que rodean a la célula bipolar y hacen sinapsis con las células horizontales, las cuales son interneuronas que liberan GABA hacia la célula bipolar, la función de estas células es realizar inhibición lateral, convirtiendo a la célula bipolar en un **detector de contraste**.

Células amacrinas

Se han identificado alrededor de 30 tipos de estas células, las cuales pueden usar 8 neurotransmisores distintos. Un tipo de célula amacrina forma parte de la vía directa para la visión de los bastones, reciben estímulo de las células bipolares y se dirigen hacia las neuronas ganglionares. A pesar de esto, la gran mayoría de las células amacrinas son **interneuronas** que analizan las señales visuales antes de que abandonen la retina, algunos de estos procesos son:

- Responder de forma potente al inicio o final de una señal continua pero extinguir esta respuesta de manera rápida (similar a un mecanorreceptor AR)
- Indicar un cambio de iluminación
- Responder al movimiento de un punto en una dirección específica.

2.4.5 Células ganglionares

La mayoría de células ganglionares (P y M) poseen campos receptores de Centro/ Periferia y su tipo dependerá de qué tipo de células bipolares son las que le anteceden. Otro tipo (W) posee campos grandes y difusos. **Su función es convertir los estímulos electrotónicos en potenciales de acción.** La intensidad del estímulo luminoso será representado por la frecuencia de PA:

Es importante mencionar que **los campos receptores cercanos a la fóvea son más pequeños** con el fin de aumentar la agudeza visual, en esta región mientras que en la **periferia estos son más extensos** y, por lo tanto, son más sensibles a la **luz tenue**.

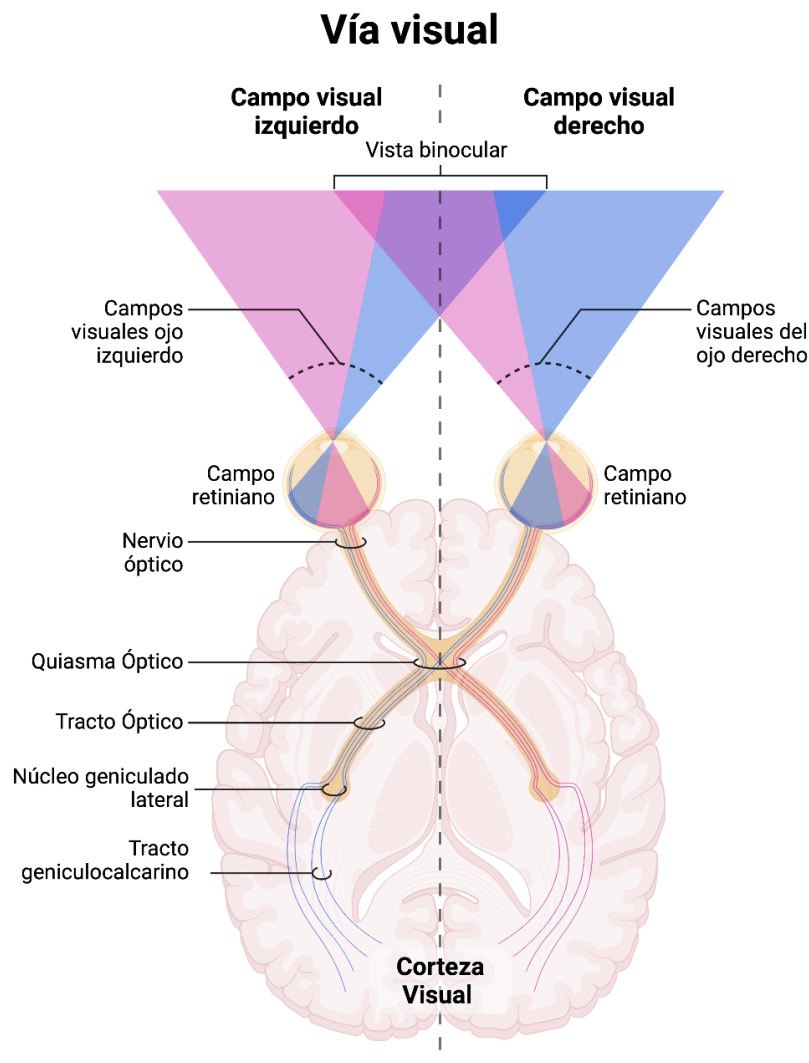
Tipo de células ganglionares

Células P: Tamaño mediano. Se proyectan hacia las capas **parvocelulares** del Núcleo Geniculado Lateral (NGL). Transmiten información sobre el **color, forma y detalles** precisos del objeto

Células M: Tamaño grande. Se proyectan hacia las capas **magnocelulares** del NGL. Transmiten información sobre **luminosidad y movimiento**

Células W: Tamaño pequeño. Velocidad lenta. Transmiten información del movimiento direccional y visión escotópica

2.4.6 Vía visual



Núcleo geniculado lateral

Funciones:

1. Transmitir la información de manera ordenada **desde el tracto óptico hacia la corteza visual** por medio de la radiación óptica

Se compone de seis capas nucleares organizadas que van desde su porción ventral a la dorsal

- Capas con Neuronas Magnocelulares: 1 y 2
- Capas con Neuronas Parvocelulares: 3, 4, 5 y 6

En el tracto óptico una mitad de las fibras provienen del ojo ipsilateral y la otra mitad proviene del ojo contralateral, El núcleo geniculado distribuye cada ojo en las capas, correspondiendo a cada uno una capa magnocelular y dos parvocelulares:

- Ojo ipsilateral: 2, 3 y 5
- Ojo contralateral: 1, 4 y 6

2. **Filtra la información** por medio de dos fuentes que inhiben el paso de estímulos que no se consideren relevantes: Fibras corticófugas provenientes de V1 y zonas reticulares del mesencéfalo.

Corteza visual primaria (V1)

Localización: Cisura calcarina/ **Área de Brodmann 17**

Se compone de 6 capas. En la **capa 4** las fibras de la radiación óptica hacen sinapsis con las neuronas de dicha capa (**IVC α** para la **vía magnocelular** y **IVC β** para la **vía parvocelular**) La información que llega a la capa 4 se propaga de forma vertical hacia arriba y hacia abajo. Los impulsos que llegan a las capas 1, 2 y 3 se transmiten de forma lateral y con poca distancia, mientras los impulsos que terminan en las capas 5 y 6 se transmiten a distancias largas

La organización de V1 es retinotópica: la orientación de las neuronas corresponde con la orientación de los fotorreceptores en la retina. V1 se divide como un mosaico, cada división corresponde a una unidad funcional

- **Unidad funcional: Hipercolumna/Módulo.** Se compone de dos columnas de dominancia ocular, cada una con sus respectivas columnas de orientación y manchas de color
- **Columna de dominancia ocular:** Grupo de columnas de orientación que responden de manera preferencial a un ojo. Se organizan alternando la visión de cada retina, es decir, una columna adyacente responde al ojo contrario, esta disposición tiene como objetivo lo siguiente:
 - Intercambiar información de cada ojo para verificar si existe **concordancia** entre las zonas respectivas de las imágenes visuales originadas en cada ojo, y en caso de que no sea así, corregir la mirada direccional de ambos ojos para **fusionarlos**.

- Percibir la profundidad de los objetos al comparar las imágenes de cada ojo, generando la visión tridimensional o **estereopsis**.
- **Columna de orientación:** Grupo neuronal que responde con mayor intensidad a un estímulo con una orientación determinada. Las columnas van alternando su orientación cada **10°** hasta cubrir los **360°**
- **Manchas de color:** Columnas especializadas. Citocromo oxidasa Reciben señales de la capa IVa y IVcβ, se consideran las **zonas primarias para descifrar el color**.

Las células detectan los **contrastes** en la escena visual, sean contrastes en la intensidad de la iluminación o de colores, por lo cual, la actividad de sus neuronas será mayor en los **bordes** de dicha escena.

Tipos celulares

Células simples: Detectan la **dirección de líneas y de bordes**

Células complejas: Reciben estímulos de un grupo de células simples con la misma orientación y posicionadas a lo largo de una línea recta. Detectan el **movimiento** de una línea orientada en una dirección pero **sin tener una posición específica**. Además, participan en la **visión binocular** porque reciben información de ambos ojos.

Células hipercomplejas: Inhibición terminal **parcial**. Su campo receptor consiste en una **región excitadora adyacente a una inhibidora**, producto de la sinapsis con dos células complejas.

Células hipercomplejas de orden superior: Inhibición terminal **total**. Su campo receptor consta de una **región excitadora central y dos inhibidoras a los lados**, por lo que hace sinapsis con **3 células complejas**

Ambos tipos de células hipercomplejas tienen como función detectar **curvas, vértices y límites de los estímulos**

Corteza visual de asociación

Además de V1 se han identificado al menos 25 áreas visuales diferentes en la corteza cerebral. La información que sale de V1 y llega a la corteza visual de asociación se divide en 2 vías:

1. **Análisis de la posición tridimensional, la forma física global y el movimiento de los objetos:** Proviene de las células M
V1 - Área temporal media posterior - Corteza occipito parietal
2. **Análisis de los detalles visuales** (identificación de letras, la lectura, determinación de la textura de los objetos, **colores** detallados y descifrar qué es y qué significa un objeto): Proviene de las células P.

V1 - Regiones inferiores, ventrales y mediales de las cortezas occipital y parietal

2.4.7 Otras vías visuales

Colículo superior (CS)

Las **capas superficiales** del CS reciben aferencias de la retina y V1. Participan en la respuesta a estímulos visuales: envían señales hacia los núcleos pulvinar y lateral posterior del tálamo, los cuales pasan por la corteza cerebral y se dirigen hacia las capas intermedias y profundas del CS

Las **capas intermedias/profundas** reciben información visual de V1, la corteza temporal medial y la corteza parietal. En estas capas existen configuraciones somatotópica, tonotópica y **retinotópica**, todos relacionados entre sí, con el fin de **guiar los movimientos oculares hacia el estímulo visual**.

Las neuronas de la capa intermedia de la porción rostral del CS facilitan la fijación de la mirada

La función motora del CS es activada por dos zonas de la corteza cerebral, y es inhibida por la sustancia nigra pars reticular del mesencéfalo, esta regulación del CS será detallada en la sección de movimientos sacádicos

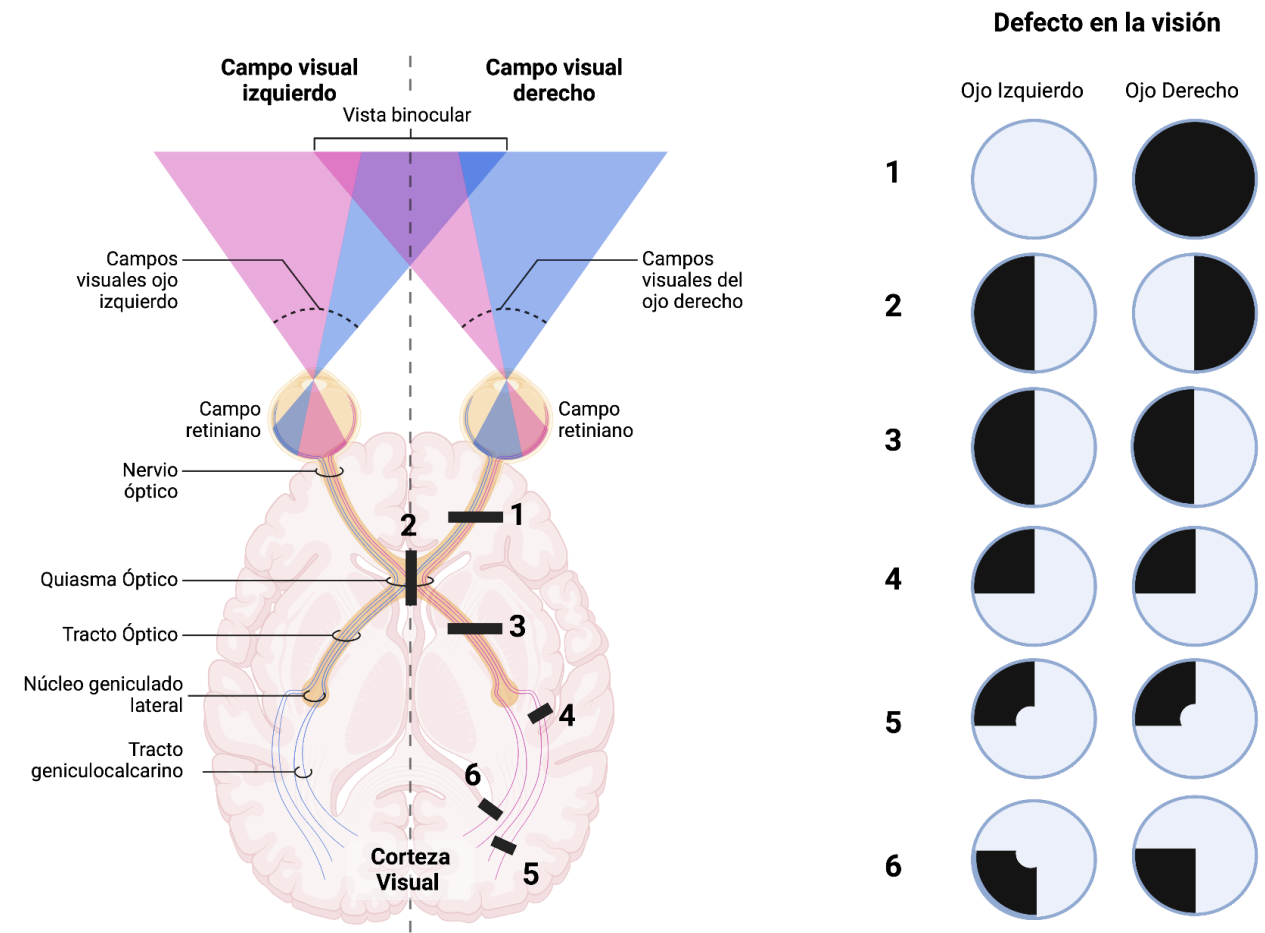
Núcleo pretectal

Recibe aferencias de la retina, participa en el reflejo fotomotor y el reflejo consensual los cuales se detallarán más adelante

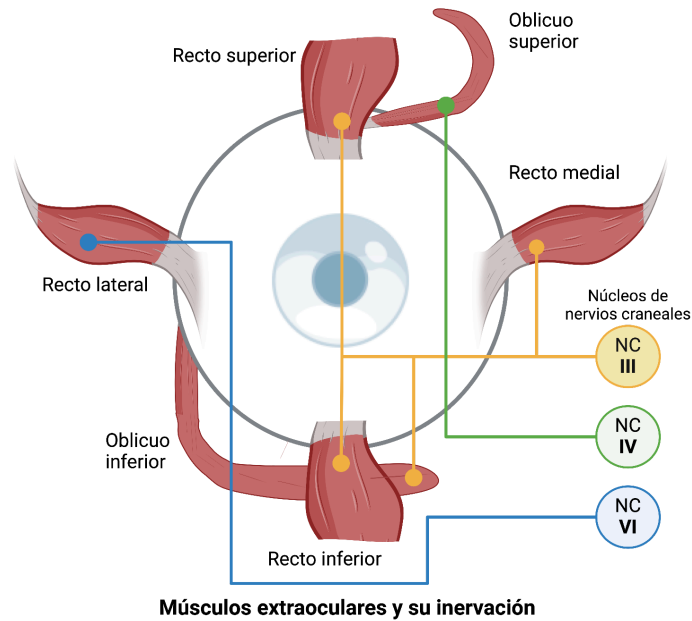
Núcleo supraquiasmático

Se encarga del control de los ritmos circadianos, secreción hormonal y actividad autónoma. Su aferencia proviene de las ipRCG, las cuales llegan por el haz **retinohipotalámico**.

Lesiones de la vía visual



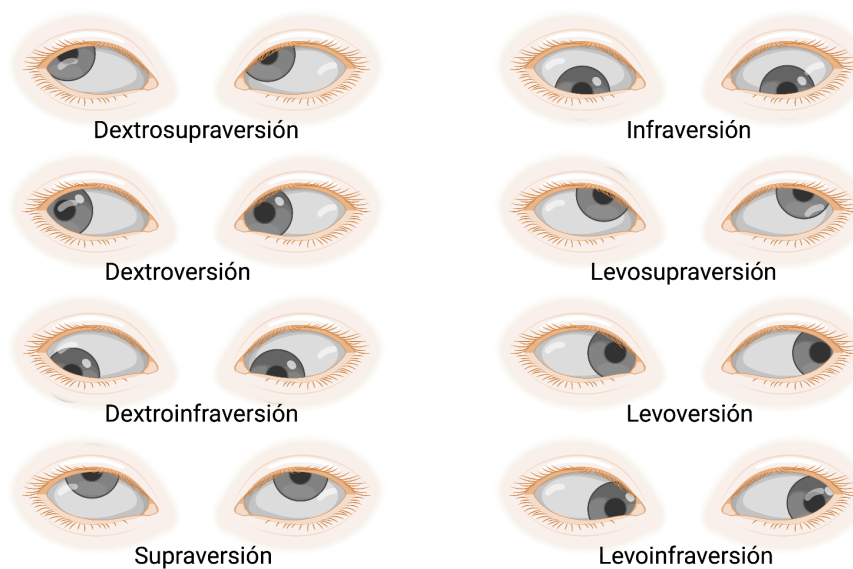
2.4.8 Movimientos oculares



Movimientos conjugados

Son movimientos de ambos ojos que van en la misma dirección y tienen la misma magnitud. Son producidos por los movimientos sacádicos y de persecución. El fascículo longitudinal medial es el centro de integración de la visión binocular, ya que forma un papel crucial en la conexión entre los tres nervios craneales encargados del movimiento de los ojos.

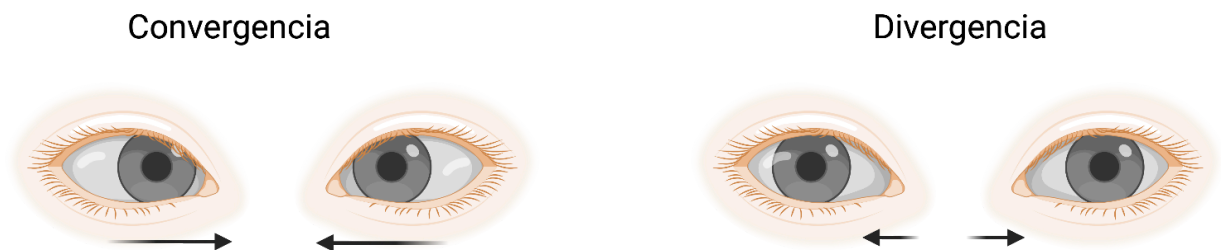
Movimientos conjugados de los ojos



Movimientos de vergencia

Son movimientos no conjugados de los músculos recto medial y recto lateral, tienen como objetivo **alinear la fóvea de cada retina para observar objetos a distintas profundidades**. Trabajan en conjunto con el reflejo de acomodación para realizar esta función.

Visión cercana	Visión lejana
Contracción de los rectos mediales . Los ojos rotan hacia el otro/hacia el lado nasal (convergencia).	Contracción de los rectos laterales . Los ojos rotan hacia el lado temporal/ se alejan uno del otro (divergencia).



Movimientos reflejos

Movimientos oculares sacádicos

Movimientos discretos y extremadamente rápidos que dirigen la fóvea de un punto de fijación a otro para aumentar su resolución. Estos movimientos nos permiten **leer y explorar el entorno**.

El campo visual frontal (Área de Brodmann 8) tiene como función tomar la decisión consciente de realizar una sacada. La corteza lateral intraparietal (Área de Brodmann 7) se encarga de la atención a estímulos visuales, regulando el número de sacadas y su precisión.

Estas áreas controlan la función motora del colículo superior, el campo visual frontal envía estímulos excitadores por medio de una vía directa y otra indirecta, esta se lleva a cabo con la activación del núcleo caudado, el cual libera al colículo de la inhibición de la sustancia nigra pars reticular (circuito de los ganglios basales). Posteriormente, el colículo tendrá como objetivo liberar los centros de origen de los movimientos sacádicos de la inhibición de neuronas omnipausa (las cuales tienen como función

evitar la generación de movimientos sacádicos indeseables), localizadas en el núcleo dorsal del rafe.

Tipos de movimientos sacádicos	
Horizontal	Vertical
Se origina en la Formación Reticular Paramediana Pontina (FRPP) El estímulo que genera este núcleo tiene dos componentes: Velocidad: consiste en estímulos de movimiento. Unas señales activan al núcleo del VI ipsilateral e inhiben el, contralateral, resultando en el movimiento del recto lateral ipsilateral, por otra parte, una señal activadora se dirige hacia el núcleo del III contralateral y produce el movimiento del recto medial contralateral. De esta forma ambos ojos miran hacia el mismo lado, sea derecha o izquierda Posición: consiste en un grupo de núcleos (núcleo vestibular medial, núcleo prepósito del hipogloso y el flóculo del cerebelo) que integran las señales de velocidad, con el objetivo de fijar la mirada en el estímulo visual que inició la sacada.	Se origina en la Formación Reticular Mesencefálica (FRM), específicamente en el núcleo intersticial rostral del FLM La comisura posterior comunica la FRM de un lado con la contralateral, esto es importante ya que la sacada vertical requiere la participación bilateral de ambos núcleos. El núcleo intersticial de Cajal integra el componente de velocidad para fijar la mirada (componente de posición)

Movimientos oculares de persecución

Movimientos que mantienen la imagen objetivo en fovea, se produce posteriormente a un movimiento sacádico que fija el objeto de interés.

La corteza temporal medial y la temporal superior medial calculan la velocidad del objeto. El campo visual frontal se encarga de iniciar el movimiento de persecución ipsilateral.

Estas áreas de la corteza envían aferencias hacia el **núcleo dorsolateral pontino**, y este a su vez lo hará hacia el **cerebelo (flóculo y vermis)**, el cual hará una correlación

entre la velocidad de los ojos con la del objeto y ajustará la velocidad del movimiento de persecución

Finalmente, el **núcleo vestibular medial** y el **núcleo prepósito del hipogloso** reciben aferencias del cerebelo. Ambos contienen neuronas que dictan la velocidad del ojo para perseguir el objeto, sus proyecciones llegan al núcleo del III, del IV y del VI para ejecutar el movimiento.

Micronistagmos

Temblor continuo con una frecuencia de 30-80 ciclos/s causado por las contracciones de las unidades motoras en los músculos extraoculares

2.4.9 Reflejos

Reflejo fotomotor

El diámetro de la pupila se ajusta como respuesta a la cantidad de luz que llega al ojo.

Este reflejo es **parasimpático** y produce **miosis**, es decir, contracción de la pupila, el mecanismo es el siguiente: cuando la luz llega a la retina, esta envía la información que viaja por el tracto óptico ipsilateral hacia **los núcleos pretectales**, los cuales activarán al **núcleo de Edinger-Westphal**, el cual enviará fibras por el NC III, harán sinapsis en el ganglio ciliar y los axones de las neuronas posganglionares viajarán por los nervios ciliares cortos hacia el **músculo esfínter de la pupila**.

En contraposición, el Ganglio Cervical Superior (SNS) inerva el **músculo dilatador de la pupila** produciendo **midriasis**.

Reflejo consensual

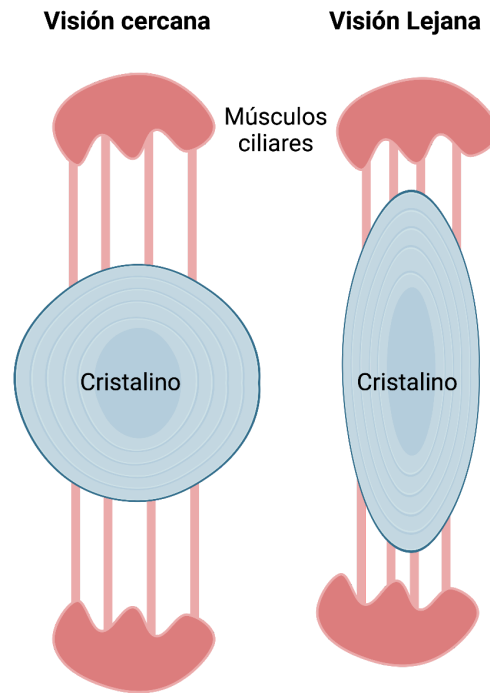
Los **núcleos pretectales** de un lado y de otro están interconectados por medio de la comisura posterior, por lo cual, **al incidir la luz por una retina** provocará la **miosis en ambas pupilas**.

Reflejo de acomodación

Reflejo **parasimpático**, su objetivo es **modificar el poder dióptrico del cristalino para enfocar adecuadamente los rayos de luz sobre la retina y mejorar la definición**.. Este reflejo consiste en realizar un movimiento de convergencia, modificar la curvatura del cristalino (abombamiento o aplanamiento) y ajustar el tamaño de la pupila.

Este reflejo utiliza el mismo circuito neuronal del reflejo fotomotor, pero su objetivo final es el **músculo ciliar**, el cual se encarga de modificar la curvatura del cristalino al cambiar la tensión del ligamento suspensorio del cristalino.

- **Visión cercana** → Contracción del músculo ciliar → Disminuye tensión del ligamento → Contracción del cristalino (abombamiento) → Mayor poder dióptrico
- **Visión lejana** → Relajación del músculo ciliar → Aumenta tensión del ligamento → Relajación del cristalino (aplanamiento) → Menor poder dióptrico



A medida que se envejece el cristalino va perdiendo la capacidad de modificar su curvatura, dificultando la visión cercana, este padecimiento se denomina **presbicia**. Los **lentes bifocales** tienen la capacidad de suplir la acomodación y poder ver objetos cercanos.

Reflejo corneal

Cuando se estimula la córnea de forma suave se produce un parpadeo acompañado del movimiento de los ojos hacia arriba. El mecanismo neuronal es este:

El NC V1 (rama oftálmica) inerva sensitivamente la córnea, las aferencias llegan al **núcleo espinal del trigémino**, luego a la **formación reticular** que se encuentra adyacente al **núcleo motor de VII**, el cual enviará señales bilaterales a las **neuronas motoras del este núcleo** que inervan al músculo orbicular del ojo ocasionando el parpadeo, además, llegarán señales hacia el **núcleo oculomotor** para elevar los ojos.

Reflejo palpebral

Parpadeo provocado por la **percepción brusca** de un **objeto acercándose al ojo**. El mecanismo neuronal varía, pero el resultado es similar al reflejo corneal.

2.5 Sistema auditivo y vestibular

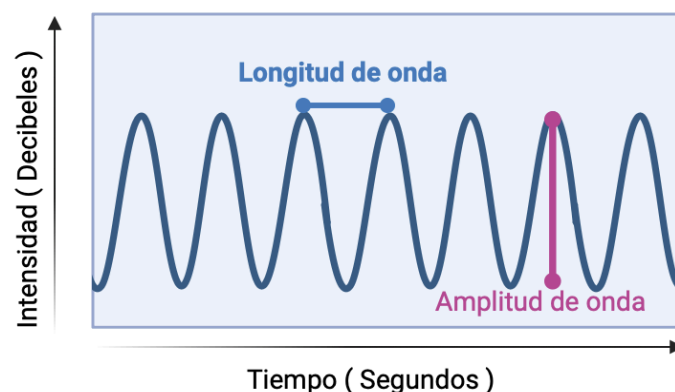
2.5.1 Sistema Auditivo

El sonido

El oído es el órgano encargado de la audición (y del equilibrio). La audición es la transducción de la energía que transportan las ondas sonoras para que pueda ser interpretada por el sistema nervioso central. **La energía mecánica de las ondas sonoras debe transformarse en energía eléctrica** para transmitirse por vías nerviosas.

Las ondas sonoras son resultado de la fluctuación de la presión a la que son sometidas las moléculas que conforman el medio que las transporta, como aire o agua. El pico de onda representa el aumento de presión (compresión) ejercida en moléculas de aire o agua, y el valle, el descenso de presión (descompresión) en esas mismas moléculas.

Caraterísticas de las ondas sonoras

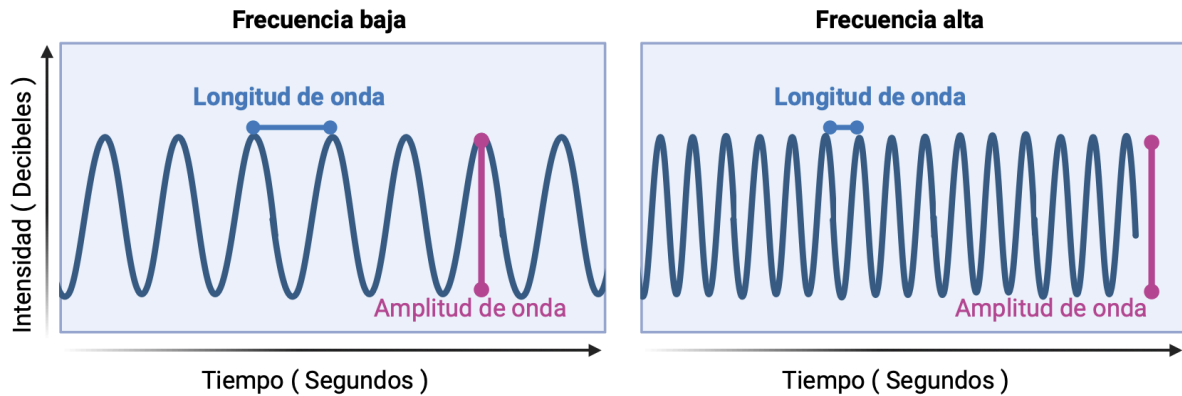


El sonido, es la interpretación por el sistema nervioso central de las características de las ondas sonoras.

Frecuencia de onda

Es el número de crestas por unidad de tiempo, otorga al sonido un **tono**. El Hertzio (Hz) mide el número de ondas (ciclos) por segundo. El ser humano percibe sonidos con frecuencias de **20 a 20,000 Hz**.

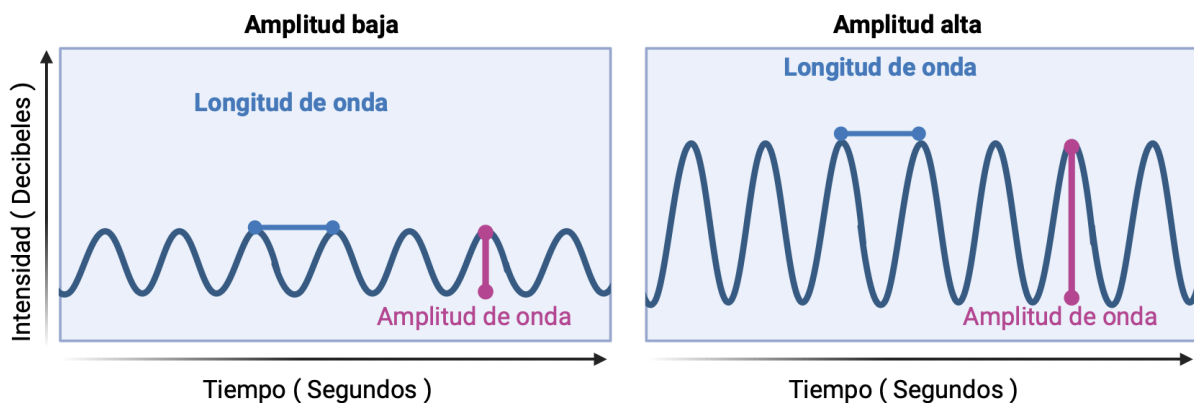
Altas frecuencias, son interpretadas como **tonos altos**, como el pitido de un silbato, y las **bajas frecuencias** como **tonos bajos**, como el producido al golpear un tambor.



Amplitud de onda

Es el punto más alejado de la onda (altura de la onda) ya sea en una cresta o valle, respecto a un punto de equilibrio (presión 0). Otorga al sonido una **intensidad (volumen)**. El **decibelio (dB)** mide en escala logarítmica, la intensidad de una onda.

El habla humana se encuentra en un rango de 60-65 bB. Los sonidos con dB superiores a 80, son potencialmente lesivos para los receptores auditivos.



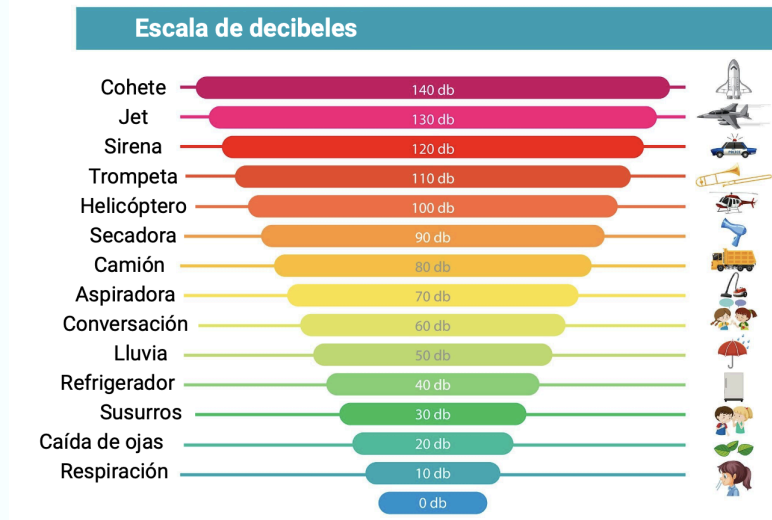
Umbral auditivo y audiograma

El umbral auditivo indica el **nivel más bajo de sonido que una persona puede detectar**. Es decir, señala el punto en el que una persona empieza a notar un sonido específico. La detección de la gran variedad de sonidos está en función de los Hz y los dB que los componen.

Decibelio (dB)

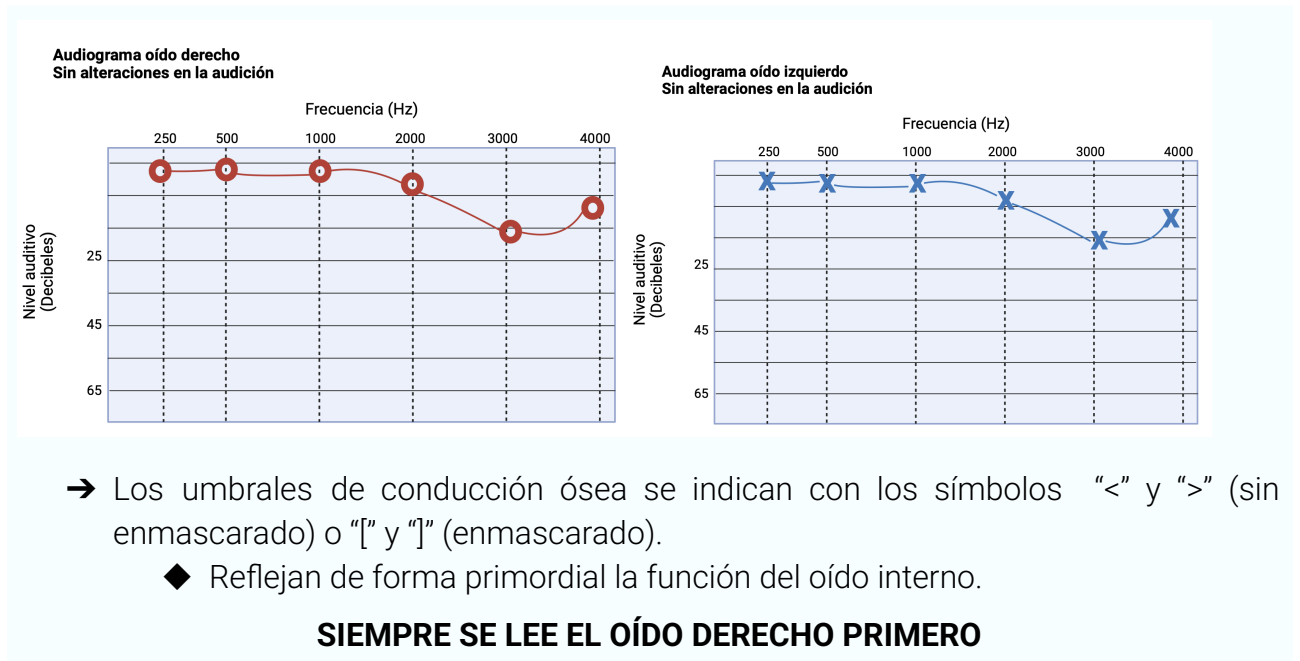
Unidad en escala logarítmica que resulta de la división de la presión sonora en pascuales entre la presión sonora de referencia (tono puro) que es perceptible para el oído humano.

- dB = UNIDADES DE PRESIÓN (Watts/cm²)
- El "0" NO equivale a la ausencia de sonido (10⁻¹⁶ Watts/cm²)



Notación en el audiograma:

- La audiometría que se representa en un audiograma, es una prueba que se utiliza en la práctica clínica para estimar la audición de una persona. Consiste en reproducir una serie de diferentes sonidos, para así determinar el umbral en dB para diferentes frecuencias (Hz). Al establecerse una frecuencia determinada en el audiómetro, el evaluador elevará progresivamente el tono del sonido, y solicitará al paciente que indique el momento en que percibe dicho sonido. Los resultados del estudio se comparan con una audiometría estandar para la edad y el sexo del paciente para determinar si existe afectación en la audición del paciente.
- Los umbrales de **conducción aérea** del **oído derecho** se marcan en el audiograma con una **"o" (rojo)**; los del **oído izquierdo** con una **"x" (azul)**.

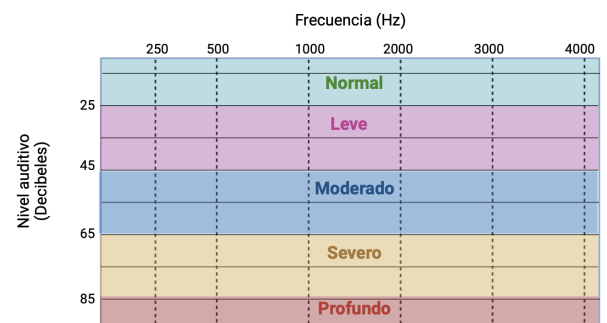


Normalidad del audiograma

Umbral de audición **Interpretación**

0-25 dB	Normal	Audición dentro de límites normales
26-50 dB	Pérdida leve	Dificultad con sonidos suaves, ruidos de fondo y a cierta distancia de la fuente de sonido.
51-70 dB	Pérdida auditiva moderada	Dificultad para escuchar una conversación, se apoya de señales visuales.
71-90 dB	Pérdida auditiva severa	No escucha una conversación y pierde los sonidos del lenguaje, no escucha ladridos ni música ruidosa.
>91 dB	Pérdida auditiva profunda	Escucha solo sonidos muy fuertes como taladros hidráulicos.

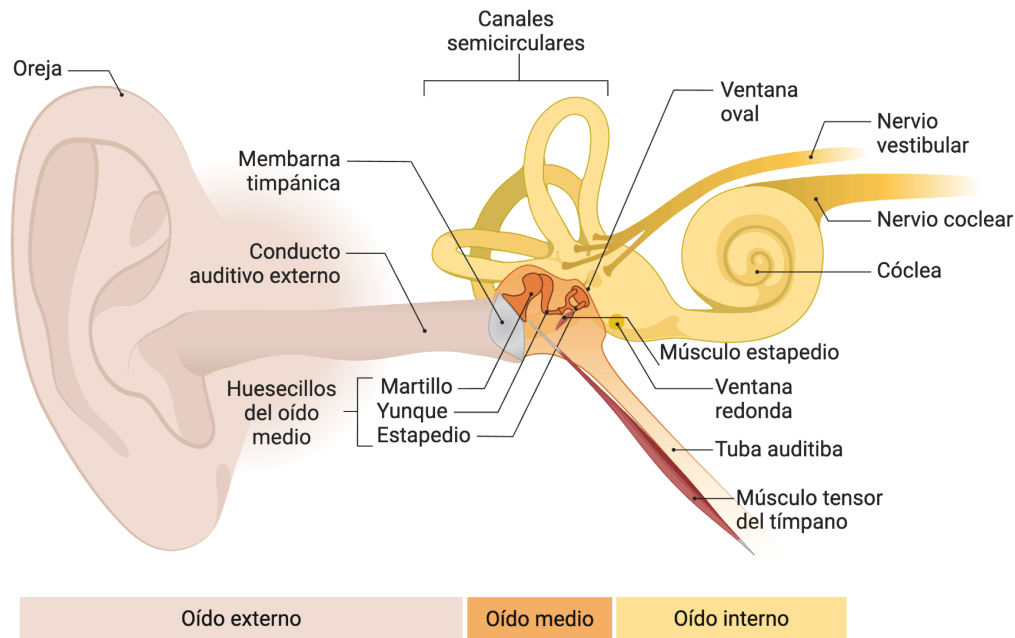
Audiograma y escala de gravedad de déficit auditivo



El oído humano, tiene alta sensibilidad, o umbral bajo, para sonidos puros con frecuencias de **2000 a 5000 Hz**. De hecho, el habla humana tiene una frecuencia de 300-3500 Hz, y para que este sonido sea percibido, se necesitan tan sólo 65 dB. O sea, no se necesita demasiada intensidad (volumen) para percibir el discurso de las

personas. En cambio, para frecuencias bajas como 100 Hz (tonos muy bajos o graves) se necesita una intensidad de hasta 10,000 veces mayor.

2.5.2 Transducción del sonido



Oído externo

La **oreja** actúa a modo de embudo para **dirigir las ondas** sonoras hacia el conducto auditivo externo (CAE) y contribuye a **localizar la fuente** del estímulo sonoro en el medio externo. Como el CAE está lleno de aire, facilita la propagación de ondas, y con su forma tubular las concentra sobre la membrana timpánica (MT), a la que hacen vibrar.

El **CAE participa también en la resonancia (aumento de amplitud de onda)** de sonidos con frecuencias de 2000-3500 Hz, dando un umbral auditivo bajo para dichas frecuencias.

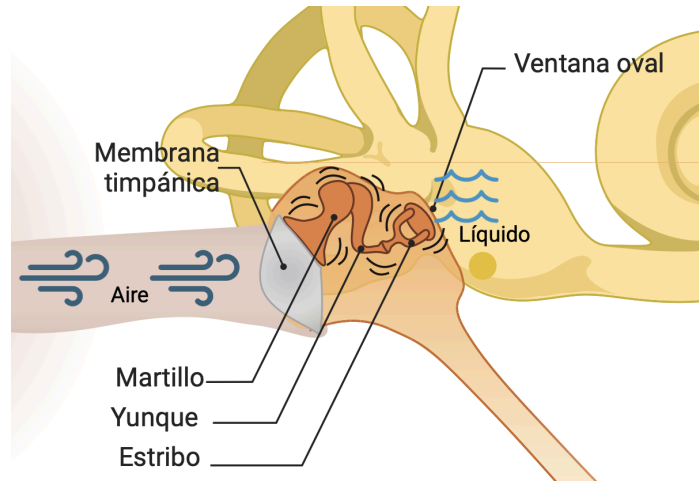
Oído medio

Las ondas sonoras hacen vibrar la MT y esta transmite el movimiento hacia la cadena osicular, que con **su organización en palanca aumenta la fuerza** (no la distancia) de la vibración, **disminuyendo la impedancia** del sistema auditivo, que es la resistencia u oposición a la transmisión de las ondas sonoras.

El aire y el líquido muestran impedancia, pero la del líquido en oído interno es mayor que la del aire (el fluido tiene más inercia) y por tanto necesita que se le aplique una fuerza mayor para que pueda transmitir las ondas sonoras. **La MT y la cadena osicular reducen la impedancia del sistema auditivo, porque contribuyen a crear**

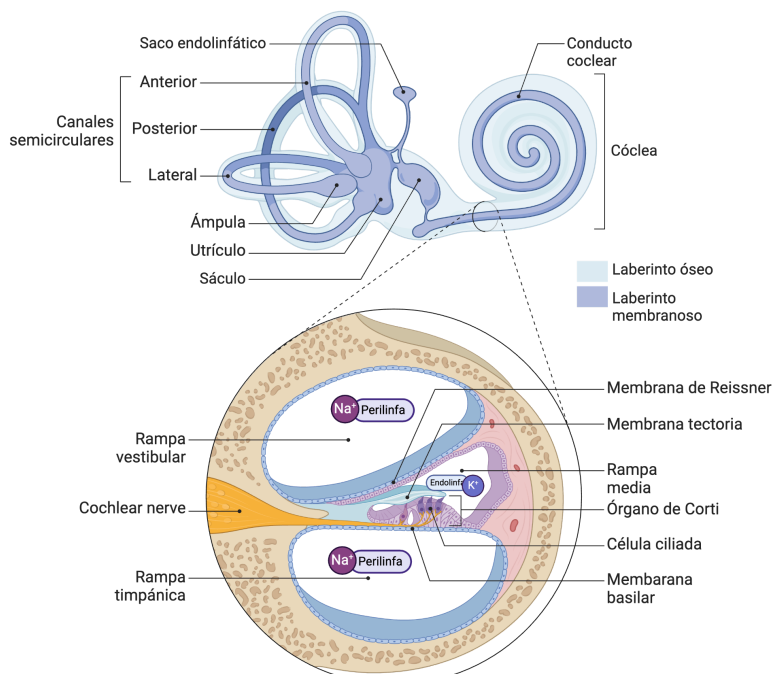
una gran fuerza que se aplicará sobre el área de la membrana oval (MO), para subsecuentemente, crear ondas de presión significativas en la perilinfa del oído interno (cuando la base del estribo hace vibrar la MO hacia “adentro” o hacia “afuera” del laberinto membranoso, “empuja” o “tira” de la *perilinfa*). Esto es llamado **ajuste de impedancias entre aire y líquido coclear**.

Considerando que la MT tiene un área de superficie 17 veces mayor al área de la MO, puede comprenderse que la presión que se desarrolla en la MO es mayor en comparación con la desarrollada en la MT a partir de una misma onda sonora, porque si se aplica una fuerza sobre una pequeña área, se desarrollará más presión sobre ella que si se aplicase esa misma fuerza a un área grande. Esto contribuye también al ajuste de impedancias.



La transmisión sonora puede modificarse con la contracción de un par de músculos, como en el **reflejo de atenuación**. Cuando se activa el **músculo del estapedio (NC VII)**, tira del estribo y lo aleja de la MO, y cuando se activa el **músculo tensor del tímpano (NC V)**, tira del martillo y lo aleja de la MT. Ambas acciones comprimen la cadena osicular y la hacen rígida, **disminuyendo la intensidad de transmisión de ondas** al oído interno. Este reflejo tiene un efecto protector sobre la cóclea, pues se presenta ante sonidos de alta intensidad que podrían lesionar las células del oído interno.

Oído interno



El **laberinto membranoso**, está dividido en tres diferentes rampas: la timpánica, la vestibular y la media.

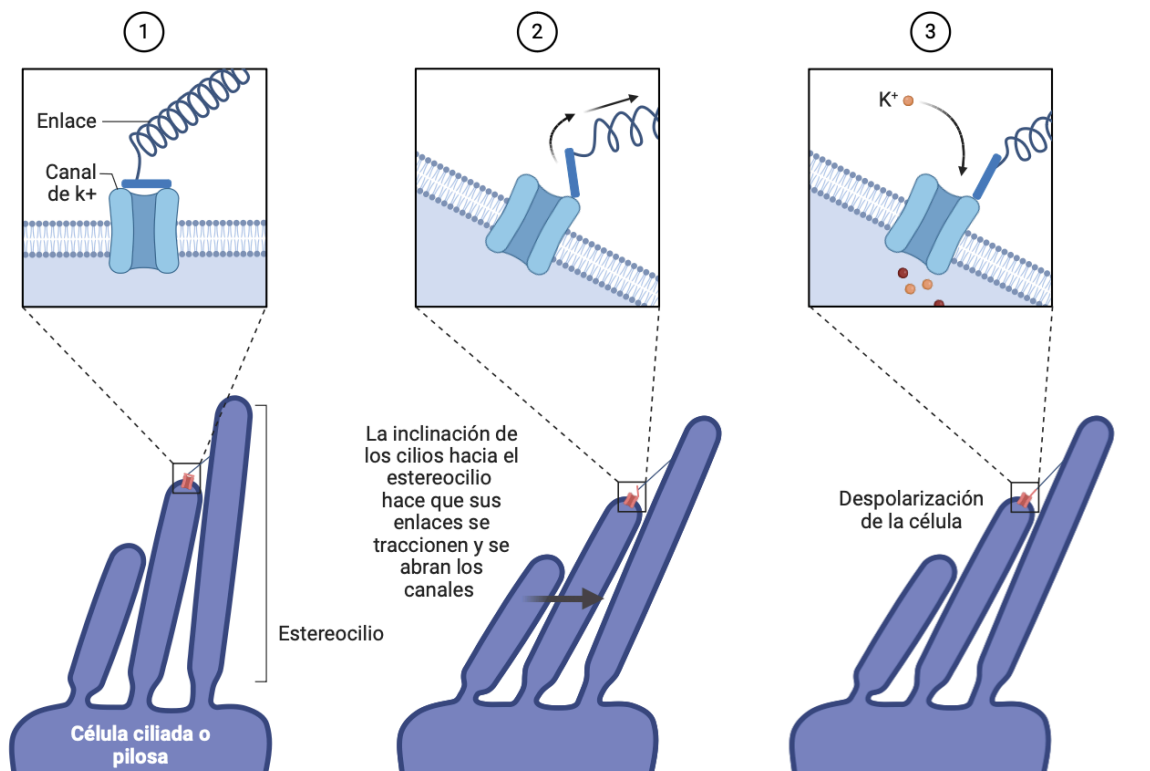
Las **células ciliadas** (pilosas) están **alineadas a lo largo de la membrana basilar**, y sus estereocilios (polarizados en tamaño) están en contacto con la membrana tectoria. Como la rampa media contiene endolinfa, las

células están rodeadas por este líquido, que tiene una gran concentración de K^+ . Los estereocilios tienen en su ápice canales de K dependientes de fuerza mecánica (**mecanorreceptores**), cuyas compuertas están unidas a las compuertas de los canales en estereocilios adyacentes por la "proteína de unión de extremo".

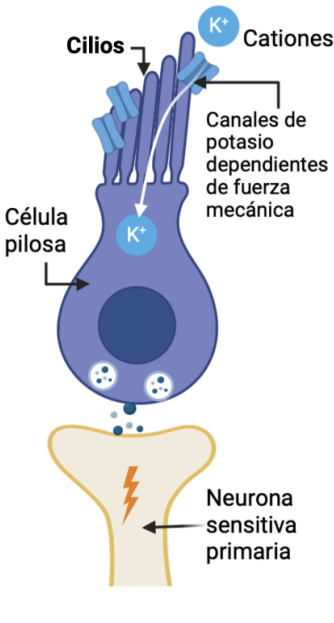
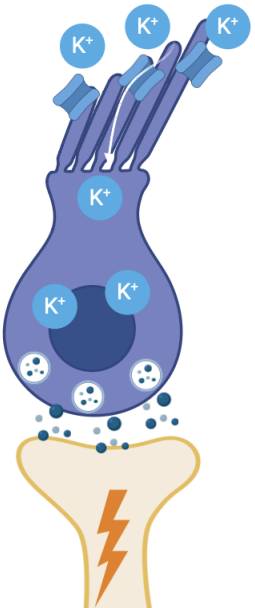
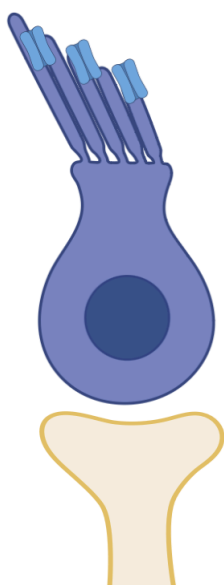
Cuando la MO protruye al interior de la rampa vestibular, se crean ondas de presión que viajan en la perilinfa (**ondas viajeras**) que **eventualmente harán vibrar la membrana basilar**, moviéndola hacia arriba, hacia abajo y hacia los lados en forma repetida. Con la vibración, las células ciliadas son empujadas hacia la membrana tectoria, y los estereocilios pueden inclinarse en dos direcciones:

- **Hacia el estereocilio de mayor tamaño (deformación positiva)**, las compuertas de los canales de K en todos los cilios se abren, el K entra a la célula, y comienza su despolarización, generando un **potencial microfónico coclear**.
- **En dirección opuesta al estereocilio de mayor tamaño (deformación negativa)**, las compuertas de los canales de K en todos los cilios se cerrarán, y la célula se **hiperpolariza**.

De las dos agrupaciones de células ciliadas, **solo las internas se activarán en respuesta a ondas sonoras**. Las células externas, en cambio, reciben señales del tronco encefálico mediante el NC VIII. Se propone que estas señales participan en la regulación de la sensibilidad de las células internas, un mecanismo nervioso retrógrado que controlaría la sensibilidad a diversos tonos de sonido.



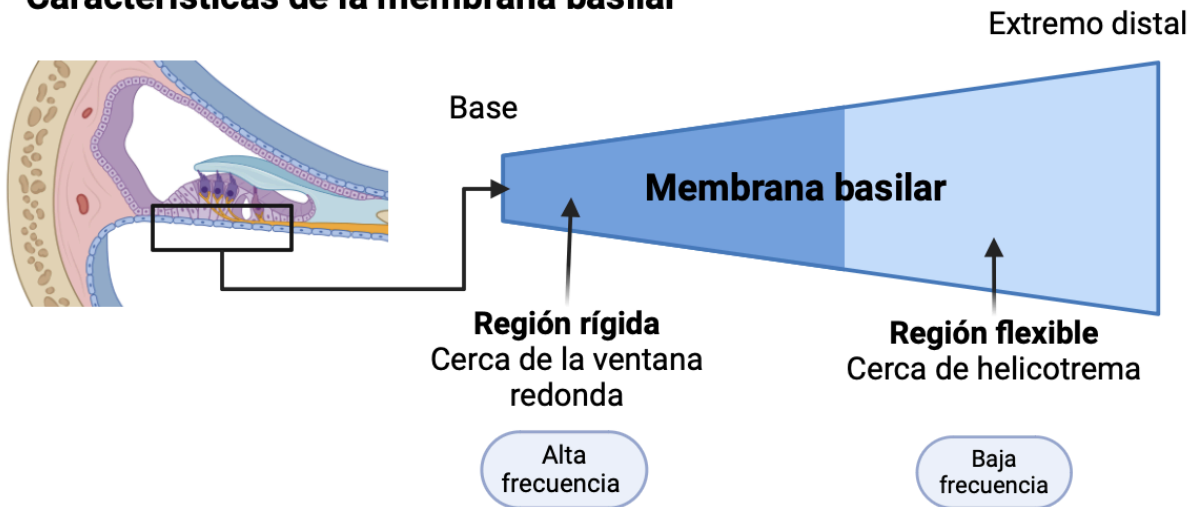
La despolarización e hiperpolarización celular se llevan a cabo de manera intermitente, porque la vibración favorece ambos efectos. En la despolarización, se activan canales membranales de Ca, lo que permite la exocitosis de **glutamato** en la porción celular basal, para dar paso a la primera sinapsis de la vía auditiva, entre la célula ciliada y fibras nerviosas aferentes del nervio coclear.

Reposo	Excitación	Inhibición
Alrededor del 10% de los canales de K⁺ asociados a los cilios , están abiertos y la neurona sensitiva envía una señal.	Cuando los estereocilios se flexionan al estereocilio más grande, se abren más canales de K⁺ y la célula se despolariza , lo que aumenta la frecuencia de potenciales de acción en la neurona sensitiva.	Si los estereocilios se flexionan en la dirección opuesta al estereocilio más grande, los canales de K⁺ se cierran y la célula se hiperpolariza , y la señal de la neurona sensitiva disminuye.
		

Organización tonotópica del sistema auditivo

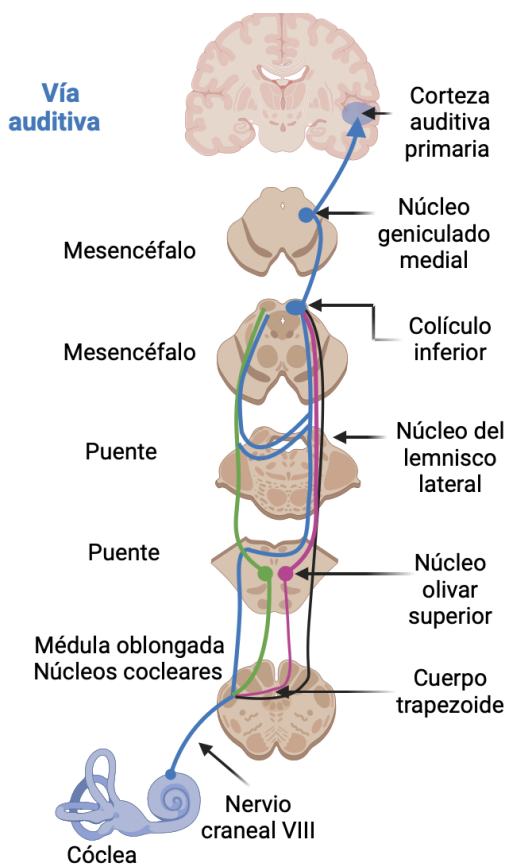
La activación de las células ciliadas obedece a la especificidad de frecuencias de onda que hacen vibrar segmentos, también específicos, de la membrana basilar subyacente. Esta activación segmentaria, se relaciona con la arquitectura de la membrana basilar.

Características de la membrana basilar



Se establece entonces que **la membrana basilar es un primer analizador de frecuencias**, porque solo grupos particulares de células ciliadas internas, y por tanto, de sus correspondientes fibras nerviosas, se activan a una frecuencia de onda particular, dependiendo de su ubicación a lo largo de esta membrana, lo que es la base de la **teoría espacial de la audición**.

2.5.3 Vía auditiva



Las neuronas de los **nervios cocleares** hacen sinapsis en los **núcleos cocleares** posterior y anterior de la médula oblongada con neuronas de segundo orden, cuya mayoría cruzan al lado contralateral para alcanzar el **núcleo olivar superior**, formando con su decusación al cuerpo trapezoide (unas pocas fibras continúan su trayecto ipsilateral). De este núcleo, surge el **lemnisco lateral**, que lleva la información auditiva hasta el **colículo inferior** mesencefálico, que se proyecta hacia el **cuerpo geniculado medial** talámico. El tálamo envía entonces la información a la corteza cerebral, **al área auditiva primaria (41 y 42 de Brodmann)**, en el giro temporal superior.

Los núcleos de relevo, los fascículos y áreas cerebrales correspondientes a la audición tienen una organización tonotópica. Por ejemplo, sonidos agudos activan neuronas en el extremo posterior de las áreas cerebrales 41 y 42, mientras que sonidos graves activan el extremo anterior. Esto demuestra, que **patrones sonoros particulares activan solo ciertas regiones de las estructuras encargadas de procesar la información auditiva.**

La información auditiva procedente de ambos oídos tiene un **trayecto bilateral** al interior del SNC, pero la información proveniente de un oído (izquierdo o derecho) , recorre el SNC **principalmente de manera contralateral**, de manera tal que...

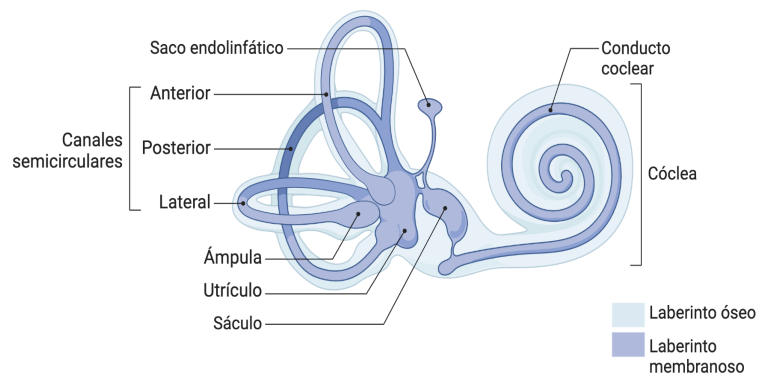
- La lesión bilateral del área auditiva primaria reduce considerablemente la capacidad de audición.
- La lesión unilateral del área auditiva primaria disminuye la sensibilidad a la audición en el oído contralateral, pero no causa sordera.

El **área auditiva de asociación (22 de Brodmann)**, que recibe impulsos del área auditiva primaria, en el giro temporal superior posterior, es necesaria para la **interpretación del sonido**. Su lesión no causa disminución en la capacidad de oír, pero provoca incapacidad de otorgar significado al estímulo. La **afasia de Wernicke**, que implica lesión del área cerebral homónima (parte del área auditiva de asociación) se caracteriza por la incapacidad del sujeto de entender lo que escucha.

2.5.4 Sistema vestibular

El sistema vestibular es el responsable de informar al SNC acerca de **fenómenos de aceleración, desaceleración y rotación de la cabeza**, para que éste, con la información sensitiva recibida, envíe señales a la musculatura para modificar la posición y conservar el balance postural.

El órgano vestibular se aloja en el oído interno, dentro de un laberinto membranoso. Se compone de tres conductos semicirculares (horizontal, superior y posterior) y dos cámaras u órganos con otolitos, el utrículo y sáculo. Al igual que la rama coclear, el **laberinto membranoso vestibular contiene endolinfa (K).**



Crestas ampollares de los conductos semicirculares (CSC)

La posición perpendicular de los CSC entre sí, cubre tres dimensiones espaciales en las que la cabeza puede moverse. Por esto **detectan la aceleración angular/rotatoria y contribuyen a mantener el equilibrio dinámico**, cuando la cabeza está en ejecución de movimiento propiamente.

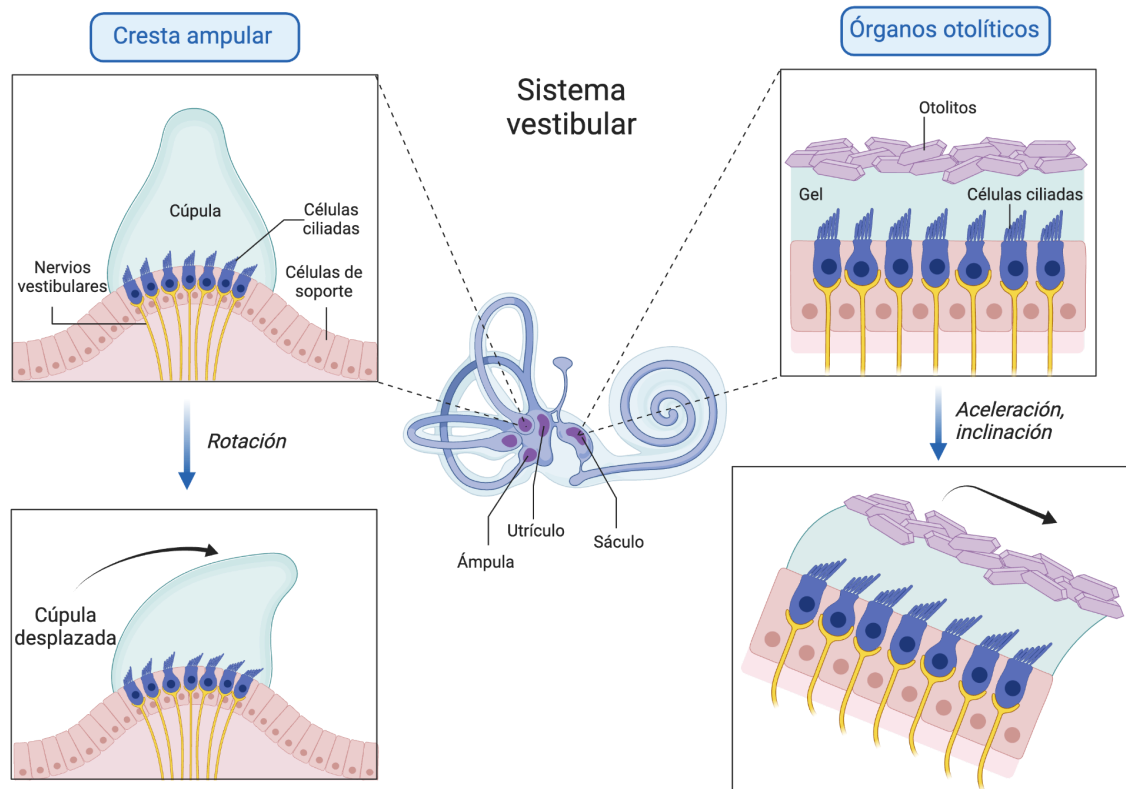
Cada conducto tiene una dilatación llamada ampolla, dentro de la cual se ubica la cresta ampollar/acústica. En el vértice de la cresta está la cúpula, un tejido laxo y gelatinoso, apoyada sobre células ciliadas.

Cuando la cabeza rota, debido a la inercia del líquido, la endolinfa dentro de los CSC no se mueve, pero sí lo hacen los propios CSC. Como resultado, **la cúpula se inclinará en dirección opuesta a la del movimiento del conducto semicircular**, "arrastrada" por la inercia de la endolinfa (como si la endolinfa se moviera en dirección contraria a los CSC).

Como en el órgano de Corti, los cilios de células de la cresta ampollar tienen una organización creciente. Cuando la cúpula, inclinada por la rotación de la cabeza, hace que los **cilios se inclinen hacia el cinetocilio, la célula se despolarizará por entrada de K^+** , y cuando se inclinan en su contra, se hiperpolarizará.

Cada par de canal semicircular se encarga de un plano de movimiento:

- **Conductos horizontales:** Giro horizontal de la cabeza, como al decir "no".
- **Conductos posteriores:** Inclinación izquierda-derecha (ladear la cabeza).
- **Conductos superiores:** Inclinación adelante-atrás, como al decir "sí".



Ejemplo de operación de los conductos semicirculares horizontales

Cuando la cabeza y los conductos rotan a la derecha...

- La endolinfa, por inercia conserva su posición, pero por el movimiento de los CSC, es como si se moviese a la izquierda.
- Considerando la orientación de su cinetocilio, durante el giro, las células del CSC derecho se despolarizan, y las del izquierdo se hiperpolarizan.

Cuando la cabeza y los conductos dejan de rotar...

- La endolinfa, por inercia, seguirá la dirección de rotación de la cabeza y se moverá hacia la derecha.
- Las células ciliadas del CSC derecho se hiperpolarizarán, y las del izquierdo se despolarizarán, lo que seguirá hasta que la endolinfa deje de moverse.

La mácula del utrículo y sáculo

Dentro de las respectivas cámaras del utrículo y el sáculo, se encuentra la **mácula**, que se compone de una **capa de tejido gelatinoso con otolitos/estatoconias** (carbonato de calcio) que reposa sobre células ciliadas. Los otolitos dan a la mácula una **densidad mayor** que la del líquido que la rodea.

El utrículo y el sáculo detectan la aceleración lineal y contribuyen a mantener el equilibrio estático, cuando la cabeza no se mueve propiamente, sino cuando es desplazada con el resto del cuerpo (p. ej. usar el elevador o ir en auto).

- En un sujeto en **bipedestación**, la mácula del utrículo está orientada en plano horizontal, y detecta la aceleración en dicho plano. La del sáculo se orienta en plano vertical y detecta la aceleración en ese plano.
- En un sujeto en **decúbito**, como la orientación de las máculas entre el sáculo y el utrículo se “intercambian”, también lo hacen las direcciones de aceleración detectables por dichas estructuras.

Ejemplo de operación del utrículo:

Al ir en automóvil:

- El auto desplaza la cabeza (y el resto del cuerpo) hacia adelante, y con ella, a la cámara del utrículo
- Como **la mácula tiene una gran densidad**, y también debido a la inercia, en relación al desplazamiento de la cabeza, **se “atrassa”**
- **La mácula se “desplaza” en dirección contraria a la cabeza** (hacia “atrás”).
- Las células ciliadas se despolarizan o hiperpolarizan, acorde a la orientación de su cinetocilio, otorgando un **patrón de actividad único para ese nivel de desplazamiento**.
- Cuando la cabeza deja de desplazarse, se producen los eventos contrarios: la mácula se “desplaza” hacia adelante, y las células adquieren otro patrón de actividad.

A pesar de que los cilios de las células, individualmente, tienen el patrón de orientación “creciente” de sus cilios, las células no están orientadas unas con otras. La consecuencia de esta organización, es que **para cada posición específica de la cabeza, existe un patrón de activación e inhibición celular específico**.

Cuando la célula ciliada vestibular se despolariza, se activan canales membranales de Ca para permitir la exocitosis de **glutamato y aspartato** al espacio situado entre dicha célula ciliada y fibras aferentes surgen del ganglio y rama vestibular del NC VIII.

2.5.5 Vías vestibulares

Cuando las células ciliadas, en su porción basal, establecen sinapsis con las fibras aferentes vestibulares del NC VIII, la información se dirige a los núcleos vestibulares en la médula oblongada. De estos núcleos, se envían **fibras al cerebelo**, especialmente el **vestibulocerebelo, sitio principal de la regulación del equilibrio**. Otras fibras del NC VIII pasan directamente al cerebelo sin hacer sinapsis en los

núcleos vestibulares. La información llega a **núcleos y hemisferios cerebelosos ipsilaterales**.

Los núcleos vestibulares, pueden entonces enviar señales a grupos musculares:

- **Núcleos medial y superior:** A músculos extrínsecos del ojo vía fascículo longitudinal medial y NC III, IV, VI para ajustar la dirección de la mirada y ajustarla al movimiento de la cabeza.
- **Núcleo lateral:** A motoneuronas espinales ipsilaterales vía el tracto vestibuloespinal lateral, para activar musculatura extensora (antigravitatoria).

2.5.6 El cerebelo y el equilibrio

El **vestibulocerebelo (lóbulo floclonodular y núcleo fastigio)**, en conjunto con el tronco encefálico y médula espinal, regula el equilibrio corporal (proceso inconsciente para el humano), contribuyendo a circuitos neuronales que:

- Estabilizan la ejecución de movimientos rápidos
- Ajustan el cambio de dirección del movimiento
- Coordinan la contracción de músculos agonistas-antagonistas
- Calculan por anticipado la posición de los segmentos corporales
- Corrigen por adelantado de señales motoras de postura

El sistema vestibular y los tractos espinocerebelosos informan al cerebelo sobre la situación corporal, y con esta información, el cerebelo actúa como se ha mencionado anteriormente. Son estos mismos elementos los que retroalimentan sus acciones.

Respuesta a la aceleración de la cabeza mediante reflejos

Los núcleos vestibulares y el cerebelo en respuesta a la información recibida del aparato vestibular, ejecutan al menos tres reflejos:

Reflejo	Vía	Acción	Efecto
Vestibuloocular	Fascículo longitudinal medial, núcleos de los nervios: ● Oculomotor ● Troclear ● Abducens	Inhibición o activación de los músculos extrínsecos del ojo.	Conservar la posición de los ojos durante la rotación de la cabeza para tener una imagen fija en la retina.
Vestibulocervical	Tracto vestibuloespinal medial	Activación de la musculatura extensora del cuello, estabilizando el eje de la cabeza y compensando su ángulo de	Estabilizar la mirada durante el movimiento corporal o cuando se esté en una posición inclinada.

		inclinación durante el movimiento.	
Vestibuloespinal	Tracto vestibuloespinal lateral	Activación homolateral de musculatura extensora en extremidades y tronco, e inhibición contralateral.	Mantener el equilibrio ante perturbaciones de la postura.

Nistagmo vestibular

Forma parte de los reflejos vestibulares desencadenados por la aceleración angular/rotación de la cabeza, y consiste en el vaivén ocular rítmico de dos componentes.

- **Componente lento:** Al iniciar la rotación de la cabeza hacia la derecha, y los ojos se mueven hacia la izquierda, en contra de la dirección de rotación cefálica, en un intento de conservar una mirada fija.
- **Componente rápido:** Cuando los ojos alcanzan su límite de movimiento hacia la izquierda, se dirigen rápidamente a la derecha, la **misma dirección que la rotación cefálica**, para comenzar nuevamente su movimiento a la izquierda.

Se califica al nistagmo por la dirección de su componente rápido.

El nistagmo post rotatorio es el que se presenta cuando se detiene la rotación de la cabeza. En este, los ojos se mueven en dirección contraria a la dirección en la que la cabeza estaba rotando.

2.6. Sentidos químicos

2.6.1 Olfato

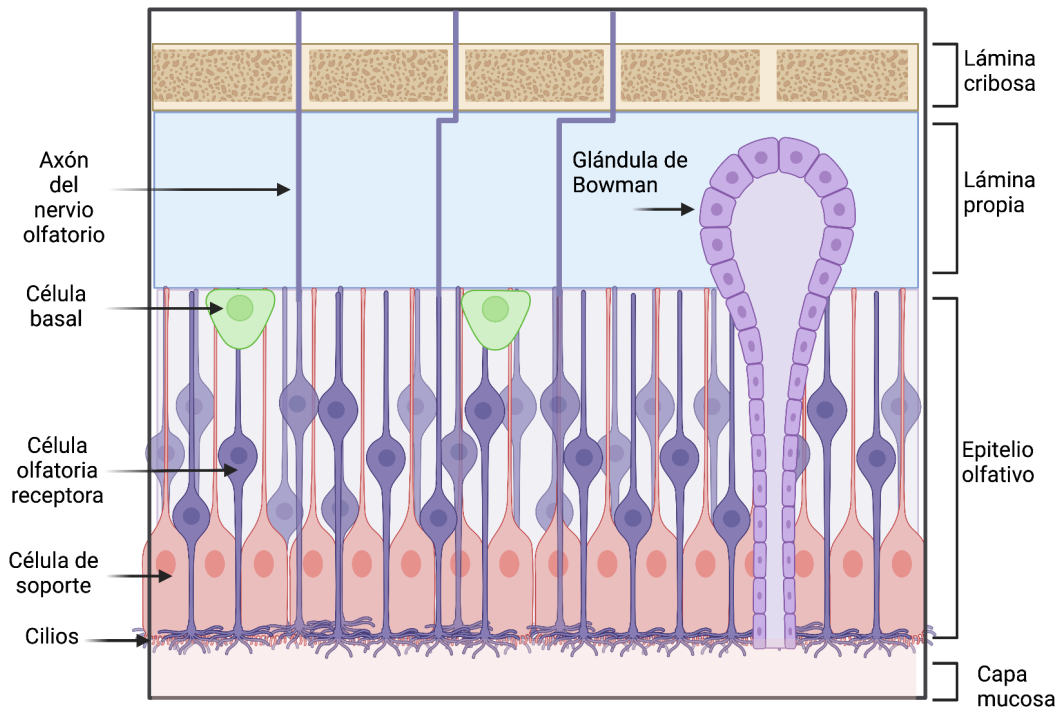
Epitelio olfatorio

El epitelio/membrana olfatoria se ubica en la porción superior de la cavidad nasal, y tiene 5 cm² de extensión. Se compone de:

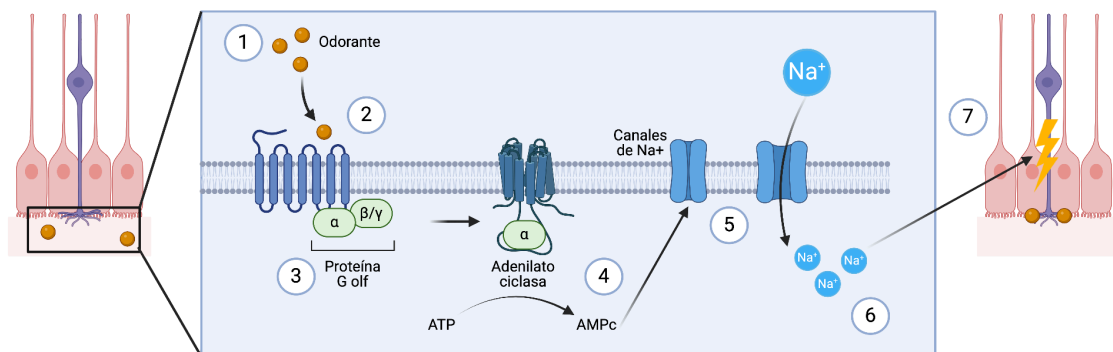
- **Células olfatorias receptoras:** Neuronas bipolares en cuyos cilios se encuentran los receptores para sustancias odorantes.

- **Células basales:** Células madre mitóticas que originan células olfativas receptoras (neurogénesis continua).
- **Células de soporte:** Células cilíndricas con microvellosidades que dan estabilidad estructural a las neuronas bipolares.
- **Glándulas de Bowman:** Estructuras que secretan el moco que recubre el extremo apical del epitelio olfatorio.

Epitelio olfatorio



Mecanismo de acción de célula olfatoria receptora



Mecanismo de generación del potencial de acción en el axón del nervio olfatorio

1. Molécula odorante

2. Unión de molécula odorante a célula receptora
3. Activación de proteína G olf
4. Activación de adenilato ciclasa y aumento de las concentraciones de AMPc
5. Apertura de canales catiónicos dependientes de nucleótido cíclico (CNG), permeables al sodio y al calcio.
6. Aumento de sodio intracelular y despolarización de la célula
7. Generación de potencial de acción en los axones del nervio olfatorio

Umbrales olfatorios

Incluso una cantidad escasa de sustancia odorantes estimula a la neurona olfatoria, porque el mecanismo de **proteína G amplifica el efecto de una sola molécula** de la siguiente manera: Se estimula a la *G olf* para activar varias adenilato ciclasa. Cada una de estas enzimas forman varios AMPc, y cada uno de ellos, estimula a varios CNG.

Factores propios de la sustancia odorante también repercuten en su grado de estimulación de la neurona olfativa:

- Solo se pueden oler **sustancias volátiles** (que tienden a evaporarse) y que por tanto, pueden inhalarse.
- **Sustancias poco hidrosolubles**, y por tanto, algo **liposolubles**, atraviesan el moco epitelial con más facilidad, y del mismo modo, se unen a las proteínas ciliares receptoras.

Diferenciación olfatoria

Aunque no se conoce completamente la codificación olfatoria, se cuenta con la siguiente información:

- Existen al menos **1000 proteínas olfativas receptoras diferentes**, cada una codificada por un gen particular.
- Cada célula receptora olfatoria cuenta con **un solo tipo de receptor** (en cantidad variable).
- Las proteínas olfativas receptoras no son específicas a una sola sustancia odorante. Cada proteína puede **responder a varias sustancias**.
- Las proteínas olfativas son **selectivas**, es decir, se estimulan más con una sustancia que con otra, o pueden no responder en absoluto.
- Las diferentes proteínas olfativas receptoras **responden de manera distinta** a una misma sustancia.
- La ceguera olfatoria se debe a la ausencia de receptores sensibles para esa sustancia.

Estos hechos, justifican el observado **patrón de actividad entre fibras**, que describe la génesis de un patrón particular de actividad en las células receptoras que se produce ante la estimulación de una sustancia odorante específica.

Adaptación al olor

El humano **deja de ser consciente del olor que impregna el ambiente en el que se encuentra después de un minuto desde el estímulo inicial**. El 50% de los receptores olfatorios se adaptan dentro del primer segundo después de ser estimulados, y con el tiempo, más y más receptores se irán adaptando, hasta extinguir la percepción. El mecanismo propuesto para la adaptación al olor es el siguiente:

- Después de recibir un estímulo oloroso, las zonas olfatorias encefálicas envían **fibras centrífugas (eferentes)**.
- Las fibras centrífugas alcanzan y **estimulan neuronas inhibitoras en el bulbo olfatorio**, las células en grano.
- **Las células en grano inhiben la transmisión ulterior** de potenciales de acción hacia el SNC desencadenados por el estímulo oloroso.

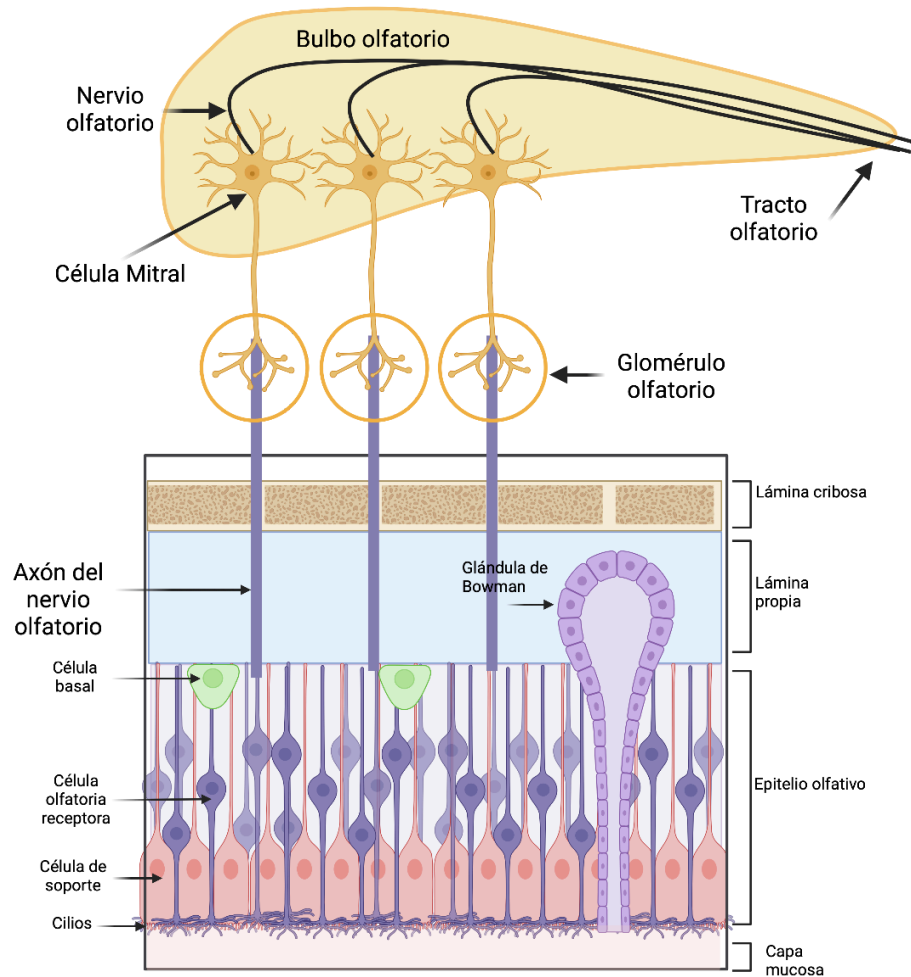
Esta retroalimentación negativa suprime la transmisión de señales en el bulbo olfatorio.

Bulbo olfatorio

Los axones de las células receptoras olfatorias (fibras tipo C) atraviesan la lámina cribosa para alcanzar el bulbo olfatorio. La fractura de esta estructura ósea y la sección axonal explica la hiposmia o anosmia en traumatismos de fosa craneal anterior.

En el bulbo olfatorio, se encuentran estructuras globulares llamadas **glomérulos**, a los cuales llegan los axones bipolares (25,000 axones por cada bulbo).

Los axones bipolares establecen **sinapsis con las dendritas de células mitrales y en penacho**, y los axones de estas últimas son los que forman el **tracto olfatorio**, que dirige potenciales de acción al SNC.



Sinapsis entre células receptoras y células mitrales

Además de enviar información al SNC, las **células mitrales y en penacho** establecen sinapsis inhibitorias dendodentríticas con células del mismo tipo de glomérulos vecinos. Esta sinapsis, un tipo de **inhibición lateral**, hace más específica la información enviada al SNC, y refuerza la teoría de que existen **glomérulos específicos** que responden solo a olores específicos.

Vía olfatoria

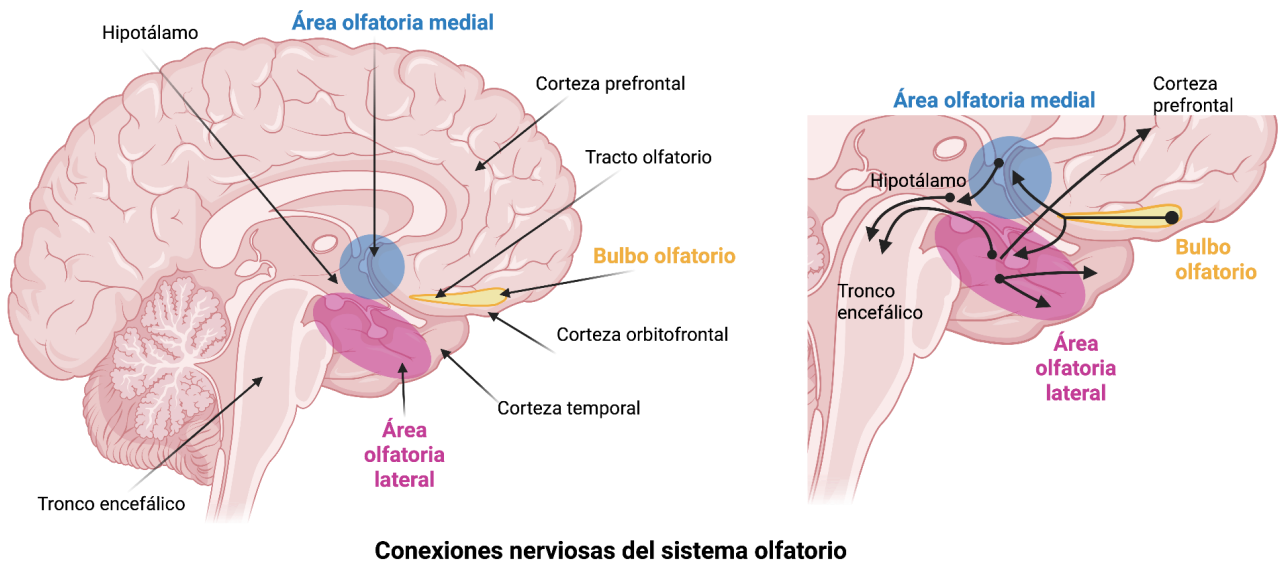
Cada tracto olfatorio entra al SNC y se divide en dos porciones, una medial y una lateral, que se dirigen a áreas olfatorias mediales y laterales, respectivamente.

- **El área olfatoria medial**, es llamada sistema olfatorio primitivo, y se compone de grupos nucleares ubicados por delante del hipotálamo. Los núcleos septales también forman parte del sistema olfatorio primitivo, y se relacionan con el sistema límbico. La importancia de este sistema se pone en evidencia con la ablación experimental de las áreas olfatorias laterales, lo que no tiene

repercusión en respuestas primitivas a estímulos olfatorios, como **salivar, lamer los labios y la génesis de emociones** relacionadas a este sentido.

- **El área olfatoria lateral**, se compone de la corteza piriforme, prepiriforme y parte de los núcleos amigdalinos. Estas estructuras envían señales al sistema límbico, especialmente el hipocampo. Su importancia radica en el desarrollo de **agrado o aborrecimiento hacia estímulos olorosos**, dependiendo de si estos se relacionan con una buena o mala **experiencia pasada**.

Aunque clásicamente se describe que la vía olfatoria es la única que no hace relevo en el tálamo, recientemente se ha develado una sinapsis en su núcleo dorsomedial como parte de la *vía olfatoria moderna*, que al final alcanza la corteza orbitofrontal, para probablemente, llevar a cabo un análisis consciente los olores.



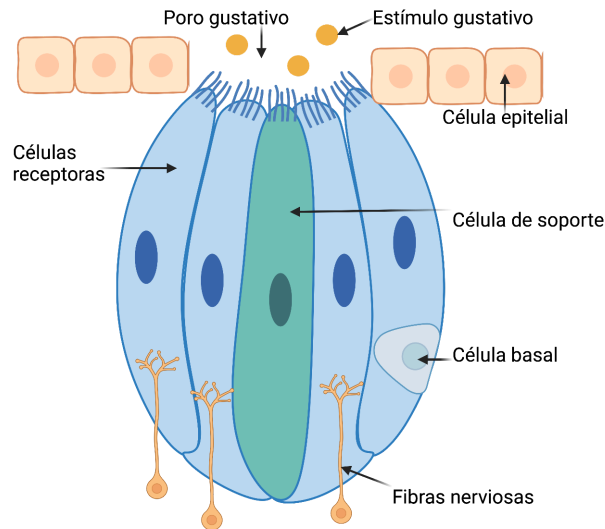
2.6.2 Gusto

Botones y papilas gustativas

El botón gustativo (yema gustativa) es un conglomerado celular que contiene a las células receptoras del gusto, además de otros tipos celulares. Un botón se compone de:

- **Células receptoras:** Epitelio especializado en cuyo extremo apical se extienden microvellosidades. Hay al menos 100 células receptoras del gusto por cada botón.
- **Células de soporte:** Epitelio que da estabilidad estructural al resto de células del botón gustativo.

- **Células basales:** Células madre mitóticas que originan células receptoras. El recambio ocurre cada 10 días.



Componentes del botón gustativo

En la porción basal de las células gustativas, se ubican fibras nerviosas que transportan la información gustativa al SNC mediante **tres nervios craneales (VIII, IX, X)**.

Los botones gustativos, a su vez forman parte de las papilas gustativas, de las cuales existen varios tipos, pero solo tres de ellas cuentan con botones:

- **Caliciformes:** Forman la "V" lingual en la región posterior de la lengua. Son las más escasas.
- **Foliáceas:** Ubicadas a modo de pliegues en las superficies laterales de la lengua.
- **Fungiformes:** Se distribuye en todo el dorso lingual, pero son más abundantes en la punta de la lengua.

Además de en las papilas, **hay botones gustativos en la mucosa palatina, los pilares amigdalinos, la epiglotis y la porción superior del esófago.**

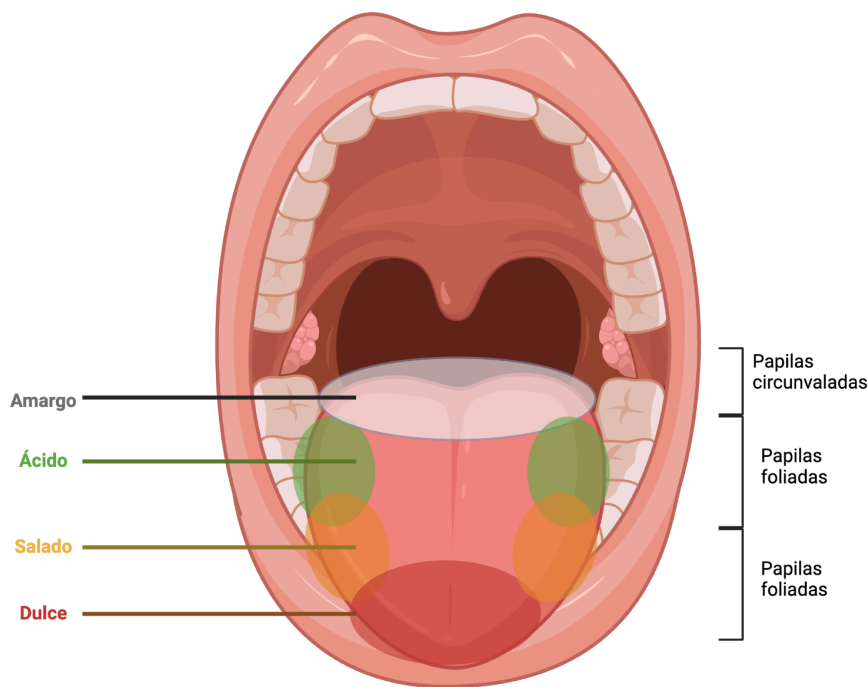
Sensaciones gustativas

Si bien el ser humano puede percibir **miles de sabores** diferentes, cada uno de ellos resulta de **mezcla específica de las cinco sensaciones** gustativas primarias:

- **Agrio/ácido:** Causada por sustancias ácidas, que contienen iones **hidrógeno**.
- **Salado:** Producido por sales, que contienen principalmente **sodio**.
- **Dulce:** Tiene su origen en varias sustancias, la mayoría de ellas orgánicas, como los **azúcares, alcoholes, glicoles, cuerpos cetónicos**, amidas, ésteres, aminoácidos.

- **Amargo:** Originado por varias sustancias, la mayoría de ellas orgánicas, como estructuras de cadena larga que contienen **nitrógeno y los alcaloides**. Ejemplos de sustancias amargas son cafeína, quinina, nicotina, estricnina.
- **Umami ("*delicioso*"):** Provocado por **L-glutamato**, contenido por ejemplo, en extractos de carne.

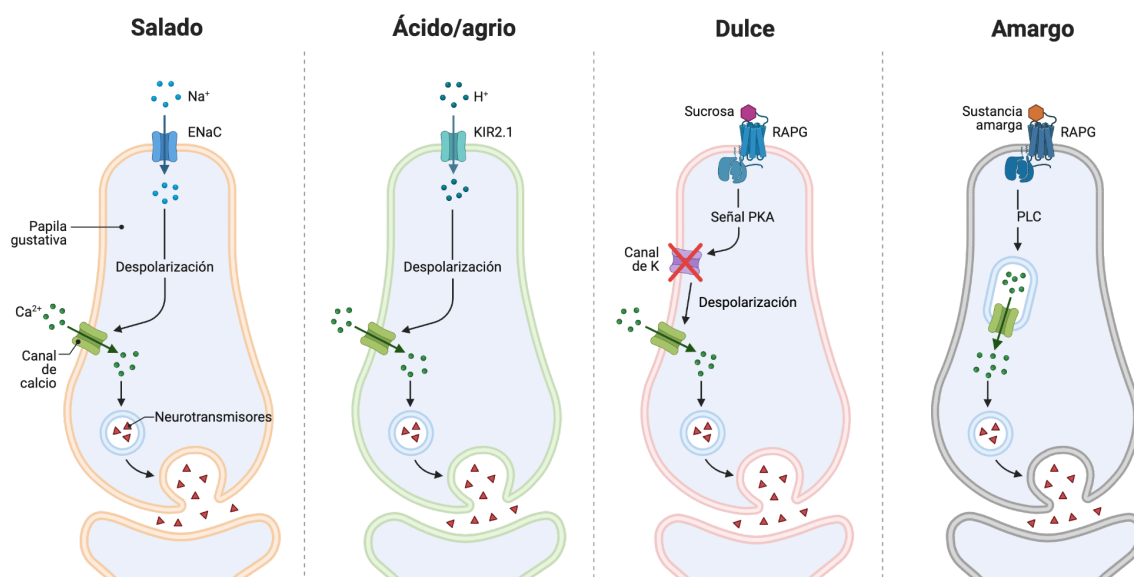
Aunque toda la superficie dorsal de la lengua tiene receptores para las cinco sensaciones gustativas primarias, se puede describir **regiones con umbrales más bajos para alguna sensación en específico**.



El mecanismo de transducción de los receptores gustativos varía en función del tipo de sustancia química que desencadena la sensación gustativa para el que se especialice.

Sabor primario	Tipo de receptor	Mecanismo de transducción
Ácido / agrio	Canales iónicos de hidrógeno	El H^+ entra a la células por el canal KIR2.1 y otopetrina 1.
Salado	Canales iónicos de sodio	El Na^+ entra a la células por el canal ENaC
Dulce	Acoplado a proteína Gq	El IP3 abre canales TRP

	(segundo mensajero)	(transient receptor potential). <i>T1R2 Y T1R3</i> , permeables a cationes.
Amargo	Acoplado a proteína Gq (segundo mensajero)	El IP3 abre canales TRP (transient receptor potential). <i>T2R</i> permeable a cationes.
Umami	Acoplado a proteína Gq (segundo mensajero)	El IP3 abre canales TRP (transient receptor potential). <i>T1R1, T1R3</i> permeables a cationes.



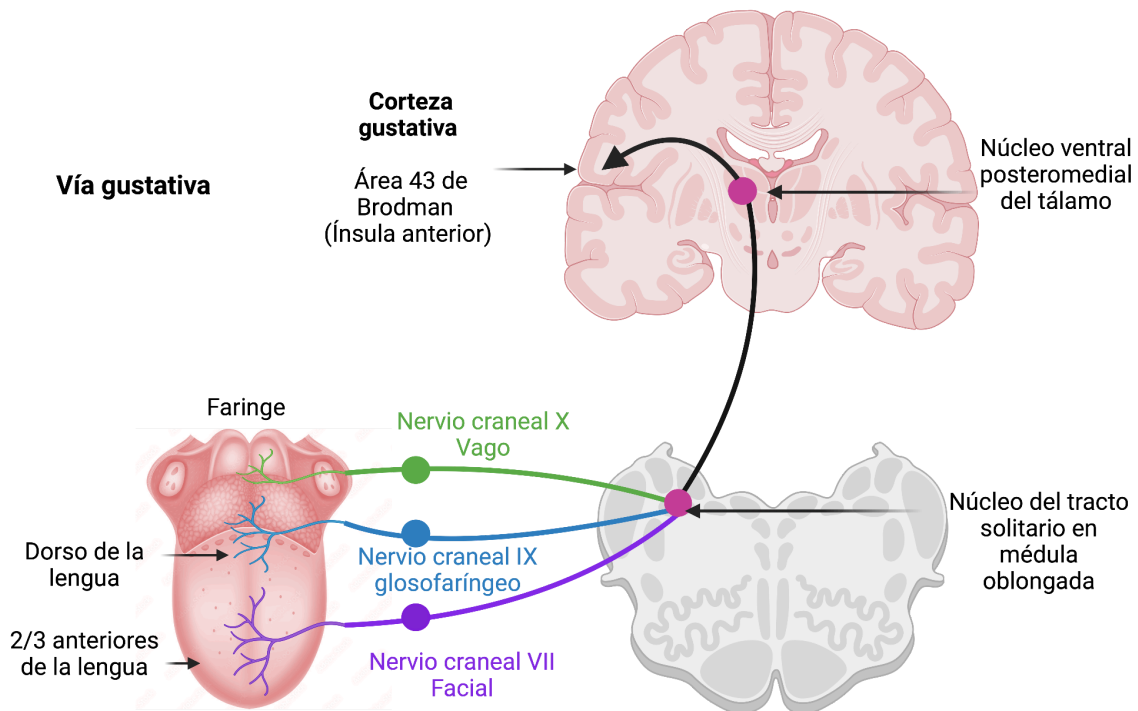
Si bien cada tipo de receptor suele responder a sólo uno de los sabores básicos, esto sucede a concentraciones bajas de cada sustancia. Cuando hay altas concentraciones de varias sustancias, cada receptor suele responder al menos a dos tipos.

En cualquier caso, la apertura de canales permeables a cationes permite la despolarización de la membrana, la exocitosis dependiente de Ca^{2+} de serotonina cuando se trata de sabores salado y amargo, o un mecanismo independiente de calcio para liberar ATP en caso de dulce, amargo y umami. La acción del transmisor permite la descarga de potenciales de acción en las fibras aferentes que inervan la lengua.

Codificación del gusto

Al igual que en el olfato, se propone el **patrón de actividad entre fibras**, que describe que una fibra gustativa (que inerva las células receptoras) se excita en mayor grado por un estímulo (un sabor) y en menor medida por otro. Así, **para cada sabor en específico, se genera un patrón particular de actividad en las células receptoras**.

Vías gustativas



Tres nervios craneales inervan especialmente la lengua, para recoger la información de los receptores gustativos. El **NC VII** inerva los $\frac{2}{3}$ anteriores de la lengua, y el **NC IX** el $\frac{1}{3}$ posterior. El **NC X** inerva los botones gustativos de la epiglotis y el esófago proximal.

Luego, estos nervios craneales llegan al tronco encefálico y hacen sinapsis en el **núcleo del tracto solitario**, en la médula oblongada.

Del núcleo del tracto solitario, surge el tracto homónimo, que asciende por el tronco encefálico **ipsilateralmente** hasta alcanzar el núcleo talámico ventral posteromedial, desde el cual se proyectan fibras hacia **área 43 de Brodman**, en la porción más lateral e inferior del **giro poscentral y la corteza insular**.

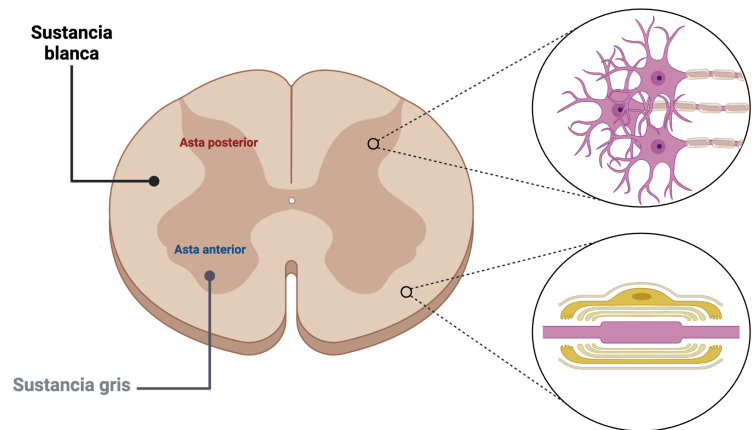
2.7. Control de la postura y el movimiento.

2.7.1 Conceptos generales

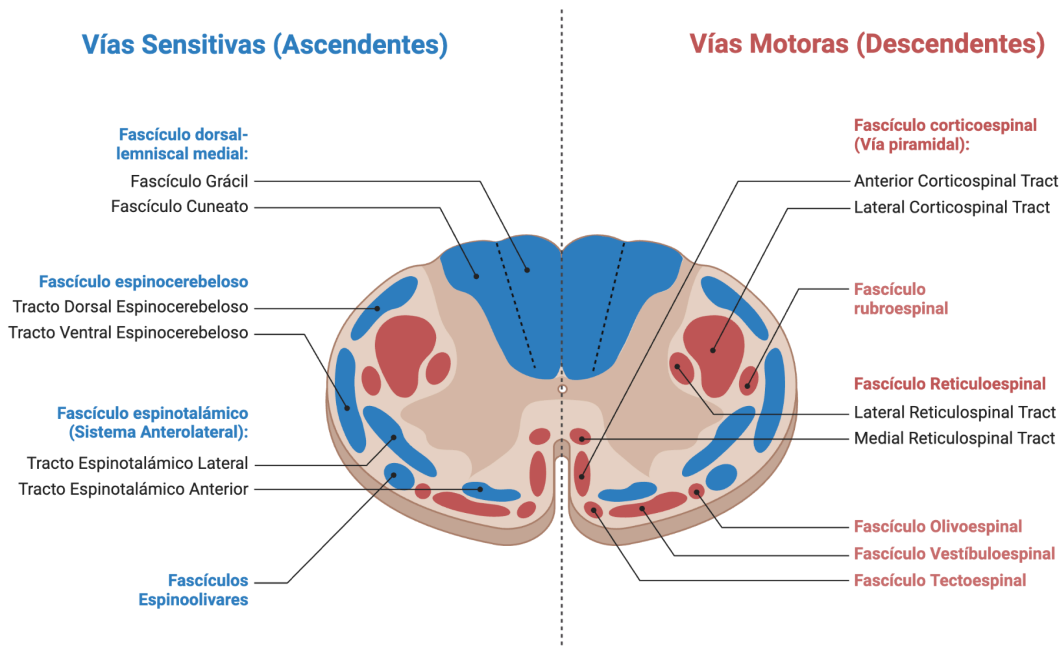
- La médula espinal genera un control motor. Tiene circuitos neuronales predeterminados para movimientos específicos.
- El cerebro activa los circuitos, los analiza y ordena en una secuencia específica para generar movimientos complejos.

2.7.2 Organización de la médula espinal

Se compone de sustancia gris y sustancia blanca. La **sustancia gris** tiene una forma de **H**, esta se puede dividir en **asta anterior** y **asta posterior** y su componente principal son **somas neuronales**. La **sustancia blanca** se compone de **cordones neuronales** que ascienden o descienden a lo largo de la médula permitiendo la comunicación con los elementos superiores o entre diferentes niveles de la columna.



Vías Motoras y Sensitivas de la Médula Espinal



Sustancia gris.

Astas posteriores:

Reciben las señales sensitivas. Un nervio tiene 2 ramas y 2 destinos.

1. Hacen sinapsis en el nivel medular de llegada en:

- Interneuronas en sustancia gris, produciendo reflejos medulares segmentarios locales.
- Directamente sobre motoneuronas: son pocas.

2. Entran a la sustancia blanca.

- Se van a niveles superiores, por ejemplo los *fascículos espinocerebelosos*: van al cerebelo.
- Ascienden "x" número de segmentos medulares
- Descienden "x" número de segmentos medulares.
 - Estos últimos dos nos permiten tener reflejos multisegmentarios. (Movimientos simultáneos de las extremidades anteriores y posteriores.)

Astas anteriores: Manda señales motoras.

Esta asta contiene el soma de la motoneurona (neurona que manda señales motoras) para que se inicie la contracción.

- Son mucho más gruesas y rápidas
- Inervan las fibras (células) musculares.
- Son excitadas por: interneuronas principalmente, pero también puede ser por impulsos directos descendentes del encéfalo (muy pocas sinapsis), o por señales sensitivas . (muy pocas sinapsis). .
- Existen 2 tipos de motoneurona, las **α (alfa)** y las **γ (gamma)**.

Motoneuronas α- 70%	Motoneuronas γ- 30%
Producen fibras nerviosas Aα • Son grandes. (14 μm). • Entran al músculo y se ramifican • Inervan fibras esqueléticas contráctiles: extrafusales. (se verá más adelante) ○ El conjunto de fibras musculares inervadas por una sola fibra nerviosa es: Unidad motora. ○ El número de fibras es variable desde 3 a cientos.	Producen fibras nerviosas Aγ • Son más pequeñas (5 μm) • Entran a músculo y se ramifican • Inervan fibras musculares especializadas: fibras intrafusales. (se verá más adelante). • Se encuentran en el huso muscular. • Dos tipos. ○ Dinámicas (D): Inervan al músculo durante la fase dinámica ○ Estáticas (E): Inervan al músculo durante la fase estática.

Otras células:

Célula de Renshaw

- Son pequeñas neuronas que están vinculadas a motoneuronas y a otras células de Renshaw adyacentes.
- Cuando una motoneurona las activa estas van a inhibir a las motoneuronas de alrededor, permitiendo la inhibición lateral, eso delimita y enfoca los estímulos, y que no se disperse lateralmente la señal.

Interneuronas:

- Ubicación: sustancia gris.
- Son pequeñas y muy numerosas
- Hacen sinapsis con motoneuronas y permiten una función integradora.
- Pueden hacer cualquier tipo de circuito neuronal:
 - Circuito divergente
 - Descarga repetida
 - Convergentes.

- **Función:** Integración de las señales provenientes de diferentes fascículos o nervios raquídeos, antes de enviar la información a las motoneuronas.

2.7.3 Husos musculares y órganos tendinosos de golgi

Los husos musculares, los órganos tendinosos de golgi, son receptores sensitivos, cuya función es dar una **retroalimentación permanente con la información sensitiva**, que indica el estado funcional del músculo. (Longitud del músculo, tensión instantánea, velocidad de cambio de variables anteriores.)

La información se manda a la médula y a los niveles superiores, esto permite un control muscular.

Ambos tipos de receptor son un conglomerado de fibras musculares especializadas llamadas fibras intrafusales, y se ubican a lo largo de todo el músculo (husos musculares) o en los tendones (órgano de golgi).

Husos musculares	Órganos tendinosos de Golgi.
• Ubicación: vientre muscular • Información: ○ Longitud del músculo ○ Velocidad en la que varía la longitud.	○ Ubicación: tendones musculares ○ Información: ■ Tensión tendinosa. ■ Ritmo de cambio.

Huso muscular:

Receptor de estiramiento especializado.

Están ubicados en todos los músculos esqueléticos y se activan por **cambio de longitud y velocidad de ese cambio**. Alrededor de los husos hay fibras esqueléticas contráctiles, se llaman extrafusales.

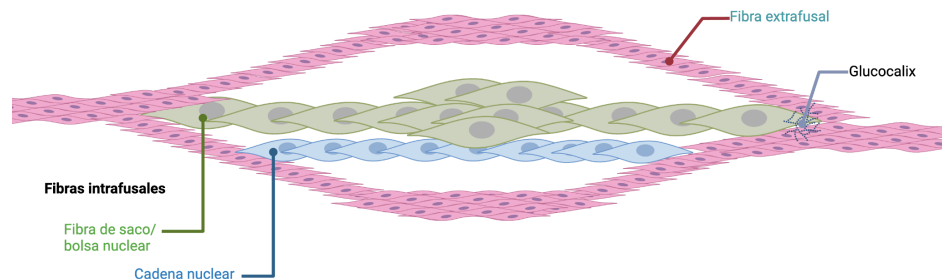
Los husos se componen de **células intrafusales, terminales neuronales sensitivos, y una motoneurona** y, que permite que el huso muscular se contraiga a la par con las fibras extrafusales y así estiren en área central del huso activando a las terminales nerviosas informado del estado muscular.

Célula	Características
Células intrafusales	• Siguen siendo fibras musculares por ende son multinucleadas.

- Se unen a las fibras extrafusales por glucocalix.
- En los extremos de las fibras hay filamentos contráctiles, y se inervan por las motoneuronas y.
- En el centro casi no contienen filamentos contráctiles, pero sí un área receptora donde está contigua la neurona sensitiva.

Existen 2 tipos de fibras intrafusales.

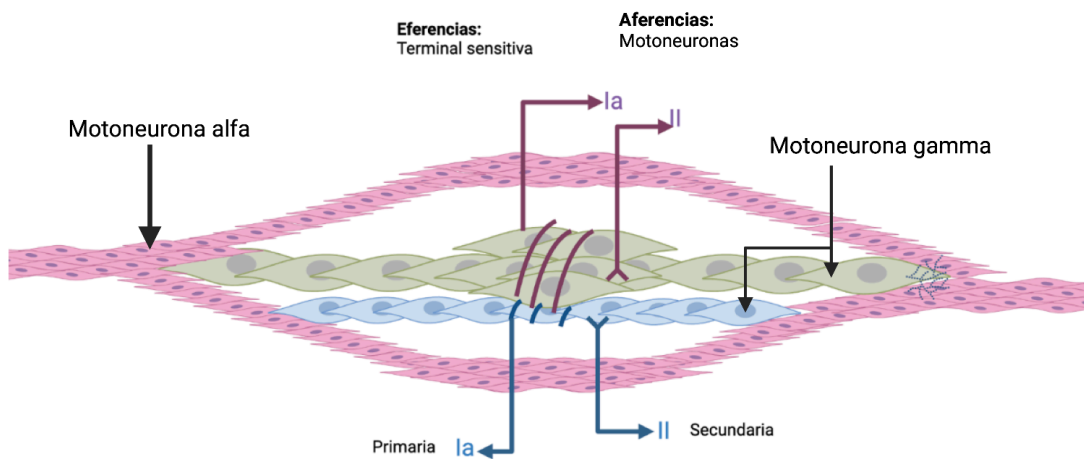
- **Fibra de saco/ bolsa nuclear**
 - Sus núcleos están acumulados en el centro de la célula en bolsas ensanchadas.
 - Posee 2 partes:
 - Parte de saco / ensanchada con muchos núcleos. ----> Ia
 - Porción estirada con núcleos en fila. ----> II
 - En un huso muscular hay 2 - 4 de este tipo de fibras.
- **Fibra de cadena nuclear:**
 - Núcleos concentrados en el centro de la célula pero en una cadena.
 - En un huso muscular hay de 6 - 8 de estas fibras.



Fibras
neuronales

- Fibras nerviosas sensitivas aferentes
- El área contigua a la fibra muscular intrafusar es llamada **terminal nerviosa**.
- Función: Transmisión del grado de estiramiento y velocidad de cambio desde el huso muscular a la médula espinal.
- **Terminación aferente primaria Ia :**
 - Forman un espiral alrededor ambos tipos de fibras intrafusales. (saco nuclear y cadena nuclear). *Anuloespiral*.
 - Se activa con una respuesta dinámica y estática
- **Terminación aferente secundaria: II:**

	○ Finalizan como una arbusto o una flor de regadera en las áreas laterales de las fibras de bolsa nuclear. ○ Se activa con una respuesta estática
Motoneuronas	● Se tienen motoneuronas α y γ, las α son aquellas que se mencionaron en temas anteriores, donde la liberación de acetilcolina activaba la contracción. Mientras que las γ hacen un efecto parecido solo que con una intensidad mucho menor ya que su trabajo es modificar la distensión del centro del huso. ● Ambos tipos de motoneuronas (α y γ) se activan simultáneamente (coactivación), así las fibras intrafusales y extrafusales se contraen al mismo tiempo. ● Las motoneuronas γ inervan los extremos de la fibra intrafusar del huso muscular. Hay dos tipos: las estáticas y las dinámicas. ○ γ -dinámicas: Inervan principalmente a las fibras de bolsa nuclear ○ γ- estáticas: Inervan principalmente a las fibras de cadena nuclear.



Se puede resumir que el huso tiene 2 partes. 1.Receptora: parte central del huso, tiene los terminales Ia y II, y 2. contráctil: áreas laterales del huso, se inerva por motoneuronas γ .

2.7.4 Mecanismo de acción entre fibras sensitivas y motoneuronas

Parte sensitiva

1. Las fibras intrafusales se contraen, estirando la porción media de la fibra y activando al receptor. (Ia o II).
2. Hay dos tipos de respuestas las estáticas y las dinámicas:
 - a. **Estáticas:** Si hay un estiramiento lento y la longitud estirada se mantiene (no varía), se mantienen los impulsos por varios minutos mientras el músculo esté estirado. El número de impulsos dependerá del grado de estiramiento.
 - b. **Dinámicas:** Hay un cambio repentino/ rápido en la longitud (no importa cuanto cambie), activa de manera potente la fibra aferente primaria (Ia nada más), este estímulo es por la velocidad de cambio. Cuando la longitud ya no sea incrementada, la frecuencia de descarga de la regresa a una respuesta estática.
 - i. Si es un estiramiento: Se mandan impulsos "positivos": mayor número de impulsos.
 - ii. Si es un acortamiento: Se mandan impulsos "negativos": menor número de impulsos.
 - c. Aunque no haya cambio de longitud, la activación de los filamentos contráctiles de las fibras intrafusales por parte de las motoneuronas y, estira la porción central del huso y también activa el receptor.
3. Toda esta información viaja hasta el asta dorsal de la médula espinal

Parte motora

4. La médula manda información motora desde el asta ventral de la médula espinal.
5. Las motoneuronas tienen más efecto sobre un tipo de respuesta determinada (Estático o dinámico).
 - a. Las motoneuronas y dinámicas al activar principalmente a las fibras de bolsa nuclear se genera una respuesta dinámica por la terminación aferente primaria (Ia)
 - b. Las motoneuronas estáticas al activar principalmente las fibras de cadena nuclear generan una respuesta estática por la terminación aferente secundaria (II)

Órgano tendinoso de Golgi

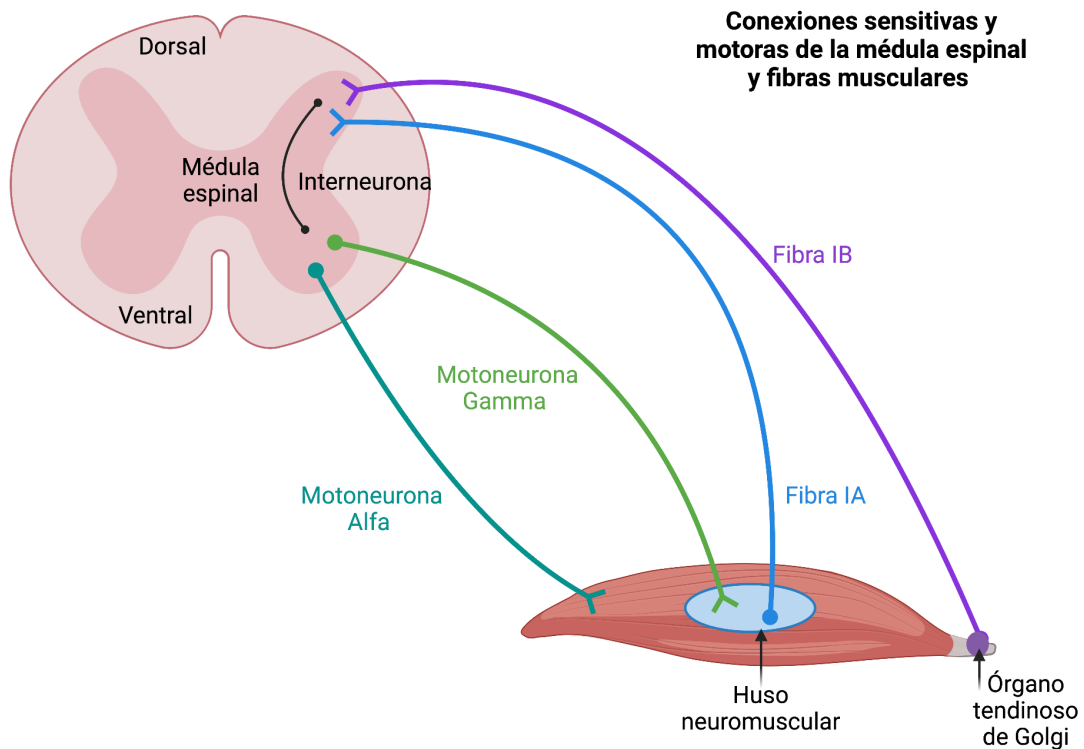
Se ubican en los tendones, y se encargan de identificar el cambio, principalmente el aumento de la tensión muscular y que se mantenga dentro de un rango óptimo.

Hay dos tipos de respuesta que da, está la respuesta dinámica que sucede cuando aumenta bruscamente la tensión, lo que provoca un aumento en la señal enviada; el otro tipo de respuestas son estáticas, estas se envían a una frecuencia menor pero constante, proporcional a la tensión del músculo.

Su estructura es muy parecida a los husos musculares, pero una diferencia es que su terminal neuronal / fibras sensitivas son de nombre: **Ib**. De igual manera que las otras fibras sensitivas se dirigen a la médula por el asta posterior donde tienen dos destinos.

1. Subir a niveles encefálicos: Esto permite controlar las señales motoras de parte de los niveles superiores.
2. Sinapsis con una interneurona inhibidora: Si hay una tensión excesiva: se activa a la interneurona, cuya función es inhibir exclusivamente a la motoneurona del músculo del que se envió la señal. Es una retroalimentación negativa.

Reacción de alargamiento. Se da ante una tensión muy grande y provoca la relajación instantánea del músculo evitando el desgarre.



2.7.5 Reflejos

La médula espinal posee circuitos intrínsecos que permiten el **movimiento sin necesidad de ser activados por los sistemas superiores**, estos son involuntarios y nos permiten tener postura y movimientos. Se usa al sistema aferente sensitivo, este detecta algún cambio y se informa a la médula espinal, donde hace sinapsis y genera la activación del sistema eferente motor.

Reflejo miotático muscular/ estiramiento muscular.

Demuestra el funcionamiento del huso muscular. **Se opone a los cambios súbitos de la longitud muscular.**

Se estira un músculo → se activan los husos → Contracción refleja de las fibras musculares

El músculo se estira, lo que provoca un estiramiento rápido de los husos musculares, y esto aumenta la frecuencia de activación de la fibra primaria (Ia), la información se dirige al asta posterior y se hace **sinapsis directa con la motoneurona α** del músculo estirado originalmente, produciendo contracción del músculo estirado, (Es una sinapsis monosináptica.) El músculo se acorta y se opone al estiramiento inicial del huso y regresa a la longitud original y la frecuencia de activación primaria (Ia) regresa a nivel basal.

Existe una función amortiguadora en el reflejo, le permite hacer un promedio de la señales del huso, y que así sea una **contracción muscular suave**, es decir sin sacudidas u oscilaciones.

Con la contracción simultánea de las fibras intra y extrafusales, se evita que la longitud del huso varíe con la contracción muscular, es decir cuando el músculo completo se contrae, las fibras intrafusales se contraen con él. Esto permite que el huso no se oponga al reflejo, y también que haya amortiguación adecuada.

Reflejo tendinoso de Golgi

El órgano tendinoso de Golgi, es un receptor encapsulado. Se encarga de **inhibir a la motoneurona con el aumento de tensión.**

Función sobre el músculo

- Cuando el músculo se contrae o se estira, **el receptor se tensa**. La información se transmite a la médula, donde se activan **interneuronas** (sinapsis 1) que **inhiben motoneuronas α** (sinapsis 2), y por ende se produce una inhibición/relajación sobre el músculo; evitando una tensión excesiva.

Si hay un estímulo (principalmente nociceptivo) entonces esa área del cuerpo ha de ser retirada.

Reflejo flexor de retirada

Mecanismo flexor: Su función es retirar la **extremidad** del objeto estimulador. Se utilizan fibras nerviosas somato sensoriales y músculos flexores.

Estímulos que lo activan:

- Dolor: nociceptivo, fibras de los grupos II, III, IV, y se produce una respuesta fuerte y de periodo largo
- Táctil: Más débil y dura menos tiempo

Mecanismo de retirada: Retirar **una parte del cuerpo** que no sea una extremidad. No se limita a los músculos flexores. Se utilizan todos los músculos necesarios para apartar del área estimulada.

Ambos tipos de retiro son clasificados en el reflejo flexor de retirada.

Aquí no hay sinapsis directa con las motoneuronas, hay conexión con varias **interneuronas** permitiendo varios circuitos.

- Circuito divergente: Diseminación del reflejo a los músculos necesarios para realizar la retirada.
- Circuitos de inhibición de músculos antagonistas. "Inhibición recíproca".
- Circuitos reverberantes: producen una post descarga, una descarga que dure más tiempo después de finalizar el estímulo. Este es proporcional al estímulo que lo activa, si es táctil hay menos postdescarga con respecto a un estímulo nociceptivo.

Reflejo extensor cruzado

Hay una **extensión del miembro opuesto**, su finalidad es alejar el cuerpo del estímulo. Sucede 0,2 - 0,5 segundos después de el reflejo flexor de retirada. Hay una **postdescarga mucho más larga**, permitiendo alejar el cuerpo.

Las señales nerviosas del lado estimulado hacen sinapsis con interneuronas, las cuales se pueden dirigir al otro lado de la médula, y activan a los **músculos extensores**.

Inhibición e inervación recíprocas

Inhibición recíproca: Es la reducción de contracción de los músculos antagonistas a un movimiento reflejo.

- En el reflejo extensor cruzado se inhiben los flexores.
- En el reflejo flexor de retirada los extensores son inhibidos.

Inervación recíproca: Es el circuito neuronal que permite esto.

Reflejo postural y locomotor

Postural:

Hay una reacción de apoyo positiva si se hace una presión sobre la almohadilla de un animal, esto provoca una extensión de la extremidad sin necesidad de interacción con niveles superiores del SNC, sólo se requiere la médula. Se ejerce la extensión en dirección del punto de presión: **reacción del imán**.

Movimiento de la marcha

- Extensión hacia atrás ----> 1 s ----> Flexión hacia adelante de la extremidad
- Flexión hacia adelante de la extremidad ----> 1 s ----> Extensión hacia atrás

Funciona principalmente por los circuitos de inhibición recíproca, que **alternan entre los músculos agonistas y los antagonistas, y permite una coordinación**.

A pesar de ser involuntarios, también los reflejos de retirada, marcha, deambulación pueden ser activados por el encéfalo.

2.7.6 Corteza motora y movimiento voluntario.

La corteza es capaz de activar muchos movimientos, en su mayoría, son movimientos aunque específicos no tan finos. Se activan los patrones en los sistemas inferiores a la corteza, ya sea la médula, el tronco, los ganglios basales y el cerebelo.

Pero, si la especificidad es necesaria (movimientos delicados), se usa un camino directo, esta vía es para movimientos finos y diestros de la mano, se le llama vía piramidal o fascículo corticoespinal.

La corteza motora está por enfrente del surco central en lóbulo frontal y funcionalmente se divide en 3.

1. Área motora primaria
2. Área premotora
3. Área motora suplementaria.

Hay áreas accesorias para el control motor en otros lóbulos.

4. Área parietal posterior

Corteza motora primaria/Área motora primaria

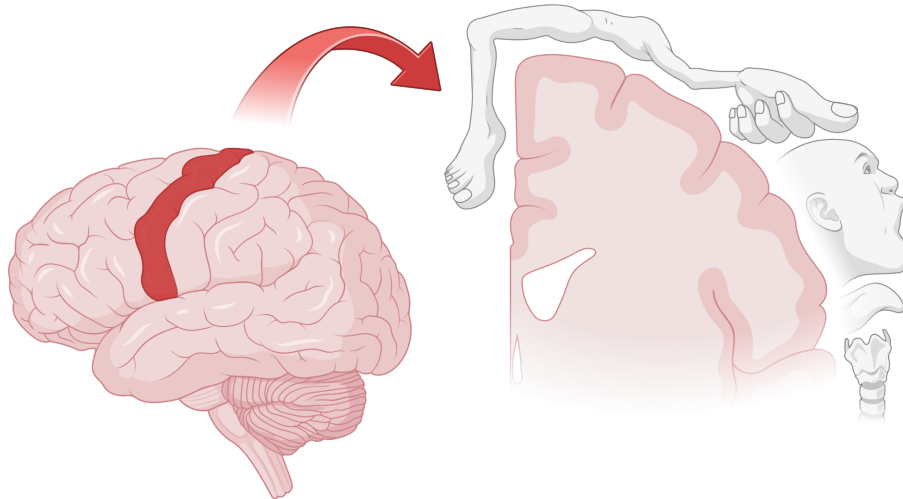
Se encuentra en la cuarta área de Brodmann, se delimita posteriormente por el surco central, inferolateralmente por el surco lateral, y también por la cisura longitudinal.

Posee a las **células piramidales gigantes /células de Betz**:

- **Tamaño:** 60 µm.
- Van en el **fascículo corticoespinal**
 - Representan el 3% de todas las fibras en este fascículo.

- Proveen axones cortos de regreso a la corteza motora primaria para que se delimite la señal cuando las neuronas de Betz mandan su señal.

La corteza posee el control de las zonas musculares de todo el cuerpo, y cada zona muscular tiene un área de control específica en la corteza. A mayor necesidad de control / especificidad de los movimientos habrá más espacio destinado a las zonas musculares. Por ende un 50% (aprox) de la corteza se encarga de controlar el habla y las manos.



La topografía se obtuvo por estimulación durante neurocirugías. Y se explica desde el lateral de la corteza hacia superior, al lateral de la corteza se tiene a la boca, luego la cara, las manos, los brazos, el tronco, las piernas y el pie.

- La corteza manda señales de patrones de movimientos puntuales, no la activación individual de un músculo.

Corteza premotora / Área premotora

Sus límites anatómicos son: posteriormente está el área motora primaria, anteriormente el área motora suplementaria, infero-lateralmente el surco lateral, e interno superior la cisura longitudinal, la topografía es muy parecida al área motora primaria. Pero los patrones de movimientos son mucho más complejos, y no son puntuales.

- **Área premotora anterior:** Crea una **imagen motora**, una imagen del movimiento que se quiere realizar.
- **Área premotora posterior:** Activa los **patrones** necesarios para realizarlos, por medio de activación de la corteza motora o de otras áreas corticales adjuntas (ganglios basales, tálamo).

Área motora complementaria /Área motora suplementaria.

La topografía es diferente a la corteza motora y la premotora. Su función es la activación de movimientos bilaterales y de movimientos posturales (con el área premotora).

El conjunto de estas área nos permite tener variedad de movimientos

Suplementaria + Premotora:

- Movimientos posturales
- Movimiento de fijación de segmentos corporales.
- Movimientos posturales de cabeza y ojos.

Premotora + Motora + (suplementaria).

- Movimientos finos de los brazos y de las manos.

Para un control de patrones complejos de actividad muscular coordinada se requiere de la corteza motora primaria, área premotora núcleos basales, y tálamo.

Áreas especializadas

1. Formación de palabras /área de Broca:

- Área premotora.
- Inferiormente está el surco lateral.
- Posteriormente se localiza el área motora.
- Asociado a la corteza que regula el funcionamiento respiratorio adecuado ---> Fonación ---> Habla.

2. Movimientos oculares contralaterales

- Área premotora:
- Inf: área de broca
- Post: área motora
- Función control de movimientos oculares voluntarios y movimientos palpebrales (parpadeos).
 - Dirigir los ojos a objetos específicos. Estos movimientos se regulan por la corteza occipital visual.

3. Rotación de la cabeza

- Área motora de asociación. (Premotora + suplementaria)
- Rotación de la cabeza p/ a con movimiento de ojos.

4. Habilidades Manuales

- Área premotora:
- Post: Corteza motora primaria encargada de el movimientos de dedos

- Función: ayuda con la coordinación de los movimientos de las manos / habilidades manuales.

Corteza Parietal posterior.

Un área que comienza en la corteza parietal posterior y se extiende hacia la corteza occipital superior, es el límite entre la corteza somatosensorial y la corteza visual.

Esta área es multisensorial, maneja estímulos somatosensoriales, visuales y posiblemente auditivos, y también se conecta con el lóbulo frontal. Con todos estos datos, calcula las coordenadas del medio visual, auditivo y corporal que la rodea con respecto a las partes del cuerpo. Nos permite la manipulación de objetos, defensa personal, llevar comida a la boca, manejo de herramientas, etc.)

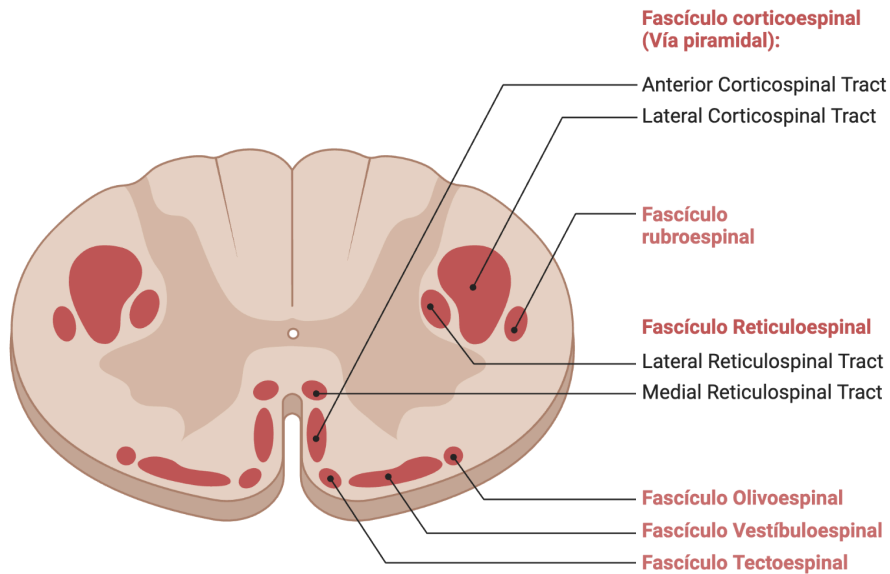
2.7.7 Patrones de movimiento complejos

Aferencias sensitivas hacia la corteza motora

- Fibras de áreas somatosensitivas de la corteza parietal
- Fibras de la corteza prefrontal
- Fibras visuales
- Fibras auditivas
- Fibras somatosensitivas del lado contralateral. (cuerpo calloso)
- Complejo ventrobasal del tálamo
 - Señales táctiles, cutáneas
 - Señales articulares
 - Señales musculares
- Núcleos intralaminares talámicos.

Transmisión de la corteza a los músculos:

Fascículos Motores y Vías Descendentes



VÍAS DIRECTAS

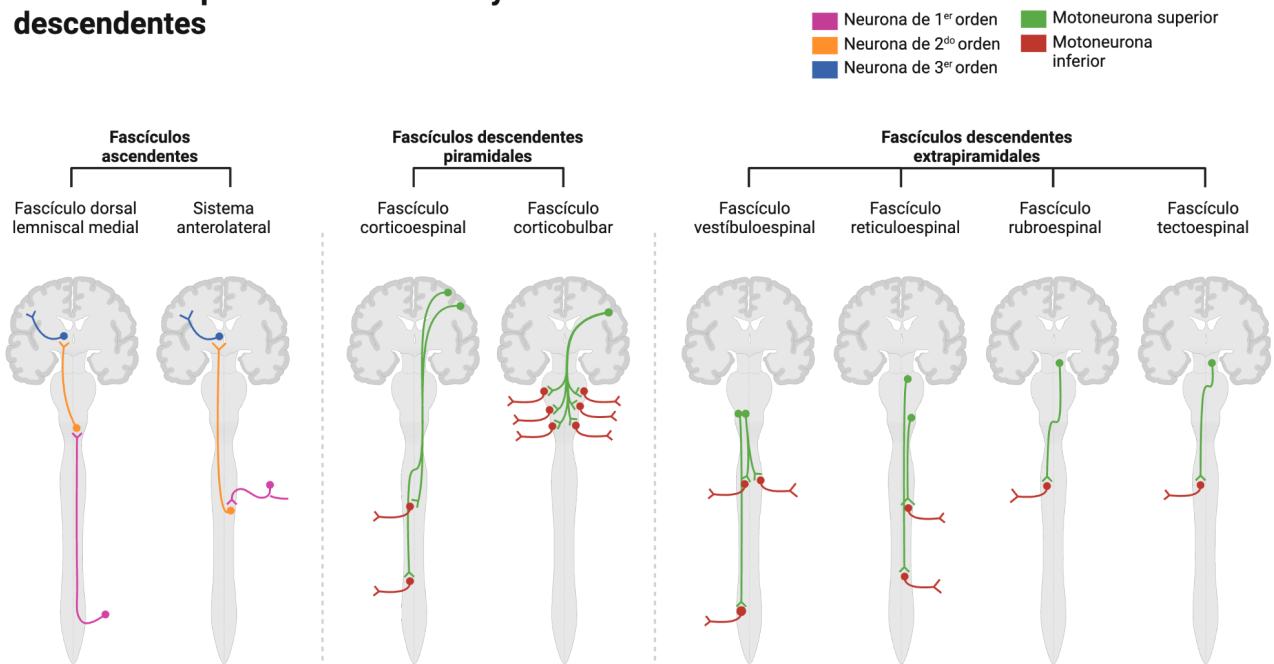
Fascículo cortico - espinal: (Vía piramidal).

- No hace relevo.
- Las señales van desde la corteza a la médula (motoneuronas) de manera directa.
- Movimientos detallados, bien diferenciados, manos y dedos principalmente.

VÍAS INDIRECTAS

- Cerebelo
- Ganglio basales
- Cerebelo
- N. del tronco.

Fascículos espinales ascendentes y descendentes



2.7.8 Fascículo corticoespinal / vía piramidal

Su origen está en la corteza.

- 30 %: Corteza motora primaria: Proveen las células de Betz.
- 30 %: Corteza motora suplementaria + premotora.
- 40 % Corteza de áreas somatosensitivas.

Hace sinapsis en el siguiente orden:

1. Brazo posterior de la cápsula interna. (entre caudado y putamen)
2. Tronco del encéfalo: Pirámides en la médula oblongada (bulbo raquídeo).
 - a. Hay decusación en la mayoría de las fibras.
3. Descienden en **el fascículo corticoespinal lateral** en la médula.
 - a. Algunas fibras se quedan del lado ipsilateral y descienden en el **fascículo corticoespinal ventral**.
4. Las neuronas de ambos fascículos hacen sinapsis en la región intermedia de la médula.(interneuronas), o también, muchas otras terminan en la intumescencia cervical, donde hacen sinapsis directa con la motoneuronas.

2.7.9 Vías extrapiramidales

Su origen está en la corteza y se dirige a diferentes regiones.

Fascículo utilizado	Lugar de sinapsis
Núcleos basales	Corteza → Núcleo caudado/Putamen
Fascículo rubroespinal	Corteza → Núcleo Rojo
Fascículo reticuloespinal	Corteza → Formación reticular
Fascículo retículo cerebeloso	Formación reticular → Cerebelo
Fascículo vestibuloespinal	Núcleos vestibulares → médula espinal
Fascículo vestíbulo cerebeloso	Núcleos vestibulares → cerebelo
Fascículo pontocerebeloso	Protuberancia → cerebelo
Fibras olivocerebelosas	Núcleos olivares inferiores → cerebelo.

Fascículo rubroespinal

El núcleo rojo se encuentra en el mesencéfalo.

- Contiene células grandes parecidas a las de Betz.
- Tiene una representación somatográfica de todos los músculos del cuerpo. Por lo tanto si solo estimula una parte, solo un grupo específicos de músculos serán activados. Pero hay mucha menos especificidad que la corteza motora.
- Se considera una vía accesoria para transmitir señales relativamente diferenciadas a la médula.

2.7.10 Regulación de movimientos por núcleos basales

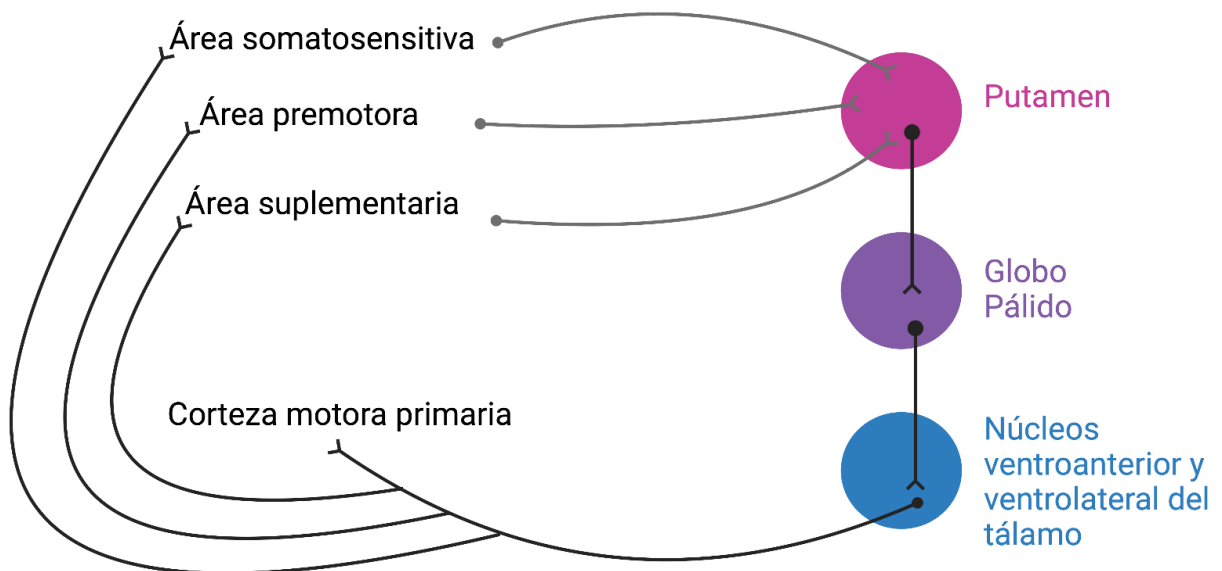
Componentes de núcleos basales	Alteraciones que se presenta si el núcleo falla
Núcleo caudado	Corea (Enf. De Huntington)
Putamen	Corea (Enf. De Huntington)
Globo pálido	Atetosis
Núcleo subtalámico	Hemibalismo
Sustancia negra	Parkinson

Circuito del putamen

Ejecución de patrones complejos subconscientes pero aprendidos de actividad motora.

- Escribir
- Cortar papel
- Martillar
- Lanzar pelota
- Vocalización

Circuito del putamen



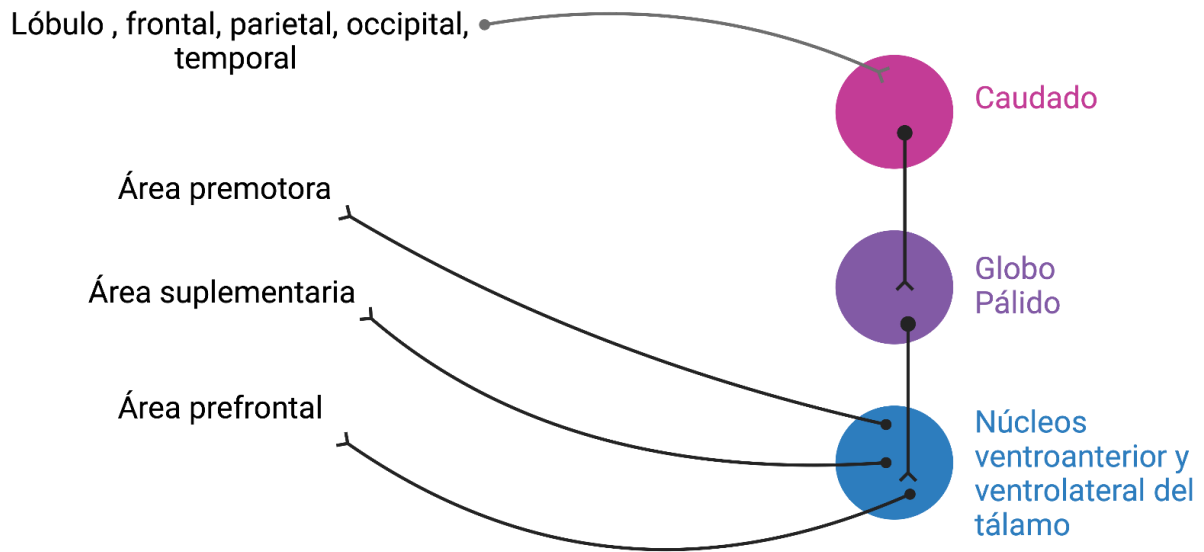
Circuito del caudado

Ejerce un control cognitivo (pensamiento) de las secuencias de los patrones motores, ya que se extiende por todos los lóbulos, y por ende reciben muchas señales motoras, sensitivas, y se asociación.

La cognición es: Información sensitiva + Información almacenada en memoria.

El control cognitivo de la actividad motora son los pensamientos generados en la mente.

Circuito del caudado



Modificación de la secuencia y la intensidad del movimiento

Los núcleos basales **nos permiten modificar la secuencia e intensidad de los movimientos**, determinan velocidad/ ritmo de realización, y la amplitud / tamaño de la acción. Por ejemplo se puede escribir "A" o "a" de la misma manera, a diferentes escalas.

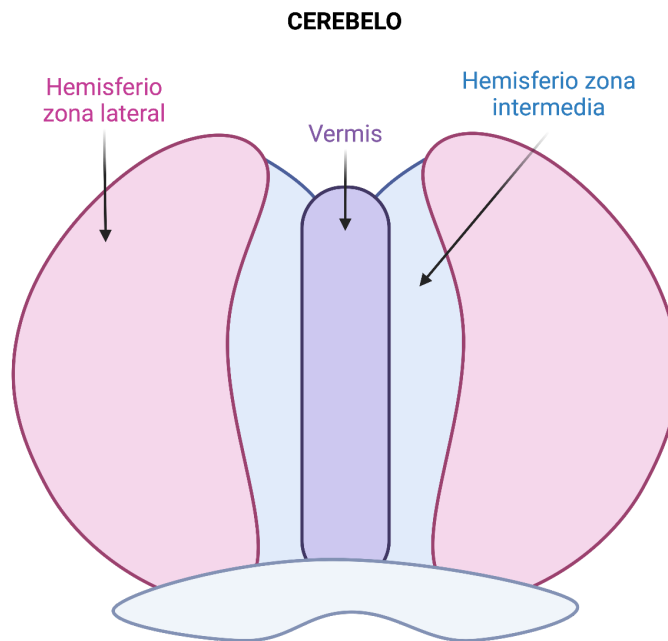
En la **corteza parietal posterior** se manejan las **coordenadas espaciales**, es decir relación de partes del cuerpo con su entorno. Si se llega a lesionar, habría una incapacidad de percibir objetos con precisión (Agnosia.) y si es muy grave el síndrome de abandono personal: No sabe que existe esa parte del cuerpo.

Los neurotransmisores liberados en estos circuitos son:

- Dopamina (inhibidor/regulador): Desde sustancia negra hacia núcleos caudado y putamen.
- GABA (inhibidor): Desde núcleo caudado y putamen hacia globo pálido y sustancia negra.
- Acetilcolina (excitador) : Desde corteza motora hacia núcleos caudado y putamen.

2.7.11 Cerebelo

Anatomía del cerebelo



Vermis

Función: Control muscular de la línea media del cuerpo. Su control topográfico es en el tronco axial, cuello, hombros, cadera.

Hemisferio intermedio

Función: Control motor sobre las porciones distales de las extremidades superiores e inferiores. Manos y pies, y las regiones faciales.

Hemisferio lateral

Función: Permite la planificación anticipada y coordinación de las actividades musculares secuenciales rápidas que suceden una tras otra.

Funciones del cerebelo en el control motor

- Su activación no produce sensación consciente.
- Se usa en movimientos rápidos.
- Topográficamente cada área del cuerpo se puede representar en el cerebelo de una manera diferenciada en la vermis y las zonas intermedias. Y se recibe señales aferentes desde las porciones respectivas del cuerpo así como de otras áreas encefálicas que representan tales estructuras de la corteza motora, núcleo rojo, formación reticular.
- **Coordinación temporal de las actividades motoras**
- **Planificación anticipada** del siguiente movimiento, lo que permite un paso rápido y suave de un movimiento a otro.

- **Compara/ Contrasta** la imagen motora con el movimiento realizado, y es capaz de **retroalimentar** para **corregir** el movimiento.
- Controla las interacciones entre los **músculos agonistas y los antagonistas**.

Aferencias del cerebelo

Vía o fascículo	Origen y destino de la sinapsis
Vía cortico-ponto-cerebelosa	Se origina en la corteza somatosensitiva, corteza cerebral motora o premotora y llega a la zona lateral de los hemisferios cerebelosos opuestos.
Fascículo olivo-cerebelosa	Se origina en las olivas inferiores y se excita por la corteza motora, ganglios basales, formación reticular o por la médula espinal. Llega a todas las áreas del cerebelo.
Fibras vestibulo- cerebeloso	Se origina en el aparato vestibular y llega al lóbulo floclunodular y núcleo del fastigio del cerebelo.
Fibras reticulares.	Se origina en la sustancia reticular y llega al vermis del cerebelo.
Fascículos espino cerebelosos	Son los más rápidos del sistema nervioso: 120 m/s. Comunica al cerebelo los movimientos musculares realizados.

Las aferencias al cerebelo se dan por **diferentes tipos de neuronas**, estas son: la fibra trepadora, la fibra musgosa.

Estas disparan constantemente y activan a la célula nuclear profunda y seguirán su camino hasta la corteza cerebelosa, aquí **la fibra trepadora activa a la célula de Purkinje directamente**, mientras que la fibra musgosa activa a una célula granulosa y es esta la que activa a la célula de Purkinje. La función de Purkinje es mandar señales inhibitorias a las células nucleares profundas.

Fibra trepadora	Fibra musgosa
Origen: Olivas inferiores del bulbo raquídeo. Destinos:	Origen: Resto de fibras (Encéfalo superior, tronco, médula espinal) Destinos:

• Núcleos profundos: La fibra trepadora las excita. • Células de Purkinje Utiliza una descarga compleja donde es un potencial de acción prolongado. Descarga potente inicial y descargas subsecuentes débiles.	• Colateralmente los núcleos profundos se excitan. • Células granulosas Descarga simple, potencial de acción corto.
---	--

Célula de Purkinje en el cerebelo

Aferencias: Fibra musgosa (sinapsis débil) y fibra trepadora (sinapsis fuerte).

Cuando hay aferencias por parte de estas dos células, estas activarán a la **célula nuclear profunda** y seguirán su camino hasta activar a la célula de Purkinje la cual inactiva a la **célula nuclear profunda previamente excitada**.

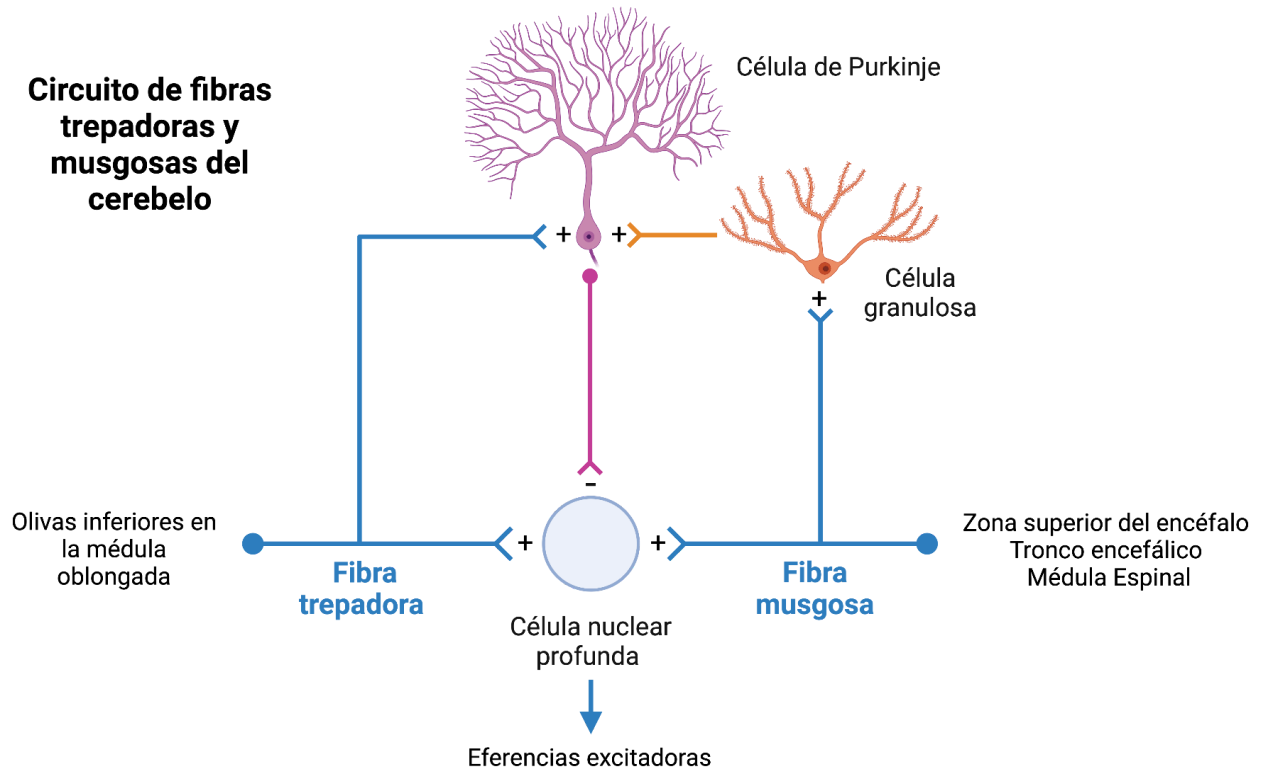
Dependiendo de el tipo de sinapsis que provoque la activación de la célula de Purkinje será el tiempo en que la señal inhibitoria sea enviada, en el caso de las células trepadoras estás activarán rápidamente a la célula de Purkinje, pero, si fuera una fibra musgosa esta al tener sinapsis débiles requerirá de sumación y más tiempo para activar a Purkinje y que envíe su señal inhibitoria.

Célula nuclear profunda

Ocupando una situación profunda dentro de la masa cerebelosa a cada lado hay tres núcleos cerebelosos profundos: el dentado, el interpuesto y el del fastigio.

Cada vez que llega una señal de entrada al cerebelo, se divide para seguir dos direcciones: 1) directamente hacia uno de los núcleos cerebelosos profundos, y 2) hasta la zona correspondiente en la corteza cerebelosa que cubre a dicho núcleo.

A continuación, una décima de segundo más tarde, la corteza cerebelosa emite una señal de salida inhibitoria dirigida hacia el núcleo profundo. Por tanto, todas las señales de entrada que penetran en el cerebelo finalmente acaban en los núcleos profundos adoptando primero la forma de impulsos excitadores seguidos por impulsos inhibidores una fracción de segundo después. Desde los núcleos profundos, las señales de salida abandonan el cerebelo y se distribuyen por otras zonas del encéfalo.



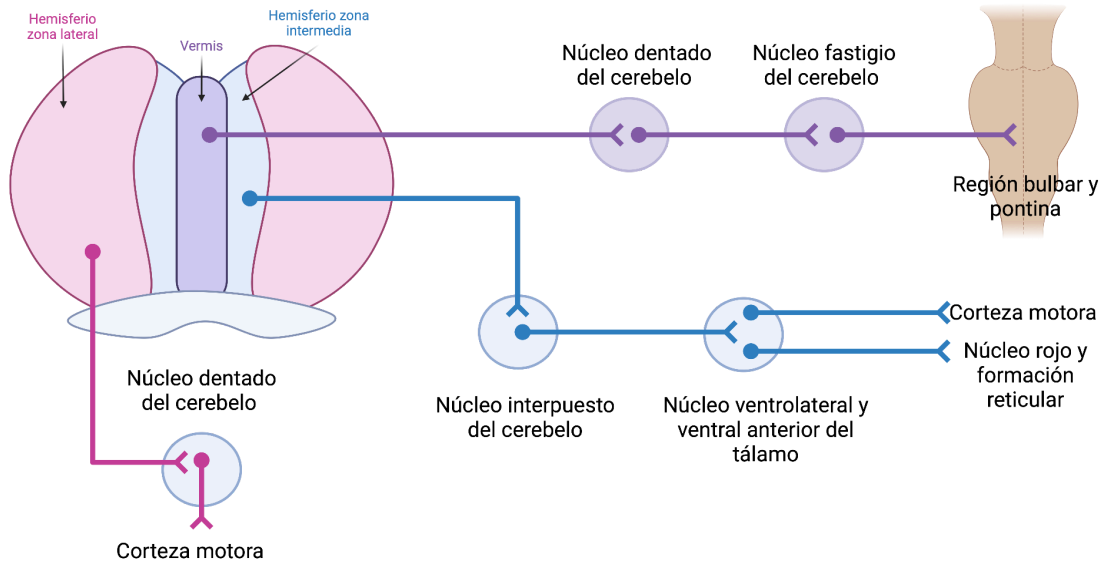
Inhibición lateral

Se inhibe lateralmente a las células de Purkinje adyacentes por las células estrelladas y las de canasta con el objetivo de darle mayor precisión a la señal.

Eferencias del cerebelo

Cada región del cerebelo manda sus eferencias a través de diferentes núcleos hacia regiones de la corteza o del tronco encefálico como se muestra en la siguiente imagen.

Eferencias del cerebelo



2.7.12 Actividad funcional del cerebelo

División funcional del cerebelo

Vestíbulo cerebelo

- Lóbulo floculonodular + porciones adyacentes del vermis:
- Su función es el equilibrio durante los movimientos rápidos con variación en la dirección y posición corporal
- Características:
 - Son las **vías más rápidas**, pero ni con esa velocidad se puede coordinar el movimiento simultáneamente a su realización.
 - Los sensores periféricos informan sobre la velocidad y dirección.
 - El vestibulo-cerebelo **calcula (con la velocidad y dirección presente)** el futuro de estas dos variables.
 - Con esta corrección por adelantado, se mandan las señales motoras posturales y así se mantiene el **equilibrio** en movimientos secuenciales, especialmente rápidos.

Espino cerebelo

- Vermis posterior y anterior + zonas intermedias adyacentes + núcleo profundo interpuesto.
- La zona intermedia compara el movimiento realizado con la imagen motora que se planeó en la corteza premotora.

- El núcleo interpuesto: envía las señales eferentes correctoras en caso de que el contraste entre la imagen motora y el movimiento sean discordantes.
- Su función en conjunto es la coordinación de movimientos distales de manos y dedos, amortiguación y movimientos balísticos.
- **Amortiguación:** El movimiento de las extremidades produce una inercia, esta requiere ser vencida para que el movimiento pare. El cerebelo detiene el movimiento en el punto deseado, sin él no se puede.
- **Control de movimientos balísticos:** Son aquellos movimientos con una velocidad tan alta que no es posible proveer retroalimentación desde los movimientos realizados a la corteza. Están programados por anticipado para una distancia, y duración específica. Se usan al leer u observar objetos con velocidad.

Cerebro cerebelo

- Zonas laterales de los hemisferios cerebelosos.
- Recibe información de la corteza motora, premotora y somatosensitiva.
- Su función es regresar la imagen motora con la **planificación anticipada** y orden adecuada al cerebro para regularlo; para coordinar los movimientos secuenciales del tronco y las extremidades que se van a realizar, y que exista una **transición suave de un movimiento a otro**.
- Sincronización de los movimientos complejos: Hace una **coordinación temporal correcta, y reconoce cuándo debería iniciar la siguiente acción para que esté ordenado y progresivos**.
- Hace una **predicción** en términos de temporalidad sobre estímulos visuales y auditivos. Identifican relaciones espacio-temporales que cambian rápidamente.

Coordinación de músculos

Coordina músculos antagonistas y agonistas a través de salidas de encendido - apagado, apagado- encendido.

Se encarga de apagar algunos músculos y encender otros conforme hay movimiento. No hace la función de la médula, se encarga de reforzar la señal de contracción y al inhibirse produce una disminución del reforzamiento.

Aprendizaje del movimiento

El cerebelo aprende a coordinar; a prender y apagar la musculatura.

Se cree que los circuitos cerebelosos adaptan sus niveles de sensibilidad en el entrenamiento. Las células trepadoras cambian la sensibilidad de las células de Purkinje hacia la excitación por las células granulosas. Esto se logra por los impulsos de las células trepadoras con mucha potencia ya que crean una gran despolarización sobre Purkinje. Esto permite que la imagen motora y lo realizado concuerden.

Alteraciones producida por una falla en el cerebelo	
Dismetría	Falla en la predicción de llegada de movimientos
Ataxia	Movimientos descoordinados
Hipermetría	Se da cuando hay disimetría y el punto deseado es rebasado
Disdiadococinesia	Falla en la sucesión de movimientos donde la ubicación de los movimientos para el cerebro es nula.
Disartria	Trastorno de la ejecución motora del habla debido a falla en el control de los movimientos rápidos para la fonación.
Nistagmo	Temblor del globo ocular al momento de fijar sobre una escena ya que falla la amortiguación del movimiento y provoca movimientos rápidos y temblorosos.
Hipotonía	Si se pierde la facilitación o refuerzo a la corteza motora y los núcleos motores se provoca un menor tono muscular.

2.8 Sistema nervioso autónomo.

2.8.1 Sistema nervioso autónomo: Papel en el control de la homeostasis.

Es un sistema que controla las vísceras; identifica aferencias, las compara con las necesidades en el momento, y manda eferencias a partir de motoneuronas a las vísceras (músculo liso, el músculo cardíaco, los epitelios secretores y las glándulas). Estas señales son independientes a nuestra voluntad

Posee tres sistemas.

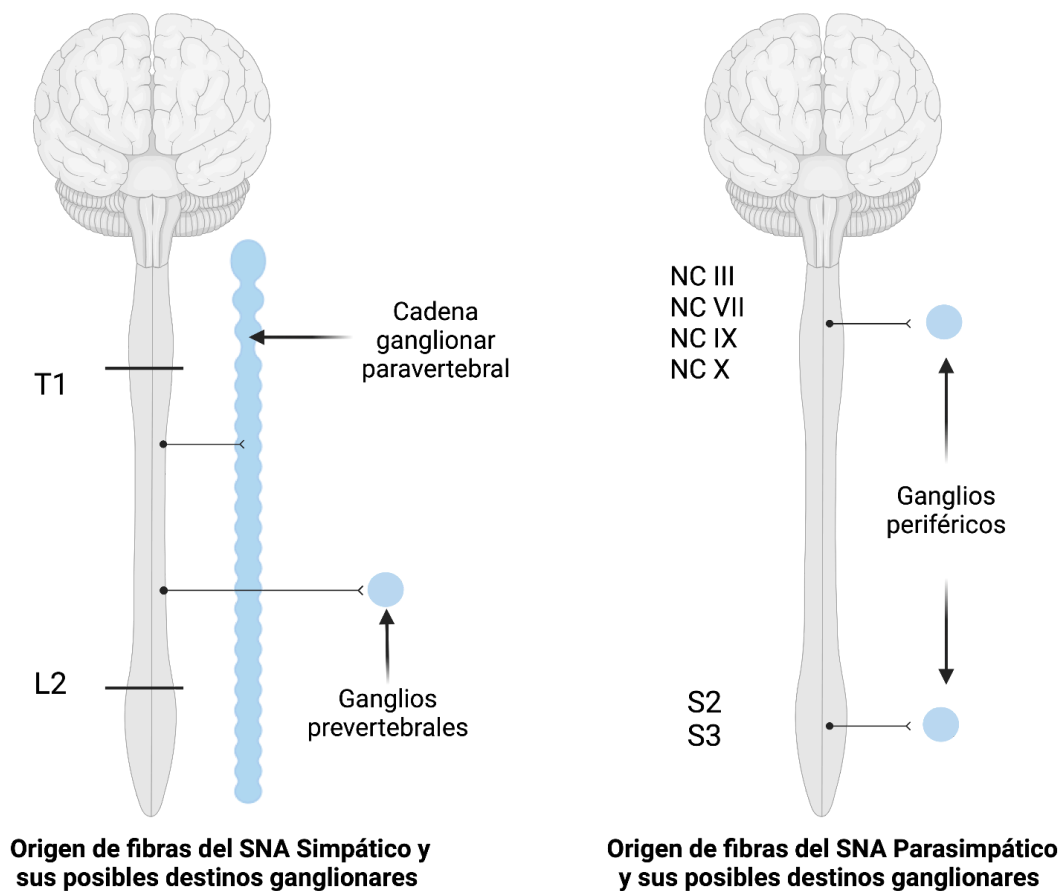
- Simpático
- Parasimpático
- Entérico

Las aferencias provienen de los órganos diana; estos informan sobre diferentes situaciones, sean aferencias dolorosas (nociceptivas), o estímulos mecánicos y

químicos (fisiológicos), estos últimos pueden ser de estiramientos, concentraciones de sustancias, temperatura, etc.

El sistema nervioso autónomo (SNA) parasimpático y simpático son los principales sistemas que inervan otra cosa que no sea músculo esquelético. Ambos actúan de manera sinérgica, y usualmente poseen funciones contrarias, así se regulan las actividades viscerales.

Sus neuronas preganglionares están en el tronco encefálico y la médula espinal mandan sus axones a los ganglios periféricos donde hacen sinapsis con las neuronas postganglionares y de aquí los axones se dirigen a su célula diana.

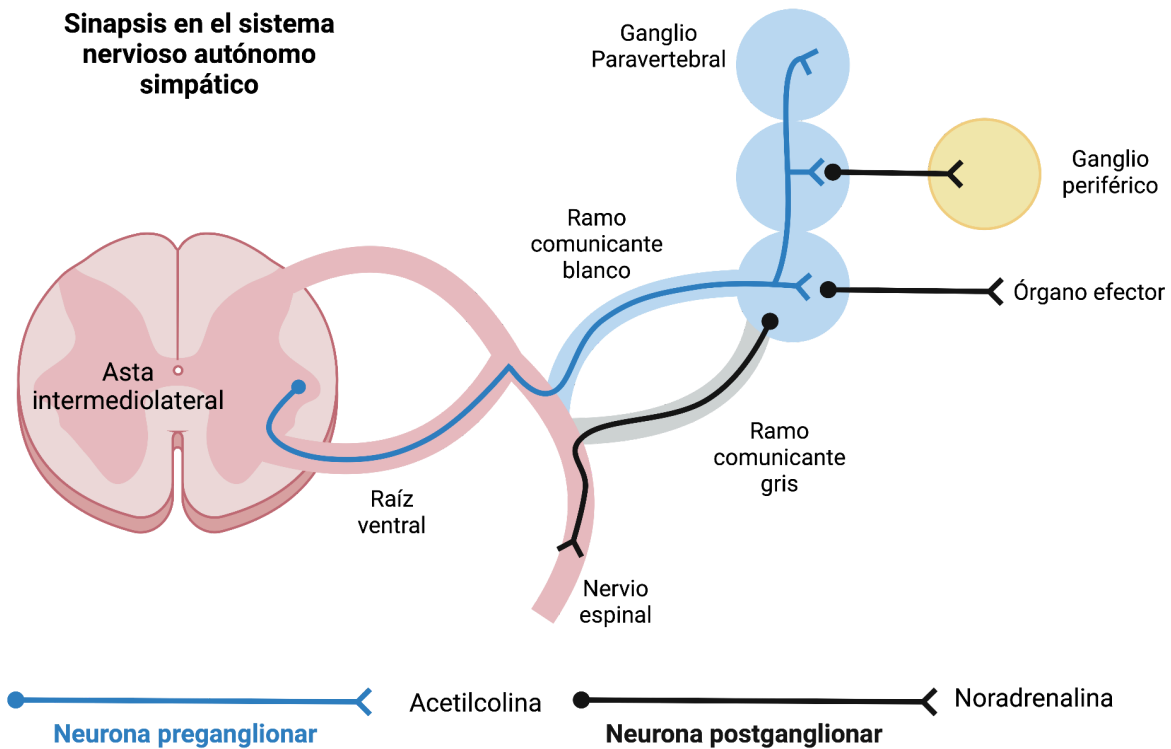


El SNA entérico tiene como células diana al sistema gastrointestinal. Este se compone de neuronas aferentes, interneuronas y neuronas eferentes que forman una red a lo que rodea el aparato gastrointestinal, a estas redes se les llama plexos. Tiene activación independiente o puede ser regulada su actividad por el SNAs y SNAp.

2.8.2 Sistema simpático y parasimpático.

Sistema Nervioso Autónomo Simpático (SNAs)

Sus neuronas preganglionares nacen de la médula, específicamente de segmentos **toracolumbares** (T1 -L2) en el asta lateral, De aquí acompañan al nervio raquídeo en su salida de la médula y se desvían por un ramo comunicante blanco hacia la cadena ganglionar simpática.



El SNA Simpático tiene dos tipos de ganglios donde la neurona presináptica puede hacer sinapsis.

El primer tipo son **ganglios paravertebrales** que se encuentran adyacentes a lo largo de toda la columna.

Estos se pueden fusionar proveyendo ganglios de mayor tamaño:

- Ganglio cervical superior: C1 - C4: e inerva la cabeza y el cuello.
- Ganglio cervical medio C5 - C6.
- Ganglio cervical inferior C7 - C8.

El medio e inferior inervan el corazón, los pulmones y los bronquios.

El segundo tipo son los **ganglios prevertebrales** los cuales se encuentran descansando sobre la aorta y sus ramas principales; más lejos de la columna y reciben el nombre según el vaso con mayor proximidad.

Son 5: Celiaco, Mesentérico superior, Aórtico-renal, Mesentérico inferior, Hipogástrico.

Una vez aclarado esto, la célula tiene tres opciones.

- La primera es que hace sinapsis en el ganglio paravertebral al mismo nivel de donde se originó,
- La segunda es ascender o descender por la cadena paravertebral y hacer sinapsis en un ganglio a un nivel diferente al de su origen.
- La tercera es irradiar hacia afuera y hacer sinapsis en los ganglios periféricos.

Se hace sinapsis en los ganglios con las neuronas postganglionares y de ahí los axones se dirigen a sus dianas adyacentes a los nervios raquídeos u órganos periféricos. Ambos tipos de ganglio sea paravertebral o prevertebral están más cerca de la médula que del órgano diana, por ende los axones postganglionares se consideran largos.

Funciones más importantes:

- Ojo: Apertura pupilar por activación de las fibras meridionales del iris.
- Glándulas apocrinas: Mayor secreción.
- Glándulas digestivas: Secreción de moco y enzimas.
- Circulación enteral: vasoconstricción.
- Glándulas sudoríparas: secreción.
- Corazón: Aumenta la fuerza de contracción y la frecuencia cardíaca.

Sistema nervioso autónomo parasimpático (SNAp).

Las neuronas preganglionares parasimpáticas nacen de áreas cráneo- sacras.

Craneal: Los cuerpos neuronales tienen sus núcleos en el tronco del encéfalo y en el mesencéfalo. Sus axones son parte de los nervios craneales. Los cuatro pares craneales de la división parasimpática son: el nervio oculomotor (III NC), el nervio facial (VII NC), el nervio glosofaríngeo (IX NC) y el nervio vago (X NC).

Sacra: Los somas están en los segmentos medulares S2 - S4.

Los **ganglios parasimpáticos "terminales"**, a diferencia del sistema simpático, están alejados de la médula, y están dentro de las paredes o contiguos al órgano diana. Es así que las neuronas preganglionares son largas y no hacen sinapsis hasta casi llegar al objetivo; la neurona posganglionar lanza un axón corto al órgano diana.

Aclaración: pueden ser células dispersas en vez de ganglios.

Nervios craneales. Se explicará su origen, ganglio donde hace sinapsis y sus funciones.

Nervio craneal	Origen	Ganglio donde hace sinapsis	Destino y funciones
III	Edinger-Westphal (forma parte del complejo del NC III.)	Ganglio ciliar	Músculo esfínter de la pupila provocando miosis Músculo ciliar que aumenta la convexidad del cristalino.
VII	Salival superior.	Ganglio pterigopalatino hacia glándula lagrimal. Ganglio submandibular hacia submandibular	Aumenta la secreción de las glándulas lagrimal, nasal y submandibular.
IX	Salival inferior	Ganglio ótico	Inerva a la glándula parótida y aumenta su secreción
X	Inerva desde el tórax al abdomen. Plexos esofágicos, torácicos, y cardíacos.	Ganglios al interior de los órganos diana.	Pulmones Control somático sobre la laringe, faringe y esófago Corazón (Nódulos AV y SA): Reduce la frecuencia cardíaca y fuerza de contracción. Si es muy intensa detiene el corazón. Sistema Gastrointestinal: Aumenta su actividad, aumenta el peristaltismo, aumenta la secreción, relaja esfínteres.

Nervios sacros:

No hay un asta lateral, pero los somas neuronales mandan axones por las raíces ventrales de la médula donde viajan adyacentes a los nervios espláncnicos pélvicos hasta los ganglios terminales de los órganos diana:

- Colon descendente, recto, vejiga, uréteres inferiores, órganos reproductores.

Las aferencias tienen topografía en el SNC.

Las neuronas aferentes tienen núcleos en los ganglios de la raíz dorsal o en los ganglios de los pares craneales. Sus axones reciben la información del exterior y utilizan a las fibras simpáticas y parasimpáticas para llegar al SNC; **las señales fisiológicas usan al sistema parasimpático, mientras que los nociceptivos usan al simpático.**

Un ejemplo es el nervio vago (X), este transporta señales fisiológicas desde las vísceras torácicas y abdominales, hace sinapsis en el ganglio nodoso y continúa hasta el puente. Siendo tanta la cantidad que la mayoría del nervio X está compuesto por neuronas aferentes.

En el caso de señales nociceptivas, entran a la médula espinal a un nivel dado y se dirigen al tronco encefálico. La precisión para ubicar el dolor es poca, este al entrar en su totalidad en segmentos específicos medulares es más un dolor "referido" que sigue la estructura de dermatomas, y esta organización se respeta en el cerebro. En otras palabras, **el dolor se sabe que dermatoma usa (segmento medular) más no que estructura inervada manda la señal nociceptiva.**

2.8.3 Sistema Nervioso Autónomo Entérico (SNA_E)

Este es un sistema periférico, son 2 plexos nerviosos que rodean al sistema gastrointestinal, y se compone de **interneuronas, neuronas aferentes y neuronas parasimpáticas postganglionares eferentes**; y se comunican entre sí por ganglios. Esta red de neuronas está entre las capas del tracto gastrointestinal.

El primer plexo es el **mientérico o de Auerbach** que se ubica entre las capas longitudinal externa y circular interna del músculo liso.

El segundo plexo es el **submucoso o de Meissner** y está entre la capa circular interna de músculo liso y la muscular de la mucosa.

Cada plexo tiene funciones diferentes pero sinérgicas. El plexo mientérico tiene funciones de control de motilidad, y el submucoso controla el transporte iónico y líquido principalmente.

El SNA_E funciona de manera independiente; es decir responde a estímulos locales y controla una gran parte de la función intestinal. Pero también es regulado por el SNA_S y SNA_P. El SNA_P lo inerva con neuronas preganglionares del nervio craneal X o sacras, mientras que el SNA_S lo inerva y regula con sinapsis postganglionares

2.8.4 Organización funcional

Si prestamos atención las funciones simpáticas y parasimpáticas son contrarias, la función simpática es activadora cuando la actividad física es necesaria, mientras que

la parasimpática es inhibidora. pero, en el caso de necesitar relajación los roles se invierten, la función parasimpática es activadora y la simpática es inhibidora.

Hay excepciones: En el caso de las glándulas sudoríparas, los músculos piloerectores y la mayoría de los vasos sanguíneos periféricos reciben inervación solamente del sistema simpático.

Neurotransmisores:

Las neuronas preganglionares sean simpáticas o parasimpáticas liberarán acetilcolina (ACh), y se unen a receptores nicotínicos ($N_N / 2$); mientras que las neuronas postganglionares pueden liberar compuestos colinérgicos o adrenérgicos.

Se libera acetilcolina (colinérgico) por el sistema parasimpático en todas sus sinapsis y el sistema simpático la utiliza en las glándulas sudoríparas y vasos sanguíneos.

Los compuestos adrenérgicos son liberados por casi todas las neuronas postganglionares del sistema simpático.

El neurotransmisor se une a un receptor y estos pueden actuar de diferentes maneras;

- Aquellos que son canales activados por ligando (el neurotransmisor) modificarán la permeabilidad de algún ion y por ende el potencial de membrana de la célula, despolarizando o polarizando la misma.
- Otro tipo de funcionamiento es donde hay un receptor acoplado a proteína G, la cual modifica una enzima intracelular, es activada o inactivada y por ende alterando acciones intracelulares. El receptor en sí, es una cadena polipeptídica que gira 7 veces a través de la membrana, estos son los 7 dominios transmembrana; posee un dominio extracelular que es donde se une el ligando, y un dominio intracelular que se acopla a esta proteína G.

Sistema colinérgico (acetilcolina)

Activa a canales activados por ligando (nicotínicos), son permeables a Na^+ y K^+ . Se encuentran en las neuronas postganglionares (NN) y células cromafines de la médula suprarrenal (NN).

Estos receptores activan a la neurona postganglionar de manera rápida mientras que los receptores acoplados a proteína G son metabotrópicos si usan ACh son: "muscarínicos". La proteína G tiene sub unidades α , β , y γ .

La subunidad alfa tiene tres posibilidades de funciones diferentes:

1) Estimular la hidrólisis de fosfoinosítidos (G_{aq}),

Activa la fosfolipasa C liberando inositol 1,4,5-trisfosfato (IP3) y diacilglicerol y aumentan las concentraciones de Ca^{++} intracelulares.

2) activar a la enzima adenilato ciclasa(G_{ao})

Activan a AC y $\uparrow$ la concentración de AMP cíclico: [AMPc]_i

3) inhibir a la adenilato ciclasa(G_{ai}).

Activan a AC y $\downarrow$ la concentración de AMP cíclico: [AMPc]_i

Su respuesta sobre el órgano blanco son lentas y prolongadas.

Estos receptores metabotrópicos se encuentran en todos los órganos blanco del sistema parasimpático, y las glándulas sudoríparas (que las activa el SNA_s). Hay 5 tipos de receptores muscarínicos: M1 - M5, en el caso de M1, M3, M5 usan son receptores que usan G α_q . En el caso de M2 y M4 se unen a G_{ai} o G_{ao}.

Sistema adrenérgico (noradrenalina, adrenalina).

Todos los receptores de este sistema son metabotrópicos, y al igual que los receptores muscarínicos, poseen los tres dominios que se acoplan a una proteína G.

Hay dos divisiones grandes de estos receptores adrenérgicos: α y β ,

(no hay que confundirnos con las subunidades de la proteína G)

- Los receptores alfa son de dos tipos: 1 y 2. Y son más afines a la noradrenalina que a la adrenalina. El receptor α_1 es G α_q , el receptor α_2 es G_{ai}.
- Los receptores beta son de 3 tipos: 1, 2, o 3, los tres usan G_{ao} por lo que activan a la adenilato ciclasa. Estos son más afines a la adrenalina.

Un componente especial son las células cromafines de la médula en la glándula suprarrenal, como se mencionó previamente la activación de estas células se hace por la neurona presináptica simpática y un receptor nicotínico, lo que provoca la liberación de adrenalina al torrente sanguíneo y activará a los receptores metabotrópicos del sistema adrenérgico.

Las ubicaciones de estos receptores están en una tabla más adelante.

2.9 Sistema límbico

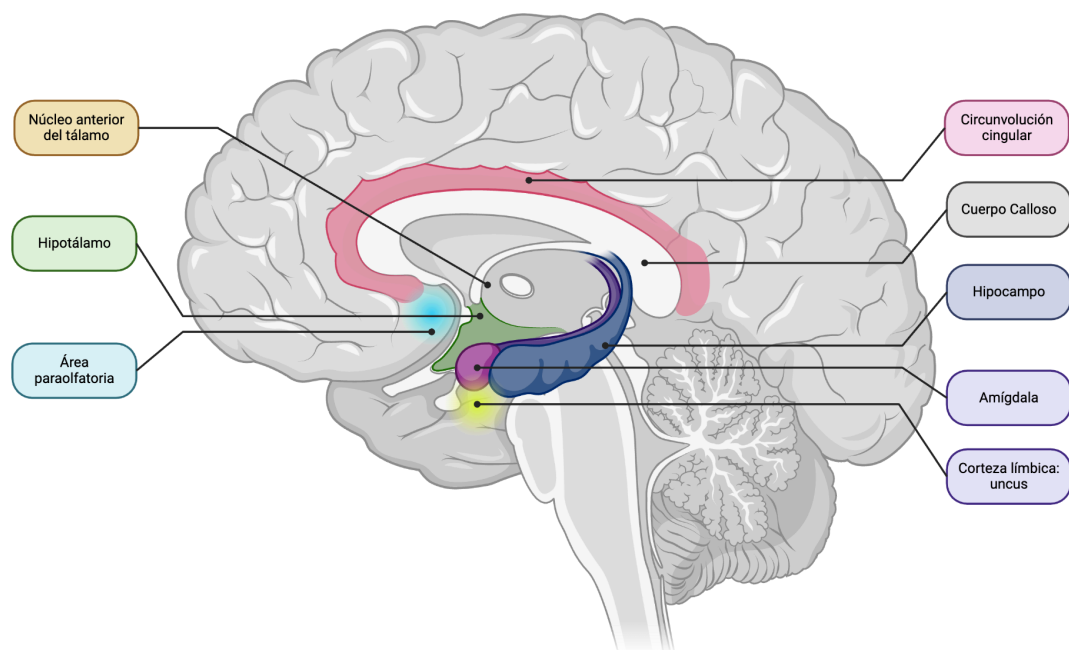
La palabra «límbico» significa «limítrofe». Actualmente el sistema límbico hace referencia a un **circuito neuronal que controla el comportamiento emocional y los impulsos de las emociones.**

Función

- Control del comportamiento emocional y motivaciones.
- Control vegetativo:
 - Regulación de estados internos del cuerpo (temperatura, osmolalidad)
 - Regulación de impulsos como beber o comer.

Estructuras

- Hipotálamo (Componente nuclear, principal)
- Núcleos septales
- Área paraolfatoria
- Núcleos anteriores del tálamo
- Ganglios basales
- Hipocampo
- Amígdala
- Corteza límbica
- Núcleos reticulares del tronco encefálico
 - El fascículo prosencefálico medial es utilizado en la transmisión entre sistema límbico y tronco encefálico .

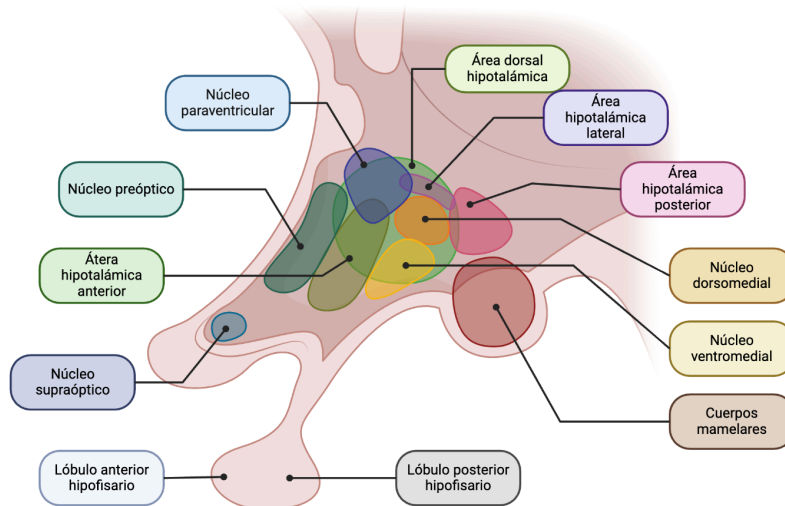


2.9.1 Hipotálamo

Se localiza en el centro del sistema límbico, es un área difusa de núcleos sobre el infundíbulo. Tiene **comunicación bidireccional** con el resto del sistema.

Aunque representa solo una pequeña parte de la masa encefálica total, se encarga de regular la mayoría de las funciones vegetativas, endocrinas y de comportamiento emocional.

Áreas y núcleos del Hipotálamo

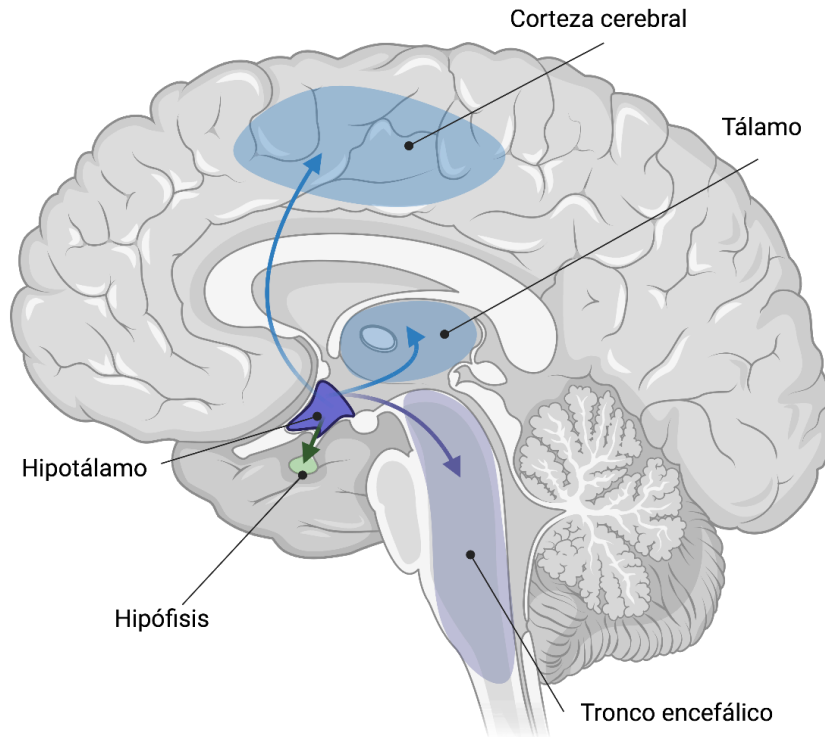


Eferencias

El tálamo puede enviar eferencias en 3 direcciones diferentes:

- **Posterior e inferior:** Hacia el tronco del encéfalo principalmente el área reticular del mesencéfalo, puente y bulbo raquídeo, y de ahí a los nervios periféricos del sistema nervioso autónomo.
- **Superior:** Hacia zonas del diencefalo y mesencéfalo, especialmente hacia núcleos anteriores del tálamo y porciones límbicas de la corteza cerebral.
- **Hacia el Infundíbulo:** Se dirige a esta región del hipotálamo para control de la secreción hipofisiaria.

Eferencias del hipotálamo



Funciones vegetativas

Función vegetativa	Áreas involucradas en el control y su función
Regulación cardiovascular	Hipotálamo lateral y posterior: Aumenta la tensión arterial y frecuencia cardíaca. Área preóptica: Disminuye tensión arterial y frecuencia cardíaca.
Regulación del agua corporal	Hipotálamo lateral(Centro de la sed) : Origina la sensación de sed cuando hay aumento de concentración de electrolitos. Núcleos supraópticos: Control de la excreción renal de agua por aumento de la concentración de líquidos corporales. Se encarga de mandar fibras a la neurohipófisis para liberar hormona ADH la cual favorece la reabsorción de agua en el riñón.
Regulación digestiva y de la alimentación	Área hipotalámica lateral: Enciende el deseo de alimentarse. Núcleos ventromediales: Son el centro de la saciedad. Núcleo arqueado: Puede provocar aumento y disminución de apetito. Cuerpos mamilares: Manejan los reflejos de la alimentación como lamerse los labios y deglutir.

Regulación de la temperatura corporal

Área preóptica: Regula elevaciones o disminuciones en la temperatura corporal

Regulación de la contractilidad uterina y de la expulsión de leche por la mama

Núcleos paraventriculares: Favorecen secreción de oxitocina lo que aumenta la contractilidad del útero y células mioepiteliales en alvéolos mamarios.

Control de los ritmos circadianos

Núcleo supraquiasmático: Es un marcapasos para organizar el patrón sueño-vigilia.

Funciones conductuales

Efectos generados por estimulación del hipotálamo

- Estimulación del hipotálamo lateral : hambre, sed, estado de enojo y lucha.
- Estimulación del núcleo ventromedial: Saciedad, menor ingesta y tranquilidad.
- Estimulación de la zona fina de los núcleos periventriculares: Temor y reactividad ante el castigo.
- Estimulación de porciones anteriores y posteriores: Impulso sexual.

Una lesión en cualquiera de estas zonas provocará el efecto contrario de su acción.

2.9.2 Mecanismos de recompensa y castigo en el sistema límbico

Gracias al sistema límbico se identifica lo **agradable o desagradable**, lo agradable es la recompensa y lo desagradable es el castigo. La estimulación eléctrica de ciertas zonas límbicas **agrada o satisface**, mientras que la actuación sobre otras regiones causa **terror, dolor, miedo, reacciones de defensa o de huida**, y todos los demás elementos acarreados por el castigo.

Centros de recompensa

- Núcleos ventromedial del hipotálamo.
- Núcleo lateral del hipotálamo
 - Si es estimulado intensamente la sensación es de castigo.
- Región septal
- Amígdala

- Tálamo
- Ganglios basales
- Mesencéfalo

Centros de castigo

- Sustancia gris periacueductal del mesencéfalo: Promueven la huida y reciben el castigo.
- Zonas periventriculares del hipotálamo y tálamo.
- Zona periventricular del hipotálamo.
- Hipotálamo lateral
- Amígdala
- Hipocampo
- **El castigo y miedo pueden tener prioridad sobre las sensaciones de placer,** ya que los centros de castigo inhiben a los de recompensa.
- El patrón de la ira se asocia a los centros de castigo.
 - Se caracteriza en un animal por:
 - Postura defensiva
 - Levantamiento de cola
 - Gruñidos
 - Extensión de garras
 - Piloerección
 - Pupilas dilatadas.
 - Estas reacciones se contienen por el **núcleo ventromedial del hipotálamo, la corteza límbica anterior.**

Si ninguno de estos centros es activado con la realización de alguna actividad es **difícil de recordar** ya que, en lugar de que la señal sea reforzada, esta se desvanece.

2.9.3 Hipocampo

El hipocampo forma parte de la **corteza temporal**. Es una estructura que se dobla hacia dentro para formar la cara ventral de gran parte del ventrículo lateral por su interior. Posee conexiones con muchas regiones de la corteza cerebral , amígdala, hipotálamo, región septal y cuerpos mamilares.

Se activa por cualquier **experiencia sensitiva** y produce diferentes **patrones de comportamiento**, como el placer, la ira, la pasividad o el impulso sexual excesivo.

Es una estructura **hiperexcitable**, es decir, algunos estímulos eléctricos débiles tienen la capacidad de originar convulsiones epilépticas focales en pequeñas zonas del hipocampo, las cuales suelen mantenerse varios segundos después del estímulo original, por lo cual se considera que es una estructura que envía señale aún más prolongadas que su estímulo.

Cuando ocurren estas convulsiones, la persona puede llegar a experimentar efectos como **alucinaciones olfatorias, visuales, auditivas o táctiles**.

Hipocampo y aprendizaje

El hipocampo se originó de la corteza olfatoria, en algunos animales esta región tiene una función en la elección de ingerir o no un alimento dependiendo de su olor.

Conforme se dio la evolución, el hipocampo se convirtió en un circuito neuronal para la **elección de decisiones** al establecer la **importancia** de las señales recibidas. Es por esto que, dado que tiene la capacidad de determinar si una señal tiene importancia o no, es probable que su contenido se encuentre **memorizado**.

Se ha propuesto que el hipocampo **aporta el impulso que produce la traducción de la memoria a corto plazo en memoria a largo plazo**: es decir, el hipocampo transmite señales que parecen condicionar en la mente la repetición constante de la información nueva hasta que tenga lugar su almacenamiento permanente. Sea cual sea el proceso que ocurre, sin el hipocampo la consolidación a largo plazo de los recuerdos de tipo verbal o de pensamiento simbólico es deficiente o no tiene lugar.

2.9.4 Amígdala

La amígdala es un complejo conformado por múltiples núcleos pequeños, se encuentra por debajo de la corteza cerebral en el polo anteromedial de cada lóbulo temporal.

Contiene **conexiones bilaterales** con el hipotálamo y otras zonas del sistema límbico.

Aferencias

Recibe aferencias de todas las porciones de la corteza límbica y de la neocorteza de los lóbulos temporal, parietal y occipital, así como de áreas visuales y auditivas.

Por sus funciones y aferencias variadas, se considera una “ventana” por la que el sistema límbico se asoma para ver qué lugar ocupa la persona en el mundo.

Eferencias

- Zonas corticales aferentes
- Hipocampo
- Región septal
- Tálamo
- Hipotálamo

Efectos causados por su estimulación

La amígdala parece ser un área encargada de aportar conocimiento para el comportamiento, que opera a un nivel semiconsciente.

También da la impresión de remitir al sistema límbico **cuál es el estado actual de alguien en relación con el medio que lo rodea** y con sus pensamientos. A partir de esta información, se cree que la amígdala prepara la respuesta de comportamiento adecuada de esa persona para cada ocasión.

Acciones que nacen en la amígdala y se envían a través del hipotálamo	Patrones activados por estimulación directa
• Cambios en la frecuencia cardíaca y tensión arterial • Cambios en la secreción gastrointestinal • Defecación o micción • Piloerección • Secreción de hormonas hipofisiarias. • Eyaculación • Ovulación	• Huida • Castigo • Dolor intenso • Miedo • Funciones con objetivo sexual: • Erección • Movimiento de cópula • Actividad uterina.

2.9.5 Corteza límbica

Se conforma por un anillo de corteza cerebral en la línea media.

Funciona como una **zona de transición entre la corteza cerebral y el sistema límbico** con conexiones bidireccionales por lo que se puede considerar como un área cerebral de asociación para el control del comportamiento.

2.10. Actividad eléctrica del cerebro, estados de sueño-vigilia y ritmos circadianos

Existen múltiples estados posibles que presenta la actividad cerebral, como el **sueño, la vigilia, la excitación extrema**, diversos estados de ánimo de una persona como la **euforia, la depresión y el miedo**. Cualquiera de estos estados obedece a distintas fuerzas activadoras o inhibidoras generadas normalmente en el encéfalo.

2.10.1 Sueño

En los seres humanos el principal periodo de descanso es el sueño, este se define como el **estado de inconsciencia del que puede ser despertada una persona** mediante estímulos sensitivos o de otro tipo o como un estado de **inactividad fácilmente reversible** que se caracteriza por la falta de interacción con el medio.

Existen evidencias que indican una relación entre el sueño y la memoria, algunos estudios demuestran que la falta de sueño afecta las habilidades cognitivas y de memoria.

El cerebro durante el sueño consume la misma cantidad de oxígeno que durante la vigilia y por lo tanto, el sueño es un estado de actividad metabólica. En estados de vigilia, muchas neuronas disparan de manera descoordinada, sin embargo durante el sueño la actividad eléctrica de las neuronas comienza a sincronizarse en ondas con patrones específicos.

El sueño se encuentra integrado por varias fases que varían desde un sueño ligero hasta un sueño profundo. Existen dos tipos de sueño que se alternan entre sí, uno que se caracteriza por la aparición de movimientos oculares rápidos (**Sueño REM**) y otro en el que aparecen ondas lentas registradas en el electroencefalograma (**Sueño no REM o NREM**).

Vigilia	Sueño
Ondas de alta frecuencia y baja amplitud	Ondas con frecuencia más baja y mayor amplitud

Sueño REM (Sueño paradójico o desincronizado)

Durante un periodo completo de sueño, los episodios de sueño REM tienen una duración de **5 a 30 minutos** y aparecen cada **90 minutos** en adultos jóvenes.

Características:

- Es una forma activa de sueño, **se asocia con los sueños** y con movimientos activos de los músculos del cuerpo.
- Es más difícil despertar a la persona con estímulos sensoriales que durante el sueño de ondas lentas.
- Generalmente las personas se despiertan de forma espontánea por la mañana durante un episodio de sueño REM.
- **El tono muscular en todo el cuerpo se encuentra muy deprimido**, lo que indica una fuerte inhibición de las zonas espinales de control de los músculos, excepto de los oculares y de la respiración.
- **Las frecuencias cardíaca y respiratoria se vuelven irregulares.**

- El metabolismo encefálico general puede incrementarse hasta en un 20%.
- La temperatura del cuerpo baja al valor de la temperatura del ambiente.
- En el electroencefalograma (EEG) se muestra un patrón de **ondas cerebrales similar al que se produce durante la vigilia**. Este tipo de sueño se denomina también paradójico, debido a que resulta una paradoja que la persona siga dormida a pesar de la presencia de una acusada actividad cerebral.

Sueño NREM

Es un sueño resulta sumamente reparador y va asociado a un **descenso del tono vascular periférico** y de otras muchas funciones vegetativas del cuerpo.

- Hay una **disminución del 10 al 30% en la presión arterial, la frecuencia respiratoria y el índice metabólico basal**.
- Durante ese sueño se pueden generar sueños o pesadillas pero **no suelen recordarse** porque no tiene lugar la consolidación de los sueños en la memoria.

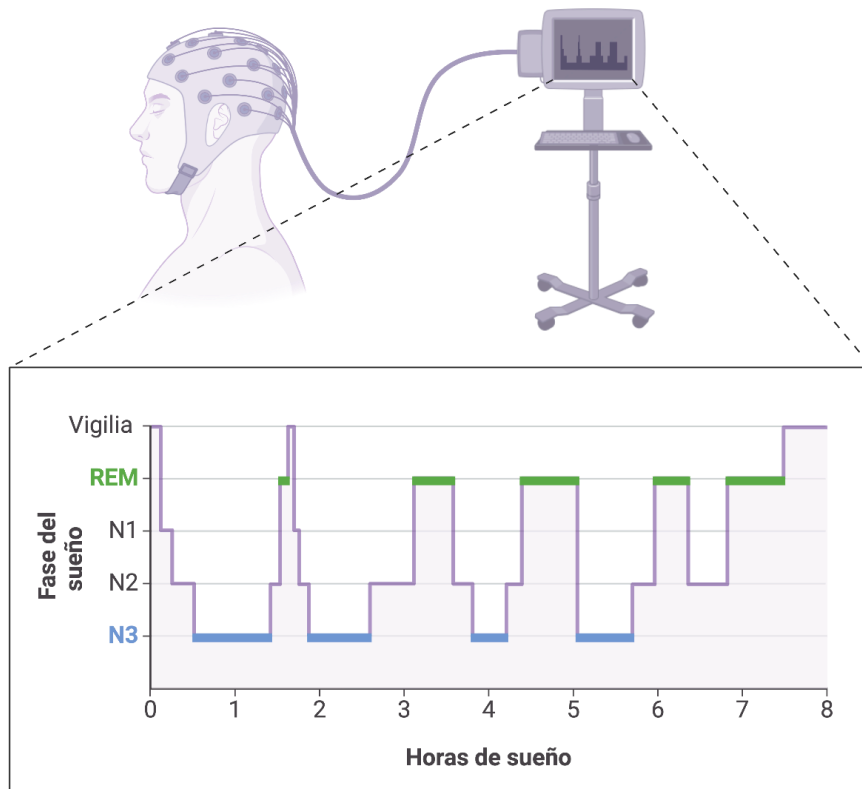
Este sueño a su vez se divide en los estadios N1, N2 y N3, este último también es llamado sueño de onda lenta o profundo.

Fases del sueño a lo largo del tiempo

Durante un periodo típico de sueño de 8 horas, se observan ciclos repetidos de alternancias.

- Durante la primera hora, la persona pasa de un estado de vigilia a N1 y N2 y posteriormente a un sueño profundo o N3.
- Después hay una alternancia entre ciclos de sueño profundo y sueño REM con los estadios N1 y N2 .
- Hacia el final del periodo de sueño, la persona pasa la mayor parte del tiempo en N1 y sueño REM hasta que finalmente despierta.

Cambios en las fases del sueño detectadas por electroencefalograma



2.10.2 Ondas cerebrales

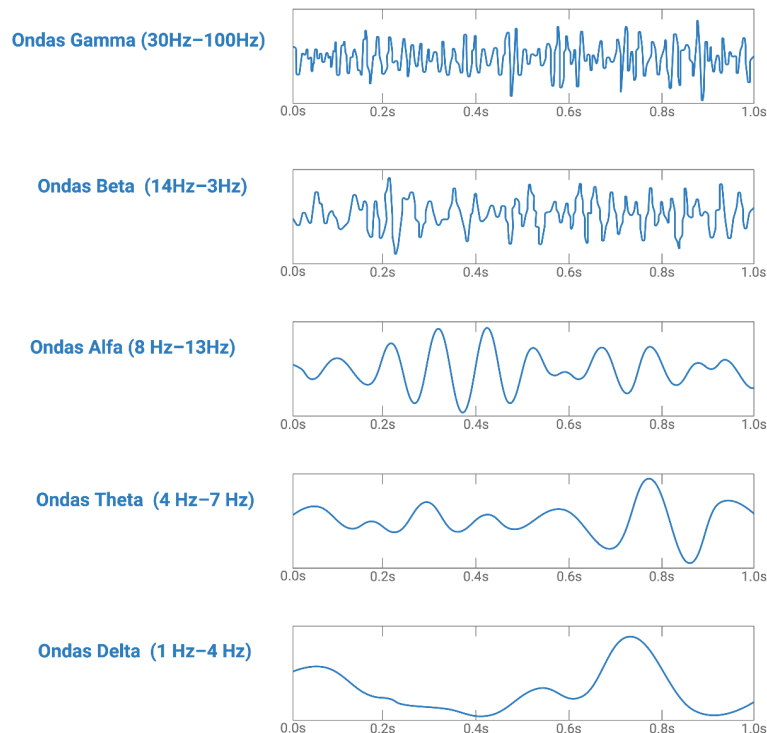
Tanto la intensidad como los patrones durante cada fase del sueño, durante la vigilia o incluso durante trastornos cerebrales como la epilepsia o incluso las psicosis, vienen determinados por el **grado de excitación que presentan sus diversos componentes**. Las ondulaciones de los potenciales eléctricos representadas en un electroencefalograma, se llaman **ondas cerebrales**.

- Su intensidad puede variar desde 0 hasta los 200 μV .
- Su frecuencia va desde una vez cada varios segundos hasta 50 o más por segundo.
- En personas sanas, las ondas pueden clasificarse en ondas α , β , γ , θ , y δ .

Onda	Frecuencia	Estado en el que aparecen
α (Alfa)	8-13 Hz	Durante la vigilia en reposo . Prevalentes en región occipital.
β (Beta)	14-80 Hz	Durante la vigilia cuando algo despierta la atención de la persona.

		Prevalentes en región parietal y frontal.
γ (Gamma)	30-100 Hz	Durante algún trabajo se necesita mucha concentración.
θ (Theta)	4-7 Hz	Aparecen sobre todo en niños en región parietal y temporal, o en adultos ante estrés emocional. Aparecen durante la fase REM.
δ (Delta)	1-4 Hz	Aparecen sobre todo cuando se está profundamente dormido y sin descansar en N3.

Ondas cerebrales



En una persona en vigilia que se encuentran con los ojos cerrados, se pueden encontrar ondas alfa, sin embargo cuando esta abre los ojos se cambia a un patrón de ondas beta.



2.11. Funciones integrativas: memoria y aprendizaje

2.11.1 Cuerpo calloso y comisura anterior

Las fibras del cuerpo calloso funcionan como conexiones nerviosas bidireccionales que comunican con la mayoría de áreas corticales de los dos hemisferios, a excepción de las porciones anteriores de los lóbulos temporales (especialmente la amígdala).

Funciones:

- Poner la información almacenada en la corteza de un hemisferio a disposición del área cortical correspondiente del hemisferio opuesto, gracias a esto, se logra que ambos hemisferios cooperen en su acción a nivel subconsciente superficial.
- La comisura anterior unifica las respuestas emocionales de ambos lados del cerebro.

2.11.2 Pensamientos

Se puede definir al pensamiento como un **patrón de estimulación de múltiples componentes del sistema nervioso que se activan al mismo tiempo**.

Actualmente se sabe que la destrucción de grandes regiones de la corteza cerebral no impide la generación de pensamientos en una persona, pero los vuelve menos profundos y con menor grado de conciencia.

Cuando se genera un pensamiento ocurren señales simultáneas en diferentes regiones de la corteza cerebral, tálamo, sistema límbico y en la formación reticular, sin embargo cuando son **pensamientos básicos**, éstos sólo dependen de centros inferiores en el sistema nervioso central, un ejemplo de esto es el pensamiento de **dolor**, por el contrario, **pensamientos complejos** como el análisis de algo que se está observando para **percibir formas o colores** depende más de la corteza cerebral que de centros inferiores.

2.11.3 Memoria

Cada uno de nuestros recuerdos se encuentran almacenados en el cerebro a través de la activación de vías previamente activadas que dejan algo llamado “ **huellas de memoria**”. El cerebro puede **variar la sensibilidad** de una transmisión sináptica después de haber experimentado una actividad nerviosa previa.

Las huellas de memoria se pueden encontrar tanto en la corteza cerebral como en centros inferiores, y esto tiene relación con los recuerdos a largo plazo, corto plazo y recuerdos asociados a mecanismos intelectuales.

A lo largo de la vida, el cerebro va recopilando información sensitiva todos los días, por lo que si se buscara recordar absolutamente todo , sería un sistema fácilmente saturable y con exceso de información, pero el cerebro tiene la **capacidad de aprender a ignorar la información irrelevante** a través de un proceso de inhibición de vías sinápticas, a este proceso se le llama habituación. La **habituación** se considera un tipo de memoria negativa.

Cuando el cerebro detecta información relevante, se encarga de **facilitar** las vías sinápticas para poder potenciar y almacenar las huellas de memoria, a esto se le conoce como **sensibilización de la memoria** y se considera un tipo de memoria positiva.

Clasificación de la memoria

Tipo de memoria	Características
De acuerdo al tiempo de almacenamiento de información	
Memoria a corto plazo	Recuerdos que duran segundos o minutos
Memoria a mediano plazo	Recuerdos que duran días a semanas
Memoria a largo plazo	Recuerdos que una vez que se almacenan, pueden recuperarse años más tarde o a lo largo de toda la vida
De acuerdo al uso que se le da a la información	
Memoria operativa	Memoria a corto plazo utilizada durante el razonamiento intelectual pero que se desvanece cuando se resuelve un problema.
De acuerdo al tipo de información almacenada	
Memoria declarativa	Recuerdo de los detalles que forman un pensamiento integrado de alguna experiencia y que responda: ¿Dónde ocurrió? ¿cuándo ocurrió? ¿Qué lo causó? ¿Qué

Memoria procedimental

¿qué consecuencias tuvo? ¿Cuál fue su significado?

Recuerdos de actividades motoras del cuerpo , como por ejemplo practicar algún deporte.
Implica observación, memoria muscular de fuerza y precisión, velocidad, etc.

2.11.4 Mecanismos de consolidación de memoria

La memoria a mediano plazo es capaz de originar recuerdos a través de la interacción entre dos terminales presinápticos , uno llamado **terminal sensitivo y otro terminal facilitador** .

El terminal facilitador hace sinapsis sobre el terminal sensitivo y el terminal sensitivo sobre otra neurona postsináptica y eso genera que se habitúe o facilite la vía.

Habitución

Si un terminal sensitivo se estimula de manera repetida pero **sin la activación del terminal facilitador**, la transmisión de la señal va disminuyendo su intensidad conforme pasa el tiempo hasta que la actividad se detiene por completo. Esto es un proceso de habituación.

Lo que debe ocurrir para que se de este fenómeno es un cierre creciente de canales de calcio en neurona presináptica sensitiva, lo que genera menor liberación de neurotransmisor hacia la neurona postsináptica.

Facilitación

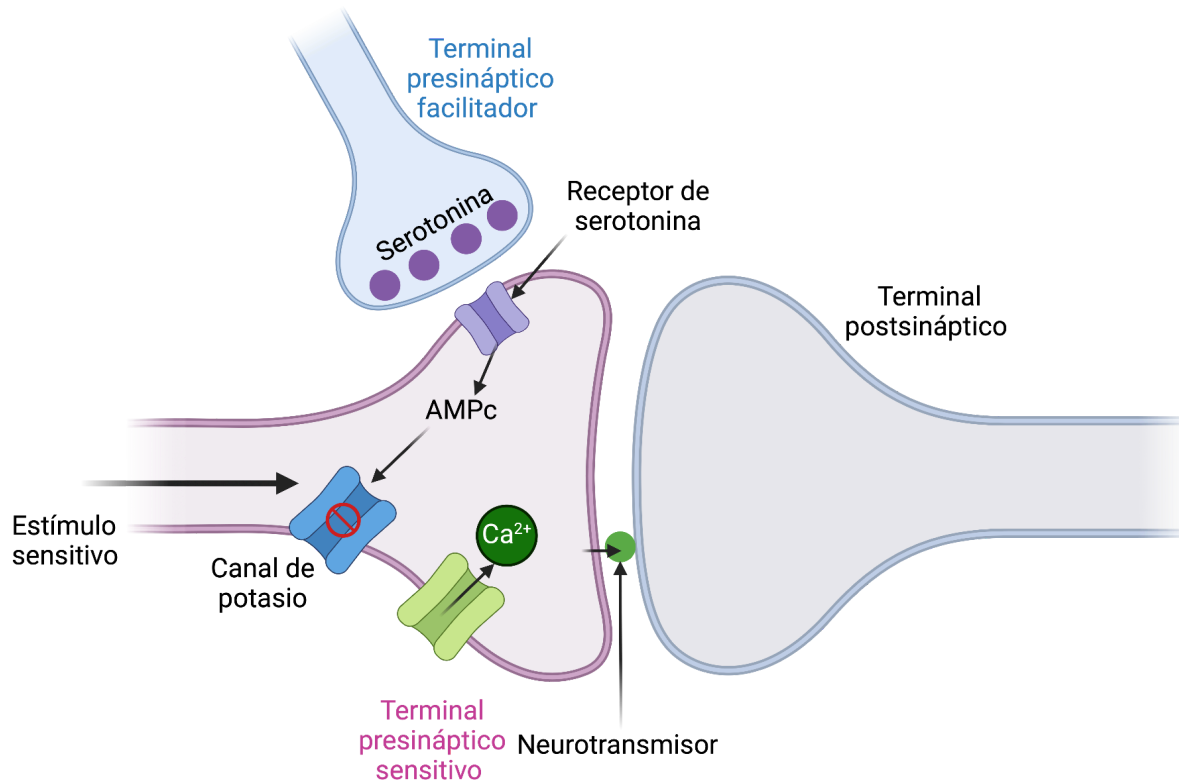
Si un estímulo nocivo **excita el terminal facilitador al mismo tiempo que el sensitivo**, la fluidez de la sinapsis se hace progresivamente mayor y se genere la facilitación de la vía.

Cuando ambos terminales se activan al mismo tiempo, hace que el terminal facilitador libere serotonina sobre el terminal sensitivo.

1. La serotonina actúa sobre sus receptores los cuales activan a la adenilato ciclasa para formar AMPc dentro del terminal presináptico sensitivo.
2. El AMPc activa a una proteína cinasa para fosforilar y bloquear una proteína de los canales de potasio.
3. La falta de permeabilidad al potasio genera que los potenciales de acción se hagan cada vez más duraderos por retardo en la repolarización.
4. Este potencial de acción prolongado, hace que los canales de calcio permanezcan más tiempo abiertos y entren grandes cantidades de calcio al terminal sensitivo.

- Entre más calcio haya, se liberará más neurotransmisor , lo que facilita la sinapsis.

Cambios químicos en memoria a mediano plazo



La memoria a largo plazo depende de **cambios estructurales** en la sinapsis en vez de solo cambios químicos y algo importante es que la repetición potencia el paso de memoria de corto o mediano plazo a largo plazo. Los cambios estructurales que se favorecen pueden ser los siguientes:

- Aumento de los puntos para la liberación de vesículas de secreción de la sustancia transmisora.
- Aumento de la cantidad de vesículas transmisoras liberadas.
- Aumento del número de terminales presinápticos.
- Variaciones en la estructura de las espinas dendríticas que permiten la transmisión de señales más potentes.

2.11.5 Hipocampo y memoria

El hipocampo se localiza entre las vías de salida más importantes procedentes de las áreas de recompensa y castigo del sistema límbico, estas experiencias agradables o desagradables promueven el impulso de recordar ciertas situaciones. Los hipocampos, en particular, en menor medida, y los núcleos dorsomediales del tálamo,

otra estructura de tipo límbico, son importantes para tomar la decisión acerca de cuáles de nuestros pensamientos reúnen un interés suficiente como para merecer el recuerdo en virtud de las facetas de la recompensa o el castigo.

2.11.6 Aprendizaje

Desde que somos pequeños, el encéfalo comienza a generar neuronas con ramas axónicas que establecen sinapsis con otras neuronas, y estas **conexiones están determinadas por factores de crecimiento nervioso específicos** que se liberan en sentido retrógrado. Si una neurona no logra hacer sinapsis con otra célula excitable, se disolverán en un plazo de pocas semanas.

Este concepto de generar o no una conexión, determina el número final de neuronas conectadas, y esto se trata de un tipo de aprendizaje. Un ejemplo es, si el ojo de un animal recién nacido se tapa durante muchas semanas después del parto, las neuronas de las bandas alternas de la corteza cerebral visual, conectadas normalmente al ojo cubierto, degenerarán y el ojo tapado permanecerá parcial o totalmente ciego durante el resto de su vida.

Referencias bibliográficas:

- Guyton & Hall. Tratado de Fisiología Médica. 14 a Edición. España: Elsevier. 2021.
- Berne & Levy. Fisiología. 7a Edición. Madrid: Elsevier. 2018.
- Boron & Boulpaep. Fisiología Médica. 3a Edición. Madrid: Elsevier. 2017.
- Ganong. Fisiología Médica. Barret, Barman, Boitano & Brooks. 26a Edición. México: McGraw-Hill Interamericana. 2020.
- Harrison. Principios de Medicina Interna. Kasper, Fauci, Hauser, Longo, Jameson & Loscalzo. 20a Edición. México: McGraw-Hill. 2018.
- Ilustraciones creadas con BioRender.com