

RECEPTORES SENSITIVOS, CIRCUITOS NEURONALES PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

I. Tipos de receptores sensitivos

Existen 5 tipos de receptores sensitivos:

1. Mecanorreceptores: perciben compresión mecánica o estiramiento
2. Termorreceptores: detectan cambios de temperatura, unos perciben calor y otros frío
3. Nocirreceptores: detectan daños físicos o químicos en los tejidos
4. Electromagnéticos: perciben luz en la retina
5. Quimiorreceptores: involucrados en el gusto, el olfato, la detección de la concentración de oxígeno y dióxido de carbono en sangre

Cada tipo de receptor tiene **sensibilidades diferenciales** que le permiten detectar estímulos específicos y a la sensación en sí se le denomina **modalidad** de sensación (dolor, tacto, visión, sonido y otras). Las modalidades se perciben distinto de acuerdo al lugar del SNC a donde se conducen los fascículos que transmiten la señal. En otras palabras, el tipo de modalidad sentida depende del fascículo que detecta el estímulo y del lugar al que este se conduce dentro del SNC. A esta característica de las fibras se le llama **principio de la línea marcada**.

Ver la **tabla 1** para una clasificación más detallada.

Mecanorreceptores	Sensibilidades táctiles cutáneas	Terminaciones nerviosas libres	
		Terminaciones bulbares	Discos de Merkel
		Terminaciones en ramillete	
		Terminaciones de Ruffini	
		Terminaciones encapsuladas	Corpúsculos de Meissner
			Corpúsculos de Krause
	Órganos terminales de los pelos		
	Sensibilidades de los tejidos profundos	Terminaciones nerviosas libres	
		Terminaciones bulbares	
		Terminaciones en ramillete	Terminaciones de Ruffini
		Terminaciones encapsuladas	Corpúsculos de Pacini
		Terminaciones musculares	Husos musculares
Receptores tendinosos de Golgi			

	Oído	Receptores de la Cóclea
	Equilibrio	Receptores vestibulares
	Presión arterial	Barorreceptores de los senos carotídeos y la aorta
Termorreceptores	Frío	
	Calor	
Nocirreceptores	Dolor	Terminaciones nerviosas libres
Receptores Electromagnéticos	Visión	Conos
		Bastones
Quimiorreceptores	Gusto	Receptores de los botones gustativos
	Olfato	Receptores del epitelio olfatorio
	Oxígeno arterial	Receptores de los cuerpos carotídeos y aórticos
	Osmolalidad	Neuronas de los núcleos supraópticos o de sus inmiaciones
	CO ₂ sanguíneo	Receptores del bulbo raquídeo o de su superficie
		Receptores de los cuerpos carotídeos y aórticos
Glucosa, aminoácidos y ácidos grasos sanguíneos	Receptores del hipotálamo	

Tabla 1. Clasificación de los receptores sensitivos.

II. Del estímulo sensitivo al impulso nervioso

Cuando un receptor sensitivo se excita, su potencial eléctrico de membrana se modifica. Este cambio se denomina **potencial de receptor** y puede suceder a través de distintos mecanismos:

- Deformación mecánica del receptor que abre los canales iónicos
- Aplicación a la membrana de un químico que abre los canales iónicos
- Cambio de temperatura de la membrana que modifica su permeabilidad

En general, todos los mecanismos cambian la permeabilidad de la membrana del receptor, lo cual facilita la difusión iónica en mayor o menor medida para modificar el **potencial transmembrana**. Cuando el potencial de receptor supera el umbral de excitación, se desencadenan potenciales de acción en la fibra nerviosa. Entre más se incrementa el potencial de receptor sobre el umbral, la **frecuencia del potencial de acción** aumentará de igual manera.

El corpúsculo de Pacini tiene una fibra nerviosa central que atraviesa su núcleo y está circundada por capas concéntricas. La terminación de una fibra nerviosa que está dentro del corpúsculo es **amielínica**

(no tiene mielina) y su concentración de mielina aumenta conforme se aleja de él. La fibra nerviosa que abandona el corpúsculo de Pacini se une un nervio sensitivo periférico.

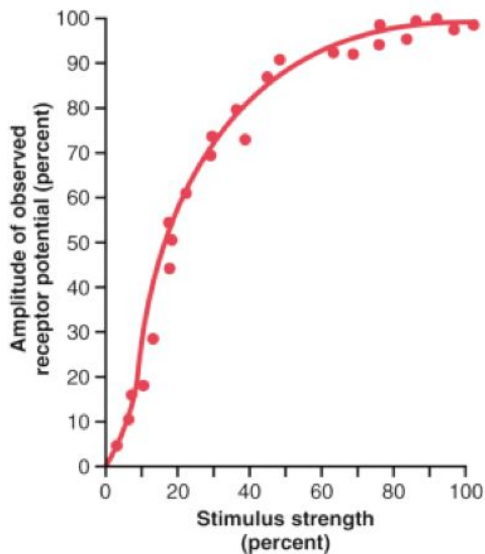


Figura 1.
Sensory Receptors, Neuronal Circuits for Processing Information
Hall, John E., PhD, Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology, Chapter 47, 595-606
Copyright © 2016 Copyright © 2016 by Elsevier, Inc. All rights reserved.

Si se comprime el corpúsculo sobre cualquiera de estas capas se deforma la fibra nerviosa central. La deformación abre los canales iónicos de la membrana y el sodio entra a la fibra, lo que aumenta el voltaje de la célula y genera un **potencial de receptor**. Posteriormente, el potencial de receptor produce un flujo de corriente denominado **circuito local**, el cual se propaga a lo largo de la fibra nerviosa. Cuando el circuito local se topa con el primer nódulo de Ranvier de la fibra la membrana se despolariza y desencadena potenciales de acción que se transmite hasta el SNC.

En una gráfica (**figura 1**), se observa que la amplitud del potencial de receptor aumenta conforme la compresión del corpúsculo hasta que deja de aumentar tanto cuando el estímulo es de alta intensidad. Asimismo, cuando la frecuencia de los potenciales de acción repetidos aumenta con el incremento del potencial de receptor pero llega un punto donde se forma la misma meseta que en la **figura 1** y

el aumento de la frecuencia de disparo disminuye poco a poco. Por lo tanto, los receptores tienen una mayor sensibilidad a estímulos débiles.

Los receptores se **adaptan** a un estímulo cuando este se percibe constantemente, es decir, al inicio se produce una frecuencia de impulsos muy alta y conforme pasa el tiempo la frecuencia disminuye. La capacidad de adaptación es distinta en algunos receptores, por ejemplo los corpúsculos de Pacini se adaptan hasta que se termina la frecuencia de impulsos por completo. Los receptores que requieren de días para extinguir los disparos se denominan **inadaptables**.

El proceso por el cual un receptor se adapta al estímulo varía con cada tipo de receptor. En particular, el corpúsculo de Pacini se adapta de dos maneras. Se adapta inicialmente cuando el líquido en su interior se **redistribuye** mientras una fuerza deforma sus capas, de manera que el potencial de receptor deja de producirse. Su segunda adaptación ocurre cuando el extremo de la fibra nerviosa central se **acomoda** lentamente mientras la presión del estímulo sigue deformando el corpúsculo. Lo anterior inactiva los canales de sodio y disminuye el flujo de corriente del ion.

Los **receptores de adaptación lenta** mandan señales al SNC siempre que el estímulo esté presente, de tal forma que el cerebro puede conocer el estado del cuerpo y su relación con el medio. Lo anterior ocurre en los husos musculares y los aparatos tendinosos de Golgi porque sus receptores permiten que el SNC sepa el estado de contracción muscular y la carga que soporta constantemente. Otros ejemplos

de receptores de adaptación lenta son los que están en la mácula del aparato vestibular, los nocirreceptores, los barorreceptores arteriales y los quimiorreceptores en el cuerpo carotídeo y aórtico.

Por otro lado, los **receptores de adaptación lenta** solo perciben los cambios en la intensidad del estímulo y por lo tanto no transmiten una señal continua, por eso se llaman receptores de velocidad, movimiento o fásico. El corpúsculo de Pacini es un ejemplo claro de un receptor de adaptación lenta, pues solo le comunica al SNC cuando hay sufre de una deformación rápida.

Es interesante saber que los receptores de velocidad tienen una capacidad **predictiva**, es decir que pueden saber cuál será el estado del cuerpo en un futuro próximo. Por ejemplo, los receptores de los conductos semicirculares del aparato vestibular del oído perciben la velocidad a la que se toma una curva y a partir de eso cambiar el movimiento y posición de las piernas para no perder el equilibrio.

CLASIFICACIÓN	
GENERAL	ALTERNATIVA
A: Mielínicas Rápidas Grandes y medianas	α Ia: Proviene de las terminaciones anuloespirales de los husos musculares Ib: Proviene de los órganos tendinosos de Golgi
	β II: Proviene de los receptores táctiles aislados y de las terminaciones en ramillete de los husos musculares
	δ III: Transmiten temperatura, tacto rudo, dolor y escozor
C: Amielínicas Lentas Pequeñas	IV: Transmiten dolor, picor, temperatura y tacto rudo

Tabla 2. Clasificación general y alternativa de las fibras nerviosas sensitivas.

III. Sumación espacial y temporal

Es sumamente importante que se transmita la intensidad del estímulo y no solamente su presencia, es por eso que existe la sumación espacial y la sumación temporal. La **sumación espacial** consiste en transmitir la intensidad de la señal al aumentar el número de fibras involucradas (terminaciones nerviosas libres). Por otro lado, la **sumación temporal** consiste en aumentar la frecuencia de los impulsos nerviosos en una sola fibra cuando la intensidad de la señal aumenta.

IV. Transmisión y procesamiento

El sistema nervioso central se integra de muchos grupos neuronales y cada grupo neuronal contiene distintas cantidades de neuronas. Cabe destacar que cada grupo neuronal posee una organización particular que le permite procesar las señales de una manera específica.

En la **figura 2** se pueden ver las fibrillas terminales de entrada del lado izquierdo y las dendritas o somas neuronales de salida del lado derecho. La zona donde las neuronas son estimuladas por fibrillas terminales se denomina **campo de estimulación**. Al analizar la imagen uno es capaz de observar que conforme las neuronas se alejan del campo de estimulación, el número de sinapsis decremента considerablemente.

Una señal de entrada que induce un potencial eléctrico postsináptico en las dendritas o somas de salida, produce una **posdescarga sináptica**. Siempre que se mantenga el potencial de membrana, las neuronas de salida podrán emitir una **señal sostenida** en forma de descargas repetidas.

Cuando una sola fibrilla terminal estimula a una neurona, rara vez se alcanza el umbral de excitación, sin embargo, cuando muchas terminales actúan sobre la misma neurona se logra generar un potencial de acción y se forma una **zona de descarga** en el punto de sinapsis. Al contrario, si el número de estímulos excitadores no es suficiente para alcanzar el umbral, las neuronas resultan facilitadas, se genera una **zona facilitada** y será más sencillo que el próximo estímulo logre generar el potencial de acción. Existen fibras de entrada que inhiben las neuronas postsinápticas y generan una **zona inhibidora** que es opuesta a la zona facilitada.

El fenómeno de **divergencia** de las señales ocurre cuando una señal entra a un grupo neuronal y excita a muchas dendritas y somas de salida. Existen dos tipos de divergencia: **divergencia de amplificación** y **divergencia en múltiples fascículos**. La primera ocurre cuando un estímulo entra al grupo neuronal y diverge en numerosas neuronas, de manera que su zona de descarga se amplifica. Por ejemplo, en la vía corticoespinal que controla los músculos esqueléticos, cada célula piramidal grande excita miles de fibras musculares. La segunda consiste en una señal proveniente de un grupo neuronal que se transmite en dos direcciones. Por ejemplo, señales que llegan a las columnas dorsales de la médula espinal que se diverge hacia el cerebelo y hasta el tálamo y la corteza cerebral.

Se le llama **circuito de inhibición recíproca** al proceso en el que una señal que llega a un grupo neuronal se transmite a dendritas o somas de salida se divergen en dos vías. Lo anterior se puede ejemplificar cuando una señal de entrada excita a las neuronas que impulsan una pierna hacia adelante y al mismo tiempo inhibe a los músculos posteriores de esa pierna para que no se opongan al movimiento.

Por otro lado, en el fenómeno de **convergencia**, señales que provienen de diferentes lados se reúnen y excitan una sola neurona. La convergencia se observa cuando señales que provienen de múltiples terminales de un fascículo o de distintos orígenes, excitan a una neurona. Por ejemplo, señales de las fibras nerviosas periféricas, fibras propioespinales, fibras corticoespinales de la corteza cerebral y vías

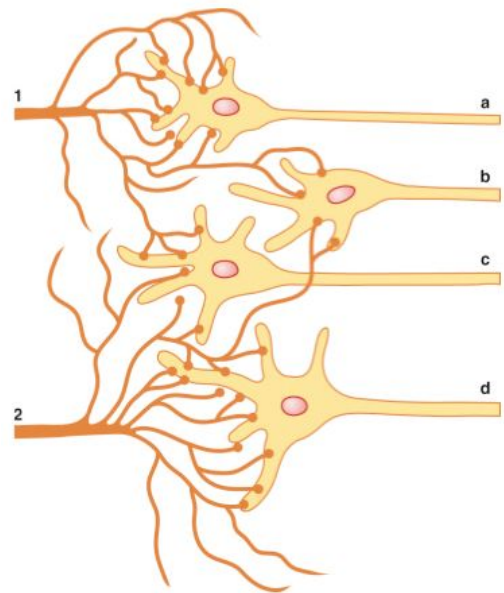


Figura 2.
Sensory Receptors, Neuronal Circuits for Processing Information
Hall, John E., PhD, Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology, Chapter 47, 595-606
Copyright © 2016 Copyright © 2016 by Elsevier, Inc. All rights reserved.

que descienden desde el encéfalo convergen en un punto de la médula espinal y excitan las interneuronas. Si recordamos el fenómeno de sumación espacial, podemos darnos cuenta que sucede a la par del fenómeno de convergencia, pues múltiples terminaciones excitan una neurona para que esta supere eficazmente a su umbral de excitación. Es importante mencionar que la convergencia es fundamental para relacionar, sumar y clasificar distintos tipos de información.

Un **circuito reverberante u oscilatorio** ocurre gracias a una retroalimentación positiva que está dentro del circuito neuronal que reexcita la fibra de entrada. Una vez que inicia la estimulación de un circuito reverberante, la descarga sucederá repetidamente durante un tiempo prolongado. En la **imagen 46-14** se observan los distintos circuitos oscilatorios que existen y que están formados con distintas cantidades y tipos de neuronas. Cabe mencionar que si se involucran más neuronas, entonces se forma un retraso entre la señal de entrada inicial y la señal de retroalimentación.

Adicionalmente, algunos circuitos reverberantes tienen fibras **facilitadoras** e **inhibidoras** que controlan la intensidad de la transmisión de las señales sin ser la causa de la señal de salida. La inhibición del circuito acortará el tiempo en el que se producen las descargas repetitivas, mientras que su excitación lo prolongará. De cualquier manera, las descargas repetitivas de un circuito oscilatorio cesan súbitamente cuando las uniones sinápticas del circuito se fatigan.

Hay dos mecanismos que permiten que un circuito neuronal emita señales de salida continuas: la **descarga neuronal intrínseca continua** y las **señales reverberantes continuas**. El primero sucede principalmente en neuronas del cerebelo y en interneuronas de la médula espinal, donde el potencial de acción de las neuronas está por encima del umbral y por lo tanto, las descargas se producen continuamente. Por el otro lado en las señales reverberantes continuas, un impulso excitador que entra en el grupo reverberante incrementa la señal de salida y reduce o extingue su inhibición. Este último se controla a partir de señales inhibidoras y excitadoras (como se dijo anteriormente), y es fundamental para la regulación del tono vascular o intestinal del sistema nervioso autónomo, de la contracción del iris y de la frecuencia cardíaca.

Es necesario señalar que existen circuitos neuronales que emiten **señales rítmicas** de salida, por ejemplo, la señal rítmica que controla la frecuencia respiratoria desde la médula oblongada y el puente. Se dice que estas señales provienen de circuitos oscilatorios o de señales excitadoras o inhibidoras emitidas desde un grupo neuronal que le antecede. Al igual que un circuito neuronal, las señales rítmicas se regulan a través de señales excitadoras e inhibidoras que aumentan o reducen su intensidad.

V. Inestabilidad y estabilidad de los circuitos neuronales

Prácticamente todo el cerebro tiene conexiones directas e indirectas entre partes, por lo tanto, cuando una parte del cerebro se excita, es muy probable que las demás terminen excitándose también. Por esta razón, es fundamental que los circuitos reverberantes tengan límites para evitar que las neuronas se saturen y no puedan transmitir información, como sucede durante las crisis convulsivas.

Los circuitos inhibidores son un mecanismo de control de la excitación neuronal cerebral. Algunos de estos circuitos van desde el extremo terminal hacia las neuronas excitadoras de una vía, otros solo ejercen inhibición global sobre regiones del cerebro.

Por otro lado, la fatiga sináptica también actúa como un mecanismo de control que consiste en la debilitación de la transmisión sináptica conforme el periodo de excitación es más largo e intenso. Por la fatiga, después de cierto tiempo las descargas se van haciendo más y más débiles¹, sobretodo cuando las excitaciones ocurren en intervalos de tiempo pequeños. Cabe mencionar que después de que la fatiga termina con la excitación, las neuronas pueden recuperarse y regenerar su capacidad para transmitir señales.

La sensibilidad sináptica se puede modificar a largo plazo gracias a la cantidad de proteínas receptoras en los puntos sinápticos. Las proteínas receptoras se producen constantemente en el retículo endoplásmico y se transportan hacia la membrana de la neurona postsináptica. Cuando hay una liberación excesiva de neurotransmisores desde la neurona presináptica, se unen a las proteínas receptoras y estas quedan inactivadas.

Inactivar y estabilizar los circuitos neuronales es esencial para evitar que calambres, convulsiones, alteraciones psicóticas, alucinaciones, y otros trastornos sucedan frecuentemente.

VI. Referencias

Hall, John E. Receptores sensitivos, circuitos neuronales para el procesamiento de la información. 13era edic. Barcelona: Elsevier España; 2016. p. 595-606.

¹ En las vías de los sentidos, la fatiga se expresa como un decremento en la sensibilidad.