



Estudio de las propiedades fisiológicas, anatómicas y química de los receptores sensitivos somáticos de la piel para generar posteriores caracterizaciones que conlleven a diseños de corpúsculos artificiales.

Daniel Felipe Velásquez Díaz

**UNIVERSIDAD ECCI
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DIRECCIÓN DE INGENIERIA BIOMÉDICA
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA EN ELECTROMEDICINA
BOGOTÁ, D.C.
2020**

Estudio de las propiedades fisiológicas, anatómicas y química de los receptores sensitivos somáticos de la piel para generar posteriores caracterizaciones que conlleven a diseños de corpúsculos artificiales.

Daniel Felipe Velásquez Díaz

Trabajo de investigación presentada(o) como requisito para optar al título de Tecnología en Electromedicina

Ricardo Jaramillo Díaz

Ingeniero Biomédico

UNIVERSIDAD ECCI

FACULTAD DE INGENIERÍAS

DIRECCIÓN DE INGENIERIA BIOMÉDICA

PROGRAMA DE TECNOLOGÍA EN ELECTROMEDICINA

BOGOTÁ, D.C.

2020

Contenido

Pág.

Resumen	VII
Introducción	9
1. Planteamiento del Problema	10
1.1 Descripción del problema.....	10
1.1.1 Formulación del problema.	11
2. Justificación	12
3 Objetivos.....	14
3.1 Objetivo General.....	14
3.2 Objetivos Específicos	14
4 Estado del arte.....	15
4.1 Retroalimentación sensorial	15
4.1.1 Codificación de datos.....	15
4.1.2 Transmisión de datos.....	16
4.2 Sistemas Neuromórficos.....	17
4.2.1 Modelo de Izhikevich.....	17
4.3 Sensores.....	18
5 Marco Teórico.....	21
5.1 Amputación	21
5.1.1 Clasificación.....	21
5.2 Sensación	22
5.2.1 El proceso de la sensación.....	23
5.2.2 Canales iónicos y la sensación.	23

5.3	Sensaciones somáticas	24
5.3.1	Sensaciones táctiles.	25
5.3.2	Sensación térmica.....	26
5.3.3	Sensación de dolor.	26
5.3.4	Sensación propioceptiva.....	27
5.4	Receptores sensitivos.....	27
5.4.1	Disco de Merkel.	28
5.4.2	Corpúsculos de Meissner.	28
5.4.3	Terminaciones de Ruffini.....	29
5.4.4	Corpúsculos de Pacini.	29
5.4.5	Termoreceptores.....	30
5.4.6	Nociceptores.....	32
5.5	La Piel.....	35
6	Metodología	37
6.1	Tipo de investigación.....	37
6.2	Recolección de datos	38
6.3	Análisis de los datos.....	39
7	Resultados Esperados.....	40
8	Conclusiones.....	46
	Referencias.....	49

Lista de figuras

	<u>Pág.</u>
Figura 1. Esquema de los pasos requeridos para la transducción de estímulos sensoriales de receptores artificiales	15
Figura 2. Representación de los nervios periféricos con los electrodos implantados	16
Figura 3. Reproducción de patrones de la corteza motora de una rata	18
Figura 4. Incorporación en un dispositivo protésico	19
Figura 5. Integración de una matriz de sensores con una matriz de lectura	20
Figura 6. Amputación Completa	21
Figura 7. Amputación Incompleta	22
Figura 8. Amputación quirúrgica	22
Figura 9. Características de las fibras asociadas a los corpúsculos	24
Figura 10. Tipos de fibras nerviosas en el nervio de los mamíferos	25
Figura 11. Receptores de la piel	28
Figura 12. Organización de receptores sensitivos en la piel	30
Figura 13. Respuesta estática y dinámica de termorreceptores	31
Figura 14. Modificación pulso táctil para percepción nociva	32
Figura 15. Respuesta a estímulos fríos nocivos	34
Figura 16. Componentes del sistema tegumentario	36
Figura 17. Alcances de un estudio	37

Lista de Tablas

Tabla 1. Receptores y sus características	35
Tabla 2. Clasificación de las propiedades	39
Tabla 3. Propiedades Mecanorreceptores.....	40
Tabla 4. Propiedades Termorreceptores	42
Tabla 5. Propiedades Nociceptores.....	44

Resumen

Una amputación es un suceso que afecta la calidad de vida, la cual compromete diferentes tareas diarias, también priva al individuo de una fuente de información que le permite interactuar con el mundo físico; por ende, una solución prometedora es la rehabilitación. No obstante, las limitaciones actuales de las prótesis en particular se refieren a la ausencia de capacidades sensitivas (principalmente por la carencia de receptores sensitivos o corpúsculos). Por consiguiente, el presente trabajo pretende que a través del estudio de las propiedades de los receptores sensitivos que permiten las diferentes modalidades de sensaciones somáticas se profundice en el conocimiento de los mismos, y así generar posteriores caracterizaciones que conlleven a diseños de corpúsculos artificiales; para ello se observan las causas más comunes por las que se realiza una amputación y las problemáticas más frecuentes de los usuarios de prótesis, asimismo se realiza una revisión sistemática que permita un acercamiento referente a los tipos de señal, los campos receptivos, velocidades de conducción de los corpúsculos y mecanismos en el proceso de transducción.

Palabras Claves: Receptores sensitivos, corpúsculos, nociceptores, rehabilitación, amputación, prótesis, sensaciones somáticas.

Abstract

An amputation is an event that affects the quality of life, which compromises different daily tasks, also deprives the individual of a source of information that allows him to interact with the physical world; therefore, a promising solution is rehabilitation. However, the current limitations of prostheses in particular refer to the absence of sensory abilities (mainly due to the lack of sensitive receptors or corpuscles). Therefore, the present work intends that through the study of the properties of the sensitive receptors that allow the different modalities of somatic sensations,

the knowledge of them is deepened, and thus generate subsequent characterizations that lead to designs of artificial corpuscles; for this, the most common causes for which an amputation is performed and the most frequent problems of prosthesis users are observed, a systematic review is also carried out that allows an approach regarding the types of signal, the receptive fields, conduction speeds of the corpuscles and mechanisms in the transduction process.

Keywords: Sensory receptors, corpuscles, nociceptors, rehabilitation, amputation, prosthesis, somatic sensations.

Introducción

Las sensaciones son la representación del conocimiento de las variaciones en el medio externo e interno, siendo los receptores sensitivos donde se origina la información sensitiva, que permite percibir y reaccionar a un mundo físico (Chortos, Liu, & Bao, 2016) (Tortora & Derrickson, 2011). De igual forma, las sensaciones somáticas son provocadas por la estimulación de receptores sensitivos alojados en la piel. Estos receptores, objeto de este estudio, ya sean mecanorreceptores, nociceptores o termorreceptores poseen diferentes propiedades que permiten su funcionamiento.

Ahora bien, debido a que en la sociedad actual se encuentra un número elevado de individuos afectados por la pérdida de algún miembro, es decir, privación de información sensitiva, desde un panorama nacional (Centro Nacional de Memoria Histórica, 2012) como internacional (Amputee Coalition, 2016), es necesario encontrar una forma de rehabilitación, que incluya la restitución de la sensibilidad perdida, puesto que la ausencia de información causa problemas para los mismos (Foell & Flor, 2013) (Ocampo, 2010) (Meulenbelt, 2006) (Portnoy, Siev-Ner, Shabshin, & Gefen, 2010) (Broche Vázquez, 2015). Por lo tanto, el estudio de las propiedades de los receptores por medio de la descripción, permitiría comprender el estado de los conocimientos actuales y profundizar en el estudio de su funcionamiento, lo cual es esencial, por ejemplo, en la ingeniería inversa para obtener modelos o duplicados a partir de un objeto de referencia (Atlantic International University, 2010).

Por último, para llevar a cabo este estudio, el trabajo se basa en investigaciones donde se examinan los corpúsculos, se tratan de desarrollar métodos de rehabilitación para amputaciones y también donde por medio de tecnologías se trata de imitar algunos comportamientos de los receptores, con objeto de analizar las principales aportaciones teóricas.

1. Planteamiento del Problema

1.1 Descripción del problema

Según el Centro Nacional de Memoria Histórica indica que en el lapso 1988-2012, hubo 10,189 víctimas por minas anti personas de las cuales 2,119 murieron y 8,070 resultaron lesionadas (Centro Nacional de Memoria Histórica, 2012), asimismo:

Según datos aportados por el Comando General de las Fuerzas Militares y el Comité Internacional de la Cruz Roja, en Colombia han sido afectados 2.205 adultos jóvenes y 5.250 niños y niñas por la detonación de minas. Según estimativos del Observatorio de Minas y el Ministerio de Defensa (...). (Ocampo, 2010, pág. 8)

En Estados Unidos, la Amputee Coalition menciona que aproximadamente 185,000 personas son amputadas cada año y de modo similar se ve como resultado de las guerras en Irak y Afganistán a 1,558 militares perdieron una extremidad (Amputee Coalition, 2016). Mientras que en pacientes menores de 50 años la causa más común son incidentes traumáticos, en aquellos que son mayores es dado (un 90 %) a enfermedades arteriales periféricas como la aterosclerosis y complicaciones de la diabetes mellitus (Treviño, Salazar, Escamilla, Martínez, & Rivera, 2012).

Una amputación no solo es un evento traumático por sus causas, también por la pérdida de capacidades tanto mecánicas como sensitivas; los procesos de rehabilitación más comunes frente a estos eventos son las prótesis, sin embargo, aún existen problemáticas que sufren los usuarios de las prótesis, a causa de la ausencia de retroalimentación sensitiva, un ejemplo es el dolor del miembro fantasma presente en aproximadamente 50-80% de los amputados (Foell & Flor, 2013). En ese contexto, dado que la sensibilidad tiene un papel en la configuración de las interacciones con el mundo, si esta condición persiste, se seguirá dificultando el desarrollo de actividades diarias

o actividades en que se necesita una operación más precisa, más natural (el interactuar con niños, tocar algún instrumento, acariciar, etc.), donde se necesita información como el posicionamiento del cuerpo (propiocepción) o las fuerzas de agarre. Por lo tanto, se postula la descripción como un instrumento que permita un acercamiento a la solución, debido a que por medio de esta se obtiene la identificación de los componentes, actores y procesos, asimismo se profundiza en el conocimiento del objeto de estudio (receptores sensitivos somáticos), lo cual favorece su comprensión y facilitaría los procesos de caracterización que conlleven a diseños de corpúsculos artificiales para la recepción sensitiva. Ante esta situación, dado que los métodos contemporáneos no brindan una solución definitiva, se plantea la siguiente pregunta:

1.1.1 Formulación del problema.

¿Cuál son las propiedades fisiológicas, anatómicas y químicas de los receptores sensitivos somáticos alojados en la piel para generar posteriores caracterizaciones que conlleven a diseños de corpúsculos artificiales?

2. Justificación

Actualmente se han obtenido avances con respecto a la interacción Prótesis –Persona, en la recuperación de la movilidad (Herr, 2015), pero la rehabilitación se considera como “El habilitar de nuevo o restituir a alguien o algo a su antiguo estado.” (Real Academia Española, 2014), por ende, se necesita restituir las habilidades como la discriminación de texturas, la propiocepción, la nocicepción el poder recibir información compleja que el miembro antes brindaba (tamaños, formas, texturas, fuerzas y temperaturas). En ausencia de las habilidades previamente mencionadas se presentan problemas, para ilustrar “en el sistema nervioso central se produce una privación sensitiva y psicosocial. La falta de estimulación ambiental, física, mental y social puede conducir a una amplia gama de disfunciones del sistema nervioso central.” (Ocampo, 2010, pág. 16). Asimismo, hay problemas cutáneos que dificultan el uso diario de la prótesis y reducen la movilidad en los amputados; ya que la piel del muñón está expuesta a fuerzas durante el soporte del peso lo que puede conducir a edema, ampollas, liquenificación, hiperqueratosis verruciforme, acro-angiodermatitis y carcinoma cutáneo (Meulenbelt, 2006). Igualmente presentan inconvenientes como lo son las lesiones en los tejidos profundos (dados por elevadas tensiones en los tejidos blandos de la extremidad residual) (Portnoy, Siev-Ner, Shabshin, & Gefen, 2010), y la aparición de problemas en los huesos tanto en el miembro sano, como en el muñón (por la ausencia de estímulos mecánicos) (Broche Vázquez, 2015). De igual manera, la falta de información presente en la diabetes por afectación de los nervios periféricos, sensitivos o motores generan las úlceras las cuales desencadenan en gangrena y re-amputación (Gayle , Edward , & Douglas, 1995). Asimismo, el miembro fantasma el cual consiste en la sensación persistente del miembro ausente en unos pacientes, sin embargo, otros experimentan sensaciones de espasmos, compresión y ardor; una teoría acerca de la etiología de este fenómeno afirma: “las neuronas cerebrales que antes

recibían impulsos sensitivos desde el miembro perdido todavía estarían activas y darían origen a percepciones sensitivas falsas” (Tortora & Derrickson, 2011, pág. 556).

Otras teorías coinciden en la reorganización de las áreas motoras y sensitivas de la corteza cerebral dejan de recibir señales, por ello, otras áreas llegan a invadir esta zona inactiva y malinterpretan esas señales como prevalentes del miembro amputado (Treviño, Salazar, Escamilla, Martínez, & Rivera, 2012). Existen terapias o técnicas desarrolladas para reducir el dolor del miembro fantasma, por ejemplo, los tratamientos farmacológicos que ayudan a reducir un componente del dolor del miembro fantasma, pero no otras sensaciones. (Flor, Birbaumer, & Sherman, 2001). Por esto:

El dolor del miembro fantasma se ha tratado con medicamentos (incluidos barbitúricos, relajantes musculares, antidepresivos, anticonvulsivos o neurolépticos) u otras intervenciones somáticas (como anestesia local, simpatectomía, lesiones de la zona de entrada de la raíz dorsal o neuroestimulación), pero el efecto beneficioso máximo de estas estrategias no superó aproximadamente el 30% (...). (Foell & Flor, 2013, pág. 423).

También existen tratamientos invasivos, pero estos solo se usan en pacientes con una vida corta, pues el dolor suele retornar incluso con niveles de dolor mayores. (C, Bolash, & Chang, 2017); sin embargo, el uso intensivo de la prótesis mioeléctrica reduce tanto el dolor del miembro fantasma como la reorganización de la corteza cerebral (Foell & Flor, 2013). Finalmente, existen trabajos que permiten un acercamiento a la rehabilitación (Calogero & Silvestro, 2016), (Chortos, Liu, & Bao, 2016), (Raspovic, y otros, 2014), pero estos métodos solo se enfocan en restaurar una de las cuatro modalidades de sensaciones somáticas lo que concluye en una rehabilitación incompleta.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Estudiar las propiedades anatómicas, fisiológicas y química de los receptores sensitivos somáticos de la piel, con el fin de generar posteriores caracterizaciones que conlleven a diseños de corpúsculos artificiales para la recepción sensitiva.

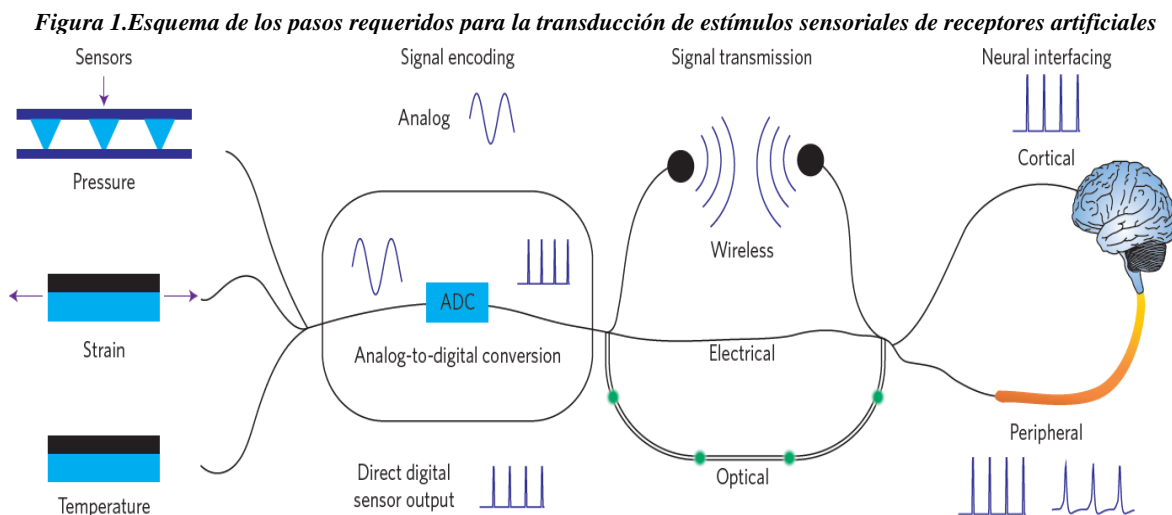
3.2 Objetivos Específicos

- Clasificar las características anatómicas, fisiológicas y químicas de los receptores sensitivos somáticos.
- Analizar la anatomía y fisiología del entorno en que se encuentran los corpúsculos (la piel), en función de los receptores sensitivos.
- Analizar las características anatómicas, químicas y fisiológicas de cada corpúsculo que da lugar a percepciones somáticas.

4 Estado del arte

4.1 Retroalimentación sensorial

4.1.1 Codificación de datos.

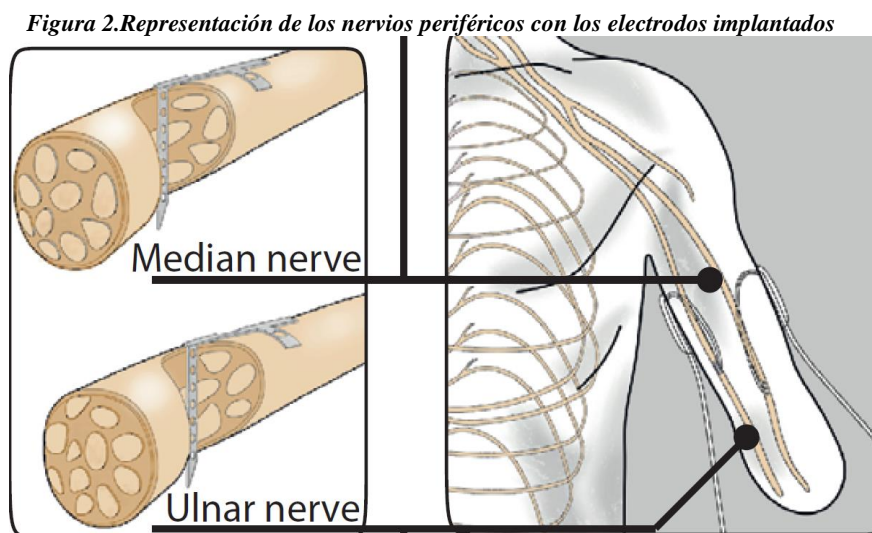


Fuente. (Chortos, Liu, & Bao, 2016)

Recientemente se ha indicado el papel que juegan las yemas de los dedos en la codificación de información táctil (Osborn, y otros, 2018), para la estimulación segura y efectiva del tejido nervioso, se emplean formas de onda similares a impulsos que imitan los potenciales de acción siendo la amplitud, frecuencia y duración de los impulsos de estímulo los parámetros más importantes (Chortos, Liu, & Bao, 2016). Por ejemplo, Osborn et al. utilizó pulsos de onda cuadrada monofásicos con una amplitud de 0,8 mA y una frecuencia de 2 a 4 Hz; mientras que Raspopovic et al. uso un tren de pulsos catódicos rectangulares bifásicos proporcionados a 50Hz y 500ms, siendo la amplitud de la corriente modulada. Observando que esta propiedad no se pierde debido a un extenso lapso de privación sensorial (Raspopovic, y otros, 2014). Finalmente, para la codificación de las señales táctiles (inocuo y nocivo) deben analizarse en términos de presión en lugar de fuerza de agarre (Osborn, y otros, 2018).

4.1.2 Transmisión de datos.

La estimulación de los sistemas nerviosos central y periférico ha sido posible mediante electrodos, óptica, inducción acústica e inducciones electromagnéticas (Fig. 1), también se ha usado la estimulación nerviosa eléctrica transcutánea (TENS) (Osborn, y otros, 2018); pero la interconexión del nervio periférico es menos riesgosa que la interconexión directa del tejido cerebral, aunque no puede beneficiar a los pacientes con lesión de la médula espinal. Para la transmisión de la señal se ha demostrado que es posible entregar información sensorial fisiológicamente apropiada estimulando los fascículos de los nervios periféricos utilizando electrodos intrafasciculares multicanal transversales (Raspopovic, y otros, 2014).



Fuente. (Raspopovic, y otros, 2014)

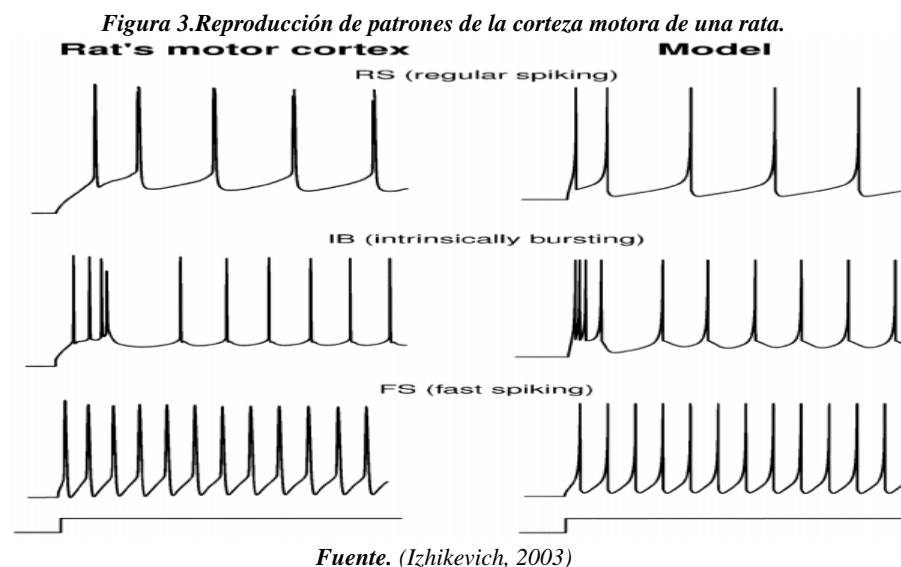
En el anterior ejemplo (Fig. 2) se utilizaban los sitios activos de los electrodos para suministrar estímulos eléctricos, proporcionales a las lecturas de los sensores (conectados a los electrodos) con un rango de carga inyectada de 0,3 a 60 nC (nervios mediano y cubital). Demostrando que la restauración permitiría al individuo establecer un control de fuerza y una corrección de agarre.

4.2 Sistemas Neuromórficos

Enfoques actuales buscan emular el comportamiento de los receptores sensitivos empleando la imitación de la piel biológica (Chortos, Liu, & Bao, 2016) y lo que se conoce como modelos neuromórficos para la transducción sensorial (Osborn, y otros, 2018). Pues bien, “Un sistema neuromórfico es un sistema artificial que utiliza propiedades físicas, estructuras o representaciones de la información basadas en el sistema nerviosos biológico...emulando funciones específicas usualmente de tipo sensorial” (Ros, Francisco, del Pino , & Prieto, 2002). Un punto a favor al utilizar un enfoque neuromórfico es la capacidad de representar el equivalente neuronal (biológicamente comprensible) de una señal utilizando las características reales del receptor (el sensor) (Osborn, y otros, 2018). Por ejemplo, Osborn et al. usa sensores que reconocen la presión de contacto con un objeto (taxel), tienen en cuenta un toque ligero (<100 kPa), medio (<200 kPa) o duro (> 200 kPa) y así a mayor número de taxels activos señala una mayor distribución de la presión lo cual se transmite en la transducción neuromórfica como una sensación táctil inocuo.

4.2.1 Modelo de Izhikevich.

Este es un modelo que imita los picos y estallidos de las diferentes neuronas corticales (simulando decenas de miles), para así implementar la respuesta pico en los nervios periféricos debido a eventos sensitivos (Izhikevich, 2003), este sigue cualidades de modelos de integración y disparo junto con la no linealidad de voltaje para generar los picos, además permite modelar diferentes comportamientos neuronales a partir de ajuste de parámetros (Osborn, y otros, 2018).



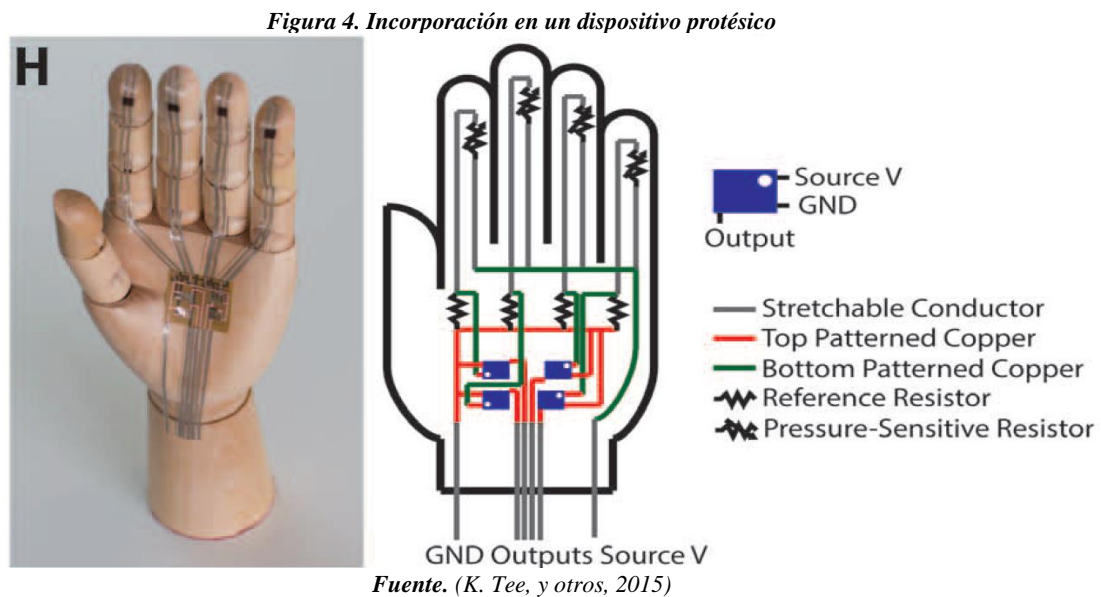
Cabe señalar que este modelo de picos neuronales (Fig. 3) se ha utilizado tanto para mecanorreceptores como en nociceptores (Rongala, Mazzoni, Camboni, Carrozza, & Oddo, 2017) (Osborn, y otros, 2018).

4.3 Sensores

Los receptores cutáneos son circuitos biológicos altamente sofisticados y de baja potencia, estos emiten señales digitales en las que la intensidad del estímulo se convierte en pulsos de voltaje, donde la transducción es energéticamente eficiente y resistente al ruido (K. Tee, y otros, 2015); es por esto que en vez de utilizar una computadora o un microcontrolador que convierta las señales analógicas de los sensores en señales apropiadas, algunos estudios han optado por desarrollar sensores que producen directamente señales digitales, además este método reduce los efectos de la interferencia a lo largo de la ruta de propagación de la señal (Chortos, Liu, & Bao, 2016).

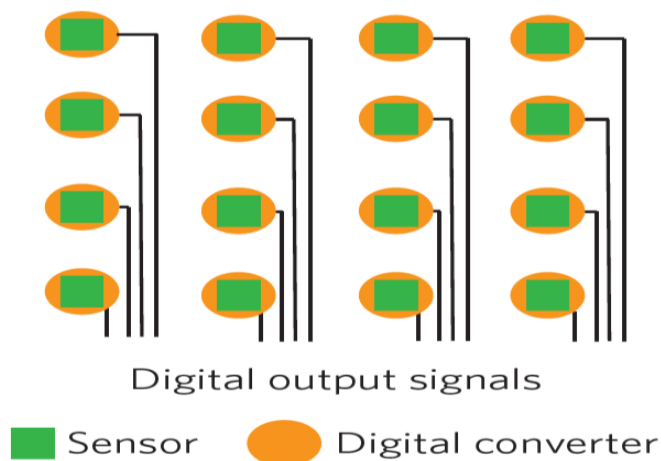
Para poder adaptar estos sensores a pieles biomiméticas se pueden usar matrices de sensores que cubran grandes áreas con alta densidad, permitiendo una alta resolución espacio temporal, sin embargo, reducir el tamaño de los sensores disminuye la amplitud de la señal y aumentar el número

y las líneas de interconexión genera una mayor diafonía (Chortos, Liu, & Bao, 2016), por consiguiente, se combina cada sensor con un transistor. Integrar el sensor con un convertidor análogo-digital (A/D), por ejemplo, un oscilador en anillo, permite que la señal amplificada se pueda usar para modular la frecuencia del oscilador, convirtiendo así las señales analógicas en señales de frecuencia digital, particularmente la figura 4. muestra como los sensores podrían ser incorporados.



En la figura 4 los circuitos emulaban una respuesta adaptativa lenta, usando un oscilador de anillo de tres inversores (tres etapas) basados en transistores de efecto de campo complementario. Alternativamente, la señal analógica puede ser transducida localmente por un convertidor A/D (Fig. 5), y la señal resultante podría estimular directamente las fibras periféricas, guardando características como baja potencia y detección controlada por eventos.

Figura 5. Integración de una matriz de sensores con una matriz de lectura



Fuente. (Chortos, Liu, & Bao, 2016)

Este método aún requiere modificaciones pues no implementa la adaptación temporal tanto a estímulos estáticos como no estáticos, para dar imitación completa de los receptores. Por otro lado está el sensor táctil piezorresistivo Micro Electro-Mechanical System (MEMS), a través del cual se han hecho investigaciones para la transducción neuromórfica de sus salidas a códigos de picos (Rongala, Mazzoni, Camboni, Carrozza, & Oddo, 2017) por medio del software Matlab y el modelo de picos neuronales (Izhikevich, 2003) debido a su capacidad para mostrar la adaptación.

5 Marco Teórico

5.1 Amputación

La amputación es un procedimiento quirúrgico (separación de un miembro o parte del mismo), se considera una operación o procedimiento destructivo, en el cual se extirpa una parte del cuerpo, de un miembro o parte de él a través de uno o más huesos (López M & Hernández R, 2010). No obstante, no existe una única causa de amputación, en tiempos de guerra se habla de distintas causas como las lesiones por minas terrestres, estallidos de misiles u otras explosiones. Pero habitualmente se habla de tres grupos etiológicos causantes de amputación: 1) accidente, 2) enfermedad y 3) malformación congénita (O. Ramos & Baryolo C., 2005).

5.1.1 Clasificación.

- **Amputaciones traumáticas:** Corresponde a la amputación dada como consecuencia de un algún tipo de violencia externa, como un golpe, una torcedura u otra circunstancia., bien sea completa o parcial. (Fig. 6 y 7).
- **Amputaciones Congénitas:** Esta compete a la ausencia parcial o completa de un miembro en el momento del nacimiento.

Figura 6. Amputación Completa



Fuente. (López M & Hernández R, 2010)

Figura 7. Amputación Incompleta



Fuente. (López M & Hernández R, 2010)

- **Amputaciones quirúrgicas:** Consta de la extirpación quirúrgica de un miembro o parte de él, tras previa planificación de la cirugía (Fig. 8).

Figura 8. Amputación quirúrgica



Fuente. (López M & Hernández R, 2010)

5.2 Sensación

La sensación permite conocer de manera consiente o subconsciente los cambios en el medio interno o externo, pero solo cuando los impulsos nerviosos llegan a la corteza cerebral se adquiere consciencia de los estímulos, así mismo la percepción (función de la corteza cerebral) es el conocimiento consiente y la interpretación de las sensaciones (Tortora & Derrickson, 2011, pág. 551).

5.2.1 El proceso de la sensación.

Este comienza en un receptor sensitivo o corpúsculo, cada receptor responde a un tipo de estímulo en específico, estos responden débilmente o no a otros estímulos, esta característica se le denomina como **selectividad**. Dentro de este proceso, deben ocurrir los siguientes fenómenos:

- Estimulación del receptor.
- Transducción del estímulo. Se convierte la energía de un estímulo en un potencial graduado.
- Generación del impulso nervioso. Un potencial graduado alcanza el umbral en una neurona sensitiva, y esta descarga uno o más impulsos nerviosos (potenciales de acción)
- Integración de las aferencias sensitivas. Las sensaciones consientes o percepciones se integran en la corteza cerebral.

5.2.2 Canales iónicos y la sensación.








Los canales iónicos son estructuras de membrana formados por agregados de proteínas que contienen un poro central acuoso que permite el intercambio iónico entre la célula y el medio externo (Viña Fernández, 2015). Actualmente se considera que los estímulos sensitivos dan lugar a la apertura-cierre de canales iónicos, produciendo gradientes de concentración de iones en el interior y exterior de las células que forman los receptores sensitivos (Viña Fernández, 2015), lo que permite un sistema de señalización eléctrica que genera una variación en el potencial de membrana. Los que parecen estar más implicados en la transducción de señales de los sentidos son la superfamilia de canales de receptor de potencial transitorio (TRP), la mayoría son subunidades de canales iónicos no selectivos, lo que permite que los iones Na^+ , K^+ y Ca^{2+} penetren en la membrana (Ricchio, Doerner, & Clapham, 2015), por lo tanto, estos despolarizan las células y aumentan el Na^+ y el Ca^{2+} intracelular. El gradiente más significativo en estos casos es el aumento

de Ca^{2+} intracelular, pues en condiciones normales es de 50-100 nM (Riccio, Doerner, & Clapham, 2015). Algunos canales TRP son sensibles a rangos de temperatura únicos (Salgado Aguayo & Vaca Domínguez, 2009).

5.3 Sensaciones somáticas

Las sensaciones somáticas provienen de la estimulación de receptores que se encuentran en la piel o en tejido subcutáneo, en músculos, tendones, articulaciones y en el oído interno. Hay cuatro modalidades de sensaciones somáticas: táctil, térmica, dolorosa y propioceptiva. (Tortora & Derrickson, 2011), a pesar de que nosotros percibimos estas diversas modalidades, las fibras nerviosas únicamente transmiten impulsos. (Guyton & Hall, 2011); es decir que los corpúsculos están asociados a unas fibras que se pueden clasificar como $\text{A}\beta$, $\text{A}\delta$ y C (Fig. 10), en función de las velocidades de conducción, el grado de mielinización y sus propiedades de adaptación (Figura 9). Si se estimula una fibra táctil, la persona percibe sensación porque dichas fibras conducen hasta las áreas específicas del tacto en el cerebro (**Principio de la línea marcada.**) (Guyton & Hall, 2011).

Figura 9. Características de las fibras asociadas a los corpúsculos

Physiological subtype	Associated fiber (conduction velocity ¹)	Skin type	End organ/ending type	Location	Optimal Stimulus ⁴	Response properties
SAI-LTMR	$\text{A}\beta$ (16-96m/s)	Glabrous Hairy	Merkel cell Merkel cell (touch dome)	Basal Layer of epidermis Around Guard hair follicles	Indentation	
SAII-LTMR	$\text{A}\beta$ (20-100m/s)	Glabrous Hairy	Ruffini ² unclear	Dermis ³ unclear	Stretch	
RAI-LTMR	$\text{A}\beta$ (26-91m/s)	Glabrous Hairy	Meissner corpuscle Longitudinal lanceolate ending	Dermal papillae Guard/Awl-Auchene hair follicles	Skin movement Hair follicle deflection	
RAII-LTMR	$\text{A}\beta$ (30-90m/s)	Glabrous	Pacinian corpuscle	Deep dermis	Vibration	
$\text{A}\delta$ -LTMR	$\text{A}\delta$ (5-30m/s)	Hairy	Longitudinal lanceolate ending	Awl-Auchene/ Zigzag hair follicles	Hair follicle deflection	
C-LTMR	C (0.2-2m/s)	Hairy	Longitudinal lanceolate ending	Awl-Auchene/ Zigzag hair follicles	Hair follicle deflection	
HTMR	$\text{A}\beta/\text{A}\delta/\text{C}$ (0.5-100m/s)	Glabrous Hairy	Free nerve ending	Epidermis/Dermis	Noxious mechanical	

Fuente. (Abraira & Ginty, 2013)

5.3.1 Sensaciones táctiles.

Estas son el tacto, la presión, la vibración, el purito y el cosquilleo, aunque son sensaciones diferentes estos tienen un origen en la activación de los mismos tipos de receptores. (Tortora & Derrickson, 2011), se dividen en dos categorías generales: mecanorreceptores de umbral bajo (LTMR) que reaccionan a la estimulación mecánica indolora y mecanorreceptores de alto umbral (HTMR) que responden a estímulos mecánicos perjudiciales.

Figura 10. Tipos de fibras nerviosas en el nervio de los mamíferos

Tipo de fibra	Función	Diámetro de fibra (μm)	Velocidad de conducción (m/s)	Duración de espiga (ms)	Periodo refractario absoluto (ms)
A					
α	Propiocepción; motora somática	12-20	70-120		
β	Tacto, presión	5-12	30-70	0.4-0.5	0.4-1
γ	Motora para husos musculares	3-6	15-30		
δ	Dolor, frío, tacto	2-5	12-30		
B	Autonómica preganglionar	<3	3-15	1.2	1.2
C					
Raíz dorsal	Dolor, temperatura, algunos mecanorreceptores	0.4-1.2	0.5-2	2	2
Simpática	Simpático posganglionar	0.3-1.3	0.7-2.3	2	2

Fuente. (Barrett, Barman, Boitano, & Brooks, 2010)

El tacto indoloro en la piel glabra esta mediado por cuatro tipos de mecanorreceptores (Fig. 11). Sin embargo, existen factores de la detección táctil humana que no se conocen completamente, como los determinantes físicos de la codificación y la percepción táctil, los mecanismos neuronales detallados (Rongala, Mazzoni, Camboni, Carrozza, & Oddo, 2017).

5.3.1.1 El tacto.

Existen dos tipos, se denomina tacto grueso aquel que permite percibir el contacto de la piel con algún objeto, pero es el tacto fino el que provee información como el tamaño, forma, localización o textura de este. (Tortora & Derrickson, 2011)

5.3.1.2 *Presión y vibración.*

La presión son estímulos continuos que son percibidos sobre un área más amplia que la del tacto, originada por la deformación de tejidos más profundos, en cambio la vibración se da gracias a la estimulación rápida y repetida de los receptores táctiles. (Tortora & Derrickson, 2011)

5.3.1.3 *Purito y cosquilleo.*

El purito o comezón proviene de la estimulación de terminales nerviosos libres por sustancias químicas, habitualmente se debe a una respuesta inflamatoria local. En el caso del cosquilleo no solo intervienen los terminales nerviosos libres, sino los corpúsculos de Pacini también. (Tortora & Derrickson, 2011).

5.3.2 **Sensación térmica.**

Es la sensación de mayor calor o frío que siente una persona en su piel cuando se expone a un ambiente con ciertas condiciones especiales de viento o humedad asociadas a la actual temperatura del aire (Goldsack Jarpa & Loyola, 2010). Los receptores de frío presentan actividad a temperaturas de 10- 40 °C, mientras que los de calor por temperaturas de 32-48 °C; frente a temperaturas inferiores a 10 °C o superiores a 48 °C se comienza a estimular los receptores de dolor (Tortora & Derrickson, 2011). Por otro lado la piel de los mamíferos en especial el cabello, ya sea grueso o delgado, el cabello juega un papel clave en la regulación de la temperatura corporal. (Abraira & Ginty, 2013).

5.3.3 **Sensación de dolor.**

Es una experiencia sensorial y emocional no placentera que se relaciona con daño tisular real o potencial, o que se describe desde el punto de vista de ese daño (Moreno Benavides, y otros, 2005), se pueden originar dos tipos de dolor, el primero se le conoce como dolor rápido, su percepción es de 0.1 segundos después de la aplicación del estímulo, además la localización del área afectada es

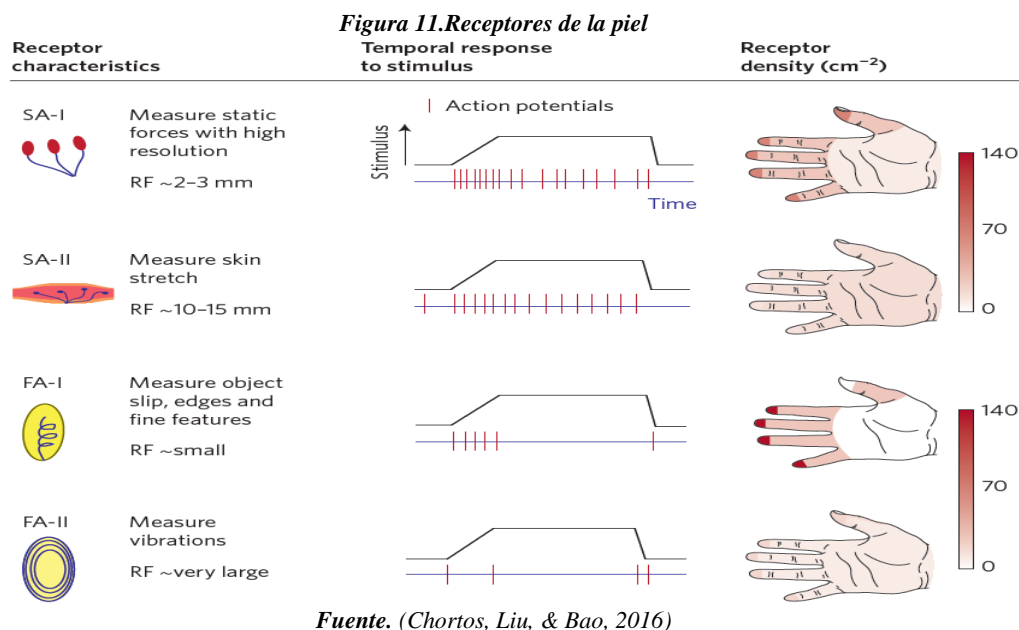
precisa, por otro lado, está el dolor lento el cual tiene una percepción de uno o más segundos después del estímulo, luego aumenta su intensidad de forma gradual (Tortora & Derrickson, 2011). Los estímulos dolorosos pueden dar lugar a una respuesta nociceptiva la cual permite que los estímulos dolorosos activen los músculos para iniciar la respuesta de abstinencia más adecuada, suministrando así un mecanismo de protección (Osborn, y otros, 2018).

5.3.4 Sensación propioceptiva.

Es el sentido del posicionamiento espacial relativo de las partes del cuerpo y de la cantidad de fuerza ejercida sobre el medio ambiente (Clites, y otros, 2018), se origina en los propioceptores situados en los músculos y tendones estos informan acerca del grado de contracción muscular, o la tensión en los tendones (Tortora & Derrickson, 2011).

5.4 Receptores sensitivos

La información que llega al sistema nervioso es proporcionada por los receptores sensitivos, estos producen dos tipos de potenciales graduados en respuesta a los estímulos: potenciales generadores y potenciales receptores, variando su amplitud de acuerdo con la intensidad del estímulo (Tortora & Derrickson, 2011). Una característica de los receptores sensitivos es la **adaptación**, esta propiedad se puede describir como la disminución en la amplitud, de los potenciales, frente a un estímulo sostenido, así pues, según la velocidad de adaptación se habla de **receptores de adaptación rápida (RA o FA)** los cuales tienden a responder mejor frente a objetos que se mueven por la piel, y los **receptores de adaptación lenta (SA)** que responden a presiones estáticas (Chortos, Liu, & Bao, 2016), por otro lado, se denomina campo receptor al área de tejido cuya estimulación provoca la activación de un receptor determinado, asimismo la densidad de distribución es inusual, algunas zonas se hallan densamente pobladas mientras otras no (Fig. 11).



5.4.1 Disco de Merkel.

Se encuentra en la capa basal de la epidermis, en su distribución más simple agrupados de 50-70 (A & K H, 1982), se ramifican a partir de una sola fibra A β (Fig. 12), el terminal es una estructura expandida y aplanada (aproximadamente 7 μ m de diámetro y 1 μ m de grosor) en forma de disco conteniendo en un 50% del terminal mitocondrias (A & K H, 1982); estos presentan sensibilidad a la presión de 2-10 Hz kPa⁻¹ o a la indentación de la piel de 30-160 Hz mm⁻¹ (Chortos, Liu, & Bao, 2016), es decir, al contacto con esquinas, bordes y curvaturas de objetos con umbrales de desplazamiento de la piel menores a 15 μ m, pero son parcialmente insensibles al estiramiento de la piel adyacente a su campo receptivo (RF), además presentan una respuesta SAI (adaptación lenta tipo I; Fig. 11) compuesta de componentes estáticos y dinámicos, asimismo estos exhiben un límite de detección <1 mN.

5.4.2 Corpúsculos de Meissner.

Localizados en las papilas dérmicas, consisten en células lamelares horizontales incrustadas en el tejido conectivo, su diámetro varía de 40-70 μ m con un largo de 150 μ m (A & K H, 1982), se

le otorgan funciones como la detección y escalado de vibraciones de baja frecuencia, la manipulación de objetos y discriminación de texturas (Chortos, Liu, & Bao, 2016), estos presentan una respuesta RAI (adaptación rápida tipo I), no obstante, estos normalmente se asocian con RF pequeños y vibraciones con frecuencias de 1-10 Hz. (Fig. 11). En primates, 30-80 corpúsculos pueden ser inervados por una única fibra aferente RAI, asimismo hasta dos axones aferentes C no mielinizados inervan algunos corpúsculos; la función de estas fibras puede estar relacionada con la nocicepción (Abraira & Ginty, 2013).

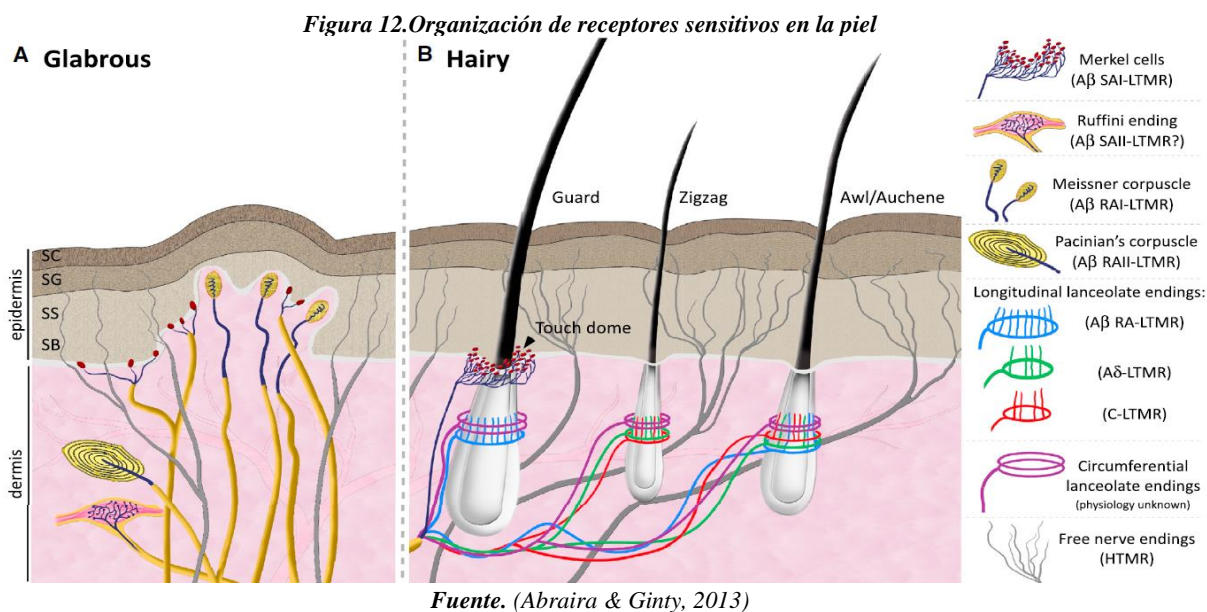
5.4.3 Terminaciones de Ruffini.

Localizadas en las profundidades de la dermis, es un cilindro grande y delgado en forma de huso (Fig. 12), con una longitud de 0.5-2 mm (A & K H, 1982), compuesto de una cápsula externa de 3 a 5 capas de laminillas la cual rodea un espacio capsular lleno de líquido (MEDINA DAZA, 2006), por otro lado, desde las capas subcutánea y cutánea haces de colágeno entran en él, y de este modo el estiramiento de estas fibras también estira el núcleo del corpúsculo, proporcionando el enlace mecánico para el estímulo (HENSEL & Marburg, 1973, pág. 08). Estos son muy sensibles (2 a 4 veces más que los SAI) al estiramiento de la piel y los cambios en la forma de la mano y el dedo, además presentan una respuesta SAII (adaptación lenta tipo II). (Fig. 11).

5.4.4 Corpúsculos de Pacini.

Son grandes (entre 0.5 y 2mm longitud) ubicados en las profundidades de la dermis, con un diámetro aproximado de 0.7mm (A & K H, 1982), tienen un revestimiento tipo capas de cebolla (entre 20 a 70 capas), asociadas a una sola terminación $A\beta$ (Fig. 12), además presentan una respuesta RAI (adaptación rápida tipo II) la cual está asociada a RF grandes (debido a su ubicación), su sensibilidad extrema (responde a movimientos en el rango de nanómetros) y disparo fiel a las vibraciones con frecuencias de 80-300 Hz. (Fig. 11). Por último cabe mencionar que hay

aproximadamente 2.500 en la mano del hombre, con la mayor densidad en los dedos (Abraira & Ginty, 2013).

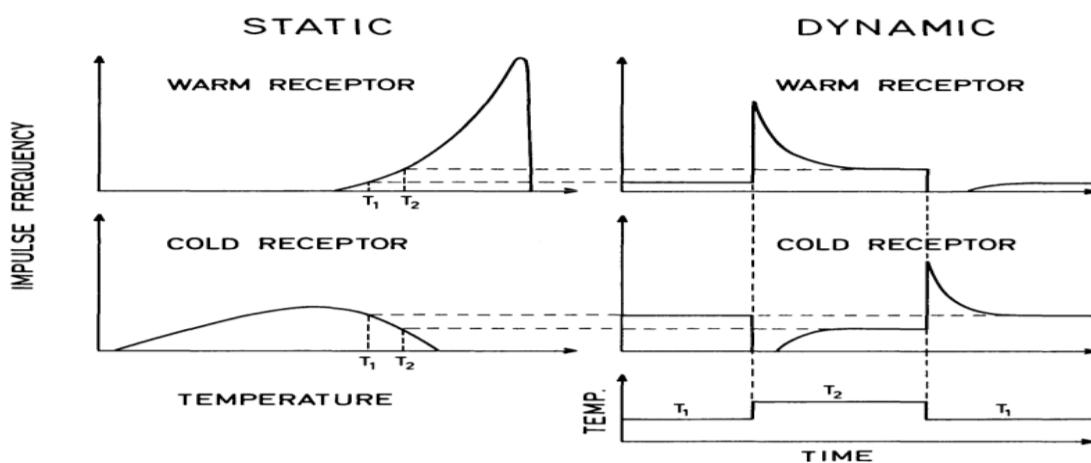


5.4.5 Termorreceptores.

Los termorreceptores son terminales nerviosos libres localizados en la piel con campos receptivos de 1mm de diámetro (Tortora & Derrickson, 2011, pág. 556), responden a temperaturas estáticas con una sensibilidad en el rango de $1-14 \text{ Hz } ^\circ \text{C}^{-1}$, mientras que la sensibilidad dinámica es más alta (hasta $70 \text{ Hz } ^\circ \text{C}^{-1}$) (Chortos, Liu, & Bao, 2016). En cuanto a los receptores de calor a temperaturas $> 33^\circ \text{C}$ activan los canales iónicos de potencial del receptor transitorio vaniloide 3 (TRPV3) y el TRPV4, el primero de estos es sensible a la fosfolipasa C (Schepers & Ringkamp, 2010). Los receptores responden a cambios de temperatura súbitos con sobreimpulsos o inhibiciones transitorias, además a temperaturas constantes presentan una descarga estática con una frecuencia constante (Fig. 13), los receptores de frío exhiben una actividad máxima en estado estacionario entre $20-30^\circ \text{C}$, siendo más baja que para los receptores de calor la cual es entre $40-43^\circ \text{C}$ (Schepers & Ringkamp, 2010). En estudios se ha visto que el mentol activa las fibras frías, es decir, las sensibiliza y como algunas fibras C responden a estímulos fríos (Schepers &

Ringkamp, 2010), de igual manera los canales iónicos de potencial de receptor transitorio melastatina 8 (TRPM8) son activados a temperaturas $< 26^{\circ}\text{C}$ y a su vez puede ser activado por mentol, eucaliptol y el icilin, sin embargo otro mecanismo para detectar el frío es la inhibición de las conductancias de K^{+} que normalmente son activas en el potencial de membrana en reposo, lo que conduce a la despolarización de la membrana y la generación del potencial de acción (Schepers & Ringkamp, 2010).

Figura 13. Respuesta estática y dinámica de termorreceptores



Fuente. (Hensel, 1974)

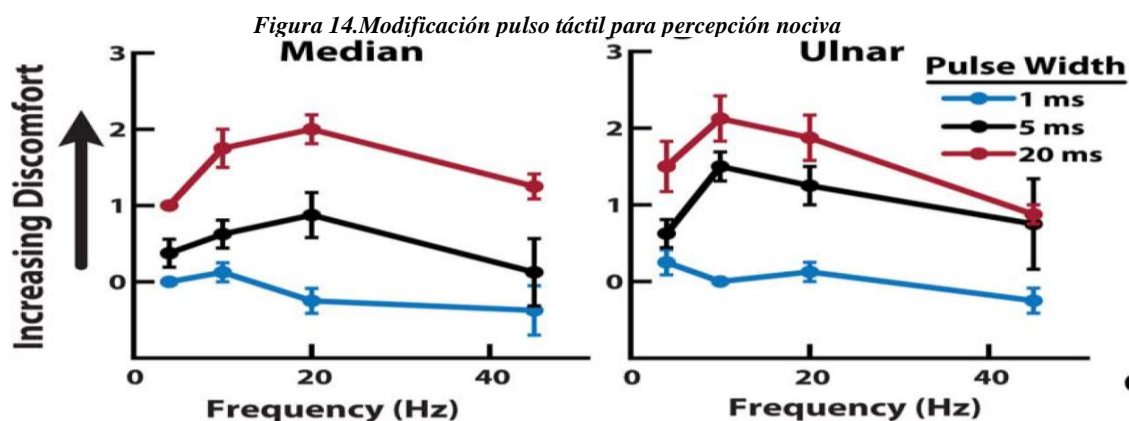
Para los receptores de frío la secuencia temporal de los impulsos puede ser aproximadamente regular, o puede consistir en ráfagas periódicas de 2 a 10 impulsos separados por intervalos, teniendo en cuenta que, a tasas de enfriamiento más altas, el sobre impulso dinámico puede ascender a 300 impulsos por segundo (Hensel, 1974). En contraste la secuencia de impulsos de los receptores de calor es bastante regular; estudios en ratas sugieren que las fibras frías se proyectan hacia la epidermis y experimentos psicofísicos en humanos que emplean bloques diferenciales de fibras nerviosas indican que la sensación de frío está mediada por aferentes mielinizados ($A\delta$) pequeños (Schepers & Ringkamp, 2010), mientras que las fibras asociadas al calor son fibras C. Finalmente a través de estudios de mapeo se observa mayor cantidad de puntos sensibles al frío que al calor (Barrett, Barman, Boitano, & Brooks, 2010).

5.4.6 Nociceptores.

Son receptores sensoriales que pueden discriminar entre eventos nocivos e inocuos y pasar esa información nociceptiva al sistema nervioso central (Messlinger, 1996), estructuralmente son terminales nerviosos libres presentes en todos los tejidos del cuerpo específicamente en la capa epidérmica de la piel, estimulados por mediadores químicos con escasa adaptación (Tabla 1), además tienen la propiedad de disminuir su umbral, o aumentar su respuesta cuando están sujetos a una estimulación repetitiva (Moreno Benavides, y otros, 2005). La anatomía humana (yema del dedo) revela una menor densidad de inervación de fibras nociceptivas, en comparación con los mecanorreceptores (Osborn, y otros, 2018), sin embargo es donde se da una mayor resolución espacial para el dolor; estudios previos exponen que la densidad de inervación es progresivamente menor cuando se mueve desde los territorios del cuerpo proximal al distal (Mancini, y otros, 2013).

5.4.6.1 Dolor táctil.

Para su percepción se han detectado los mecanorreceptores de umbral alto (HTMR) los cuales responden a estímulos nocivos a través de las fibras nerviosas $A\beta$, $A\delta$ y C, según estudios recientes (Osborn, y otros, 2018), se sabe que al modificar la frecuencia (entre 10-20 Hz) y el ancho de pulsos táctiles normales se puede discernir las percepciones nocivas en una sola modalidad de estimulación (Fig. 14).

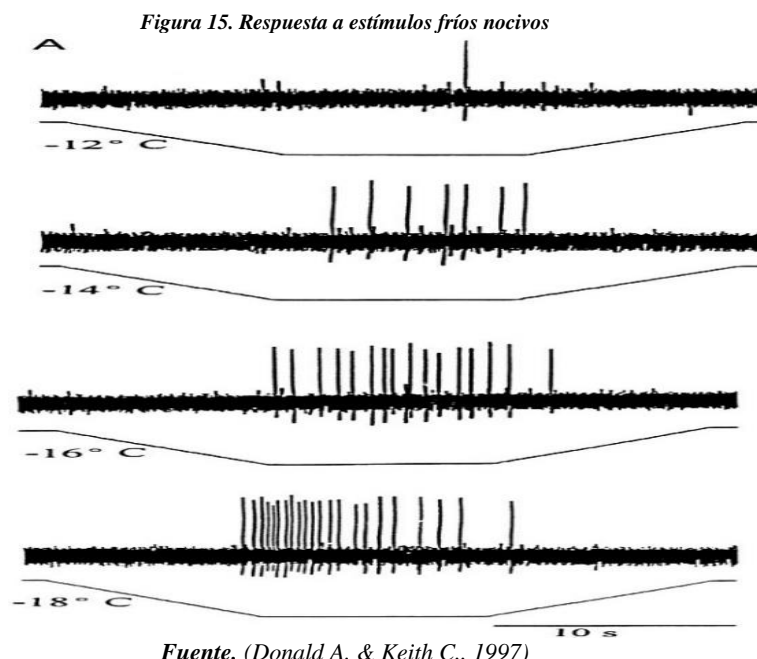


Fuente. (Osborn, y otros, 2018)

Los A δ -HTMR también responden al calor nocivo o bien a estímulos fríos, por el contrario, los C-HTMR responden exclusivamente a estímulos mecánicos (Abraira & Ginty, 2013), los HTMR son clasificados en dos grupos neuroquímicos, siendo el primero los nociceptores peptidérgicos que contienen neuropéptidos, como la sustancia P y CGRP, en segundo lugar los nociceptores no peptidérgicos donde la mayoría presentan unión a isolectina-B4 (Novío Mallón, 2007).

5.4.6.2 *Temperaturas nocivas.*

Las temperaturas frías nocivas varían entre 10-15 °C y 18 °C en la piel glabra y vellosa respectivamente, causan sensaciones como pinchazos, ardor y calor, lo que propone diferentes poblaciones de fibras (A δ y C) activadas mediante estos estímulos, la intensidad del dolor y la intensidad de estímulo están relacionadas linealmente a temperaturas entre 20-0 °C y sus temperaturas umbral de activación varían en un rango aproximado de valores superiores a 20 °C a valores inferiores a 10 °C (Schepers & Ringkamp, 2010). Según datos de electrofisiología revelan que a temperaturas de 17 °C es activado el TRPA1, el cual a su vez puede ser activado directamente por calcio intracelular o por icilin, asimismo evidencia experimental insinúa que el canal de sodio resistente a la tetrodotoxina (TTX) NaV1.8 es clave en la detección de estímulos fríos nocivos (Schepers & Ringkamp, 2010). En la figura 15 se puede observar la respuesta de un nociceptor al frío nocivo donde el número evocado de picos, la tasa de descarga y la tasa de descarga máxima aumentó a medida que la temperatura del estímulo disminuyó (Donald A. & Keith C., 1997).



Por otro lado, las temperaturas cálidas nocivas tienen un umbral aproximado de 45 °C, la estimulación de piel peluda normalmente resulta en dos sensaciones de dolor: una casi instantánea (~ 0.4s después) lo que indica la intervención de fibras A δ por su conducción rápida y la otra descrita como un dolor ardiente, percibido 1-2s después del estímulo por lo cual se le atribuye la activación de fibras más lentas (C), las cuales se estiman que están ubicadas a una profundidad entre 20-600 μ m, contrariamente la estimulación de piel glabra no conlleva una doble sensación de dolor (Schepers & Ringkamp, 2010). Estudios psicofísicos correlativos y estudios electrofisiológicos indican que el umbral de dolor térmico está determinado por una frecuencia de descarga mínima (0,5 Hz), así mismo los umbrales de temperatura para activar las fibras C en la piel peluda varían entre 37-48 °C, pero aquellas fibras que responden solo al calor presentan umbrales de 45-48 °C (Schepers & Ringkamp, 2010). No obstante, los canales de transducción en nociceptores son proteínas integrales de membrana que forman vías selectivas de conductancia de iones (Belmonte & Viana, 2009); los principales transductores del calor nocivo son TRPV1 y TRPV2, el primero es un canal permeable al Ca²⁺ activado a temperaturas > 43 °C, de igual modo

se activa con capsaicina y es sensible a mediadores inflamatorios tales como pH bajo, bradiquinina, factor de crecimiento nervioso y prostaglandinas, en cambio el TRPV2 tiene un umbral de temperaturas $>52\text{ }^{\circ}\text{C}$, sin embargo estos estímulos no son intervenidos exclusivamente por TRPV1 y TRPV2, puesto que los canales TRPV3 también se pueden activar con temperaturas $> 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Schepers & Ringkamp, 2010).

Tabla 1. Receptores y sus características

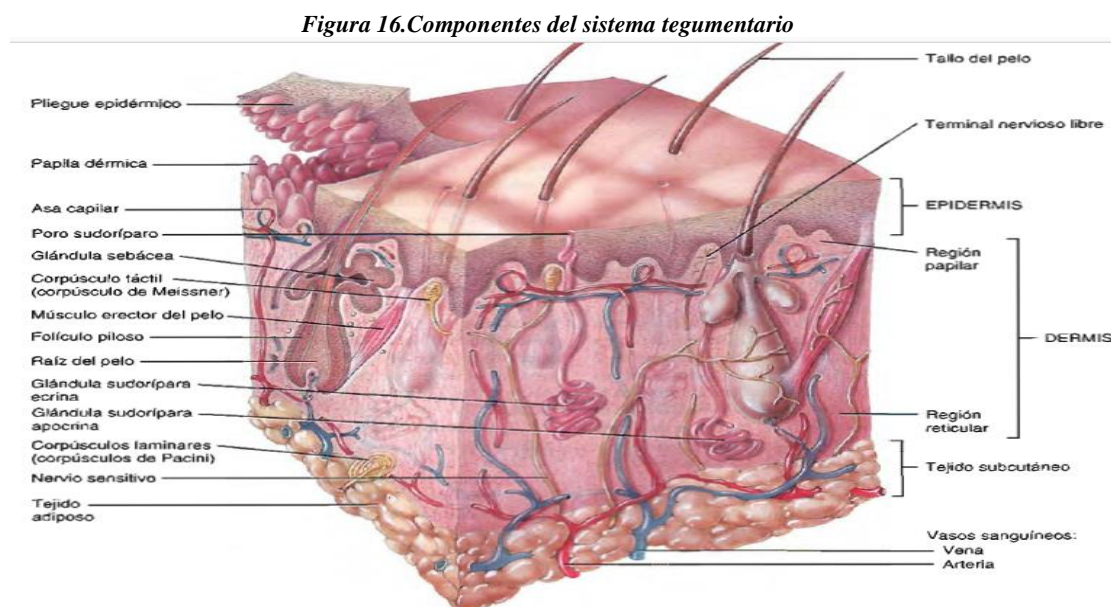
Tipo de receptor	Estructura del receptor y localización	Sensaciones	Velocidad de adaptación
Receptores táctiles			
Corpúsculos del tacto (de Meissner)	La cápsula rodea una masa de dendritas en las papilas dérmicas de la piel lampiña.	Tacto fino, presión y vibraciones lentas	Rápida
Terminales nerviosos del folículo piloso	Terminales nerviosos libres enrollados alrededor de los folículos pilosos.	Tacto grueso	Rápida
Mecanorreceptores cutáneos tipo I (discos de Merkel)	Terminales nerviosos libres, discoides, que están en contacto con las células de Merkel en la epidermis.	Tacto fino y presión	Lenta
Mecanorreceptores cutáneos tipo II (corpúsculos de Ruffini)	Cápsula alargada que rodea a las dendritas en la dermis profunda y en ligamentos y tendones.	Estiramiento de la piel	Lenta
Corpúsculos laminares (de Pacini)	Cápsula oval, en capas, que rodea a las dendritas; presentes en la dermis y el tejido celular subcutáneo, tejidos submucosos, articulaciones, perostio y algunas vísceras.	Presión, vibración, cosquilleo	Rápida
Receptores de prurito y cosquilleo	Terminales nerviosos libres y corpúsculos laminares en piel y mucosas.	Comezón y cosquilleo	Rápida y lenta
Termorreceptores			
Receptores de calor	Terminales nerviosos libres en la piel y las mucosas bucal, vaginal y anal.	Calor o frío	Inicialmente rápida, luego lenta
Receptores de frío			
Receptores de dolor			
Nociceptores	Terminales nerviosos libres en todos los tejidos excepto el cerebro.	Dolor	Lenta
Propioceptores			
Huso muscular	Terminales nerviosos sensitivos alrededor de las fibras musculares intrafusales en la mayoría de los músculos esqueléticos.	Longitud muscular	Lenta
Órgano tendinoso	Cápsula que encierra fibras colágenas y terminales nerviosos libres en la unión musculotendinosa.	Tensión muscular	Lenta
Receptores cinestésicos de las articulaciones	Corpúsculos laminares, corpúsculos de Ruffini, órganos tendinosos y terminales nerviosos libres.	Posición articular y movimiento.	Rápida

Fuente. (Tortora & Derrickson, 2011)

5.5 La Piel

Es el órgano más grande del cuerpo humano, destinado a mantener la temperatura corporal, proteger y proveer información sensorial al cuerpo (con un estimado de 17000 mecanorreceptores en una mano) (Chortos, Liu, & Bao, 2016). En adultos es aproximadamente el 16% del peso total y forma junto con estructuras anexas (pelos, uñas, etc.) el sistema tegumentario (Tortora & Derrickson, 2011), además tiene la capacidad de acomodar los movimientos al doblarse y estirarse, lo cual difiere con la electrónica tradicional - rígida y quebradiza, otra característica es que su espesor varía entre 0.5-4 mm (parpados y talón respectivamente). Por lo tanto, al buscar un

equivalente es importante implementar materiales con bajos módulos elásticos y buena extensibilidad, pues la piel biológica es estirable al 75% de la tensión, permitiendo la circulación de las articulaciones que experimentan tensiones superficiales. (Chortos, Liu, & Bao, 2016). Por otro lado, presenta un umbral de detección de 1mN y tiempo de respuesta de ~ 15 ms. Estructuralmente la piel consta de dos partes: la epidermis y la dermis, estas ultima se fija a los órganos y tejidos subyacentes a través del tejido subcutáneo (Fig. 16).



Fuente. (Tortora & Derrickson, 2011)

La epidermis se divide en cuatro capas: basal, espinoso, granuloso y un estrato córneo fino (denominado piel delgada). Esta división se modifica en los lugares donde hay mayor fricción, resultando en un nuevo estrato (lúcido) y el engrosamiento del estrato córneo. De la misma manera la dermis se divide en dos regiones: una papilar y otra reticular, el primero de estos consiste en tejido conectivo areolar, donde se encuentran las denominadas papilas dérmicas que alojan algunos corpúsculos y terminales nerviosos libres, mientras la otra región se conforma por fibras colágenas y elásticas lo que brinda características como resistencia, extensibilidad y elasticidad (Tortora & Derrickson, 2011).

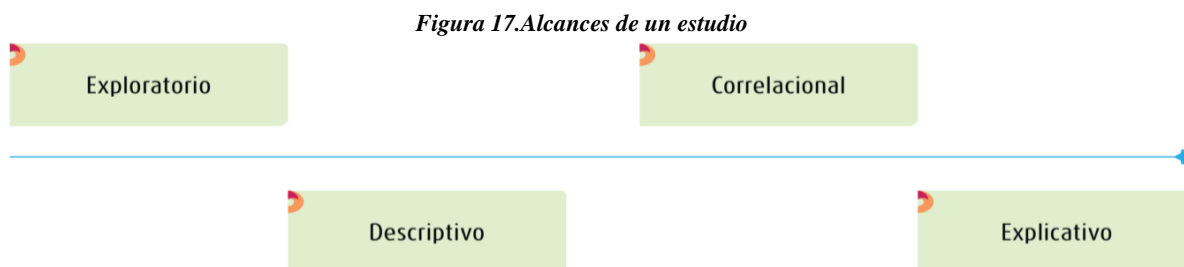
6 Metodología

En esta sección se muestra la metodología aplicada en el estudio de las propiedades anatómicas, fisiológicas y químicas en los receptores sensitivos alojados en la piel. El presente trabajo fue elaborado bajo el planteamiento metodológico del enfoque cuantitativo, utilizando la recolección y el análisis de datos para contestar la pregunta de investigación, en base a la medición numérica y el análisis estadístico. Los pasos para poder desarrollar la investigación son:

- Tipo de investigación.
- Recolección de datos.
- Análisis de los datos.

6.1 Tipo de investigación

La metodología que se utilizó en este estudio es el método o alcance descriptivo, existen solo cuatro tipos, según Hernández, et al (Metodología, 2014, pág. 90).



Fuente. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, Metodología, 2014)

El estudio descriptivo busca especificar propiedades y características importantes de cualquier fenómeno que se analice. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, Metodología, 2014). Por lo tanto, se usa la descripción como instrumento para comprender el estado de los conocimientos actuales de las propiedades de los receptores sensitivos alojados en la piel y profundizar en el estudio de su funcionamiento. El diseño implementado en la investigación

es no experimental ya que se obtuvo la información basada en situaciones ya existentes sin manipular variable alguna y transversal debido a que no se estaba interesado en analizar cambios al paso del tiempo de las características.

6.2 Recolección de datos

En el presente proyecto, se realizó la recopilación objetiva de datos que se centra principalmente en números y valores (técnica observacional cuantitativa). Cabe mencionar que el primer acercamiento a la realidad de la idea del proyecto se dio en los semilleros de investigación de la Universidad ECCI, en el desarrollo de este estudio se establecieron 3 criterios para la selección de literatura científica:

En primer lugar, la examinación de los receptores sensitivos que están alojados en la piel tanto glabra como velluda; en segundo lugar, no se evaluó una sola modalidad de sensación somática, es decir se tengan en cuenta tanto los mecanorreceptores, como los nociceptores y termorreceptores; en tercer lugar, la inspección de métodos de rehabilitación para amputaciones y también tecnologías basadas en comportamientos de los receptores.

Dado que fue necesario conocer los antecedentes se buscó examinar las causas (traumatismos, infecciones o enfermedades) y consecuencias más comunes en la actualidad de amputación, recolectadas de fuentes primarias y secundarias (estudios, cifras, estadísticas, informes y documentos públicos). Asimismo, por medio de bases de datos confiables (sciencedirect, pubmed, E-libro, google académico, EBSCOhost, alfaomega cloud), y la literatura científica (artículos, libros, informes y estudios) internacional y nacional más importante se buscó información que permitió reconocer las principales formas y estructuras vinculadas con los receptores sensitivos somáticos, que a su vez permitió establecer como y de que forma están ubicados (propiedades

anatómicas), posteriormente se averiguo el funcionamiento de estas estructuras, para establecer de qué forma se activa un receptor en específico y cómo reaccionan frente a estímulos, (propiedades fisiológicas), también cómo es posible los procesos de transducción dados en los mismos receptores (propiedades químicas). Por último, se dio el proceso en el cual los datos relevantes de la literatura científica (Tabla 2) se clasificaron en una tabla para su descripción y análisis preciso (técnica de análisis de contenido) (Técnicas de recolección de datos segunda parte, 2007, pág. 32).

Tabla 2. Clasificación de las propiedades

Propiedades	Datos
Anatómicas	Distribución, localización, densidad de disposición, estructura.
Fisiológicas	Propiedades de respuesta, fibras asociadas, diámetro de las fibras, campos receptivos, tipo de adaptación, sensibilidad.
Químicas	Moléculas o canales iónicos vinculados en el proceso de transducción.

Fuente. Autor


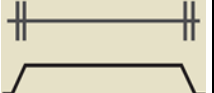

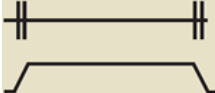
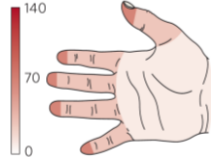



6.3 Análisis de los datos

Una vez ya aplicados los instrumentos de recolección de datos y clasificados, se procede al análisis de los mismos. La manera en que se realizó este análisis fue observando las diferentes propiedades representadas en las tablas y describiendo de qué manera afectan el funcionamiento del receptor sensitivo, así mismo examinando si había propiedades que tuvieran correlación entre sí.

7 Resultados

Los resultados expuestos a continuación se basan en la información recolectada a través de bases de datos sobre literatura científica nacional e internacional, que permitió reconocer e investigar las estructuras, formas y disposiciones del objeto de estudio, asimismo como afectan su funcionamiento, además de los procesos químicos que dan lugar a la fase de transducción de los estímulos en los receptores sensitivos somáticos de la piel.

Tabla 3. Propiedades Mecanorreceptores

	Discos de Merkel.	Corpúsculos de Meissner.	Terminaciones de Ruffini.	Corpúsculos de Pacini.
Adaptación	SAI (adaptación lenta tipo I).	RAI (adaptación rápida tipo I).	SAII (adaptación lenta tipo II).	RAII (adaptación rápida tipo II).
Propiedades de respuesta				
Estructura	Expandida, aplanada y en forma de disco (aproximadamente 7 μ m de diámetro y 1 μ m de grosor).	Encapsulado incompleto, su diámetro varía de 40-70 μ m con un largo de 150 μ m.	Cilindro grande y delgado en forma de huso, con un largo promedio de 0.5-2 mm.	Encapsulado con revestimiento tipo capas de cebolla, aproximadamente 0,5-2 mm de longitud y 0,7 mm de diámetro.
Fibra asociada	A β (16-96m/s)	A β (26-91m/s)	A β (20-100m/s)	A β (30-90m/s)
Diámetro de la fibra	5-12 μ m			
Total	Aproximadamente 17000 mecanorreceptores en la piel de la mano.			
Distribución	En la base de la epidermis, en grupos de 50 a 70 células.	40 % de los mecanorreceptores de la mano.	Paralelo a líneas de tensión de la piel.	15 % de los receptores de la mano. Aproximadamente 2.500 en la mano del hombre
Densidad (cm²)				
Localización	Capa basal de la epidermis	Papilas dérmicas-cerca del límite de la epidermis	Dermis	Dermis profunda.
Campos receptivos	2-3mm	Pequeños	10-15mm	Grandes

Sensibilidad	Presión: 2-10 Hz kPa ⁻¹ Indentación de la piel:30-160 Hz mm ⁻¹	Vibraciones con frecuencias de 1-10 Hz	2 a 4 veces más que los SAI	Vibraciones con frecuencias de 80-300 Hz.
---------------------	---	--	--------------------------------	---

Fuente. Autor

La adaptación es una propiedad frente a estímulos sostenidos, representada en las propiedades de respuesta, esta traza en la parte superior de la imagen los cambios rápidos del potencial de membrana y en la parte inferior el estímulo realizado, la amplitud máxima del potencial de acción es aproximadamente 100mV sin importar el tipo de adaptación (Guyton & Hall, 2011), pero la respuesta varía de acuerdo a si la adaptación es rápida o lenta, por ejemplo, cuando la adaptación es rápida estos receptores se excitan y acaba su excitación aun cuando el estímulo continua, asimismo cuando termina el estímulo el receptor se activa y desactiva nuevamente, por otro lado cuando la adaptación es lenta la descarga es elevada al inicio del estímulo, después decrece progresivamente, lo cual se evidencia al examinar la frecuencia del potencial de acción. Ahora bien, la adaptación en parte se deriva de reajustes en la estructura del receptor, por ello existe la adaptación rápida tipo I y II, para ilustrar el corpúsculo de Pacini tiene esa capacidad de adaptación debido a la propiedades viscoelásticas de las capas de tejido conectivo que rodean la terminación nerviosa (encapsulado), si se aplica una fuerza deformadora sobre un lado esta se trasmite al instante, desencadenando un potencial de receptor, no obstante, debido a la redistribución del líquido contenido en su interior rápidamente deja de generarse el potencial de receptor. La velocidad a la cual son enviados los potenciales de acción (o de conducción) depende de la fibra asociada, los mecanorreceptores están asociados a la fibra nerviosa A β , lo cual indica que el diámetro de estas fibras estará entre 5-12 μ m y su velocidad entre 16-100 m/s. Frente a su distribución (en la mano) hay aproximadamente 17000 mecanorreceptores, el 40% son corpúsculos de Meissner los cuales tienen una mayor densidad en la yema de los dedos (140/cm²) localizados cerca del límite de la epidermis, asimismo el 15% son corpúsculos de Pacini presentes

en toda la mano y ubicados en la dermis profunda, con una mayor densidad en la yema de los dedos ($\sim 35/\text{cm}^2$), por el contrario las terminaciones de Ruffini presentan una mayor densidad en la palma de la mano, por ultimo las células de Merkel agrupadas de 50 a 70 células en la capa basal de la epidermis, tienen una mayor densidad en las falanges y yemas de los dedos (~ 35 y $70/\text{cm}^2$ respectivamente). En los campos receptivos se mide el tamaño de la superficie (mm) que activa un receptor en específico, particularmente los receptores ubicados en la piel superficial (Meissner y Merkel) tienen campos receptivos pequeños, mientras que los que están ubicados en tejidos más profundos (Pacini y Ruffini) tienen campos receptivos más grandes.

Tabla 4. Propiedades Termorreceptores

	Termorreceptores	
	Frío	Calor
Adaptación	Inicialmente Rápida y luego lenta.	
Propiedades de respuesta		
Fibra asociada	A δ (5-30m/s) & C (0.2-2m/s)	C (0.2-2m/s)
Diámetro de la fibra	2-5 μm	0.4-1.2 μm
Distribución	Hay 4 a 10 veces más puntos sensibles al frío que al calor	
Localización	Epidermis	La epidermis y la dermis (Profundidad 20-600 μm)
Campos receptivos	1 mm	
Límite de detección	10-40 $^{\circ}\text{C}$	32-48 $^{\circ}\text{C}$
Sensibilidad	Estáticas: 1-14 Hz $^{\circ}\text{C}^{-1}$ Dinámicas: hasta 70 Hz $^{\circ}\text{C}^{-1}$	
Moléculas transductoras	TRPM8	TRPV3-TRPV4

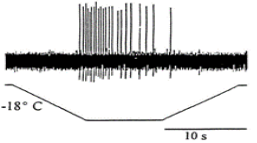
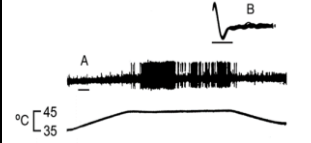

Fuente. Autor

La adaptación en el caso de los termorreceptores es rápida durante la instalación del estímulo, pero al prolongarse se sigue generando el impulso con una menor frecuencia, los impulsos representan los cambios rápidos del potencial de membrana (ΔV), la amplitud máxima de potencial

de acción sigue siendo la misma que para los mecanorreceptores, frente a estímulos estáticos la respuesta es una descarga estática con una frecuencia constante, pero la frecuencia de impulso estático aumenta con la temperatura, hasta llegar a un máximo y cae nuevamente, la diferencia es que para los receptores de calor cuando se excede la temperatura de actividad máxima, se detiene abruptamente la frecuencia. Para estímulos dinámicos al descender repentinamente la temperatura los receptores de frío responden con un sobreimpulso transitorio en la frecuencia, seguidamente se adapta hasta alcanzar una descarga estática, por otro lado, frente al calentamiento responden con inhibición transitoria, después la frecuencia aumenta y finalmente alcanza un valor estático, contrariamente los receptores de calor responden al calentamiento con un sobreimpulso y al enfriamiento con inhibición transitoria. La velocidad a la cual son enviados los potenciales de acción para los receptores de calor varía entre 0.2-2m/s ya que están asociados a fibras C, con un diámetro entre 0.4-1.2 μ m, en cambio los receptores de frío se encuentran asociados a dos tipos de fibras, las A δ con una velocidad de 5-30m/s y un diámetro entre 2-5 μ m, y las fibras C. En cuanto a la distribución hay mayor cantidad de receptores de frío entre 4 a 10 veces más localizados en la epidermis, mientras que los receptores de calor están ubicados a una profundidad entre 20-600 μ m. El tamaño de la superficie que activa ambos termoreceptores es idéntico (1mm de diámetro), sin embargo, las temperaturas a las que se activan y desactivan son distintas, siendo temperaturas de 10-40°C para los receptores de frío y 32-48°C para los receptores de calor. La relación entre el cambio en la salida (Hz) y el cambio en la entrada (°C) de los termoreceptores para estímulos estáticos es 1-14Hz y para dinámicos es de 70Hz, es decir por cada °C que aumenta el impulso por segundo también lo hace. En el proceso de transducción de estímulos térmicos se ven vinculados canales iónicos, específicamente los de receptor de potencial transitorio (TRP), que generan ΔC

de Ca^{2+} y Na^+ , sin embargo, aquellos que intervienen en la termo sensación solo se activan en rangos de temperatura únicos, así, frío ($<28^{\circ}\text{C}$; TRPM8) y calor ($>27^{\circ}\text{C}$; TRPV4, TRPV3).

Tabla 5. Propiedades Nociceptores

	Nociceptores		
	Frio nocivo	Calor nocivo	HTMR
Adaptación	Adaptación lenta		
Propiedades de respuesta			
Estructura	Terminales nerviosos libres.		
Distribución	La densidad de inervación es progresivamente menor cuando se mueve desde los territorios del cuerpo proximal al distal.		
Localización	Capa epidérmica de la piel		
Fibra asociada	A δ (5-30m/s) & C (0.2-2m/s)		A β , A δ & C
Diámetro de la fibra	2-5 & 0.4-1.2 μm		5-12/ 2-5/ 0.4-1.2 μm
Campos receptivos	-	-	Se expanden
Sensibilidad	-	-	10-20 Hz
Moléculas transductores	TRPA1 - NaV1.8	TRPV1-TRPV2-TRPV3	Sustancia P/CGRP/ isolectina-B4

Los nociceptores son de adaptación *Fuente. Autor* lenta, es decir, transmiten una señal de manera continua al SNC, esto se ve reflejado en el tipo de respuesta que tienen, al observar la frecuencia del potencial de acción en todos los casos representados, al inicio es mayor y después disminuye; estructuralmente son terminales nerviosos libres, esto quiere decir que a diferencia de los demás receptores no están formando una estructura capsular, incluso su inervación es diferente siendo menor cuando se mueve de proximal a distal en el cuerpo, se encuentran localizados en la capa epidérmica de la piel pero asociados a diferentes tipos de fibras, aquellos que responden a temperaturas nocivas se asocian a fibras A δ y C, con diámetros entre 2-5 μm y 0.4-1.2 μm respectivamente, para así poder enviar los impulsos a una velocidad de 5-30m/s para los A δ y 0.2-

2m/s para las C, pues el diámetro de la fibra influye en la velocidad de conducción, por otro lado los mecano-nociceptores se encuentran asociados a las fibras mencionadas anteriormente, pero también a las fibras A β , con diámetros entre 5-12 μ m y su velocidad entre 16-100 m/s. En cuanto al tamaño de la superficie que activa los mecano-nociceptores se sabe que con el aumento de las fuerzas los campos receptivos se expanden, lo que impide generar un dato exacto. Así mismo las sensaciones nocivas tienen mayor percepción en anchos de pulso más altos y frecuencias entre 10-20Hz. Los mecanismos de transducción para estímulos nocivos se asocian a diferentes canales iónicos, que permiten ΔC a iones monovalentes (Na⁺ y K⁺) y divalentes (Ca²⁺); aquellos que responden a estímulos térmicos nocivos, se asocian a los canales TRP, específicamente TRPA1(Frío nocivo;<18°C) y TRPV1,TRPV2,TRPV3 (Calor nocivo;>45°C). No obstante, los mecano-nociceptores presentan dos tipos de mecanismos de transducción los que contienen o expresan neuropéptidos como la sustancia P o CGRP y los que exhiben una unión a isolectina-B4.

8 Conclusiones

Por medio de la clasificación de las propiedades se observó cual es la situación de los conocimientos actuales de cada uno de los receptores sensitivos de la piel que dan lugar a las diferentes modalidades de sensaciones somáticas, es decir, se contempló desigualdad de información existente en las bases de datos en cuanto a los diferentes tipos de receptores sensitivos, es decir los receptores que más se conocen son los mecanorreceptores, pues es más fácil encontrar información, y hay datos más variados, en cambio los receptores que en comparación menos se conocen son los propioceptores. Por ejemplo, si bien existen datos que permiten tener claridad en cuanto a la localización de cada uno de los receptores sensitivos somáticos en la piel, no existe información que permita determinar la densidad de distribución de cada tipo de receptor. Así mismo el estudio de las propiedades permitió reconocer de qué forma reaccionan a los estímulos sostenidos, las velocidades a las que se transmiten los impulsos nerviosos, la relación entre el cambio en la salida y la entrada del receptor, también se evidenció el proceso químico de los canales iónicos que genera la transducción de los estímulos.

Al analizar propiedades de la piel se observó que es necesario desarrollar tecnología que no sea rígida y quebradiza. Igualmente, a través del análisis de las propiedades se observó una relación entre:

- La localización del receptor sensitivo y el campo receptivo.
- El diámetro y la velocidad con la que transmite impulsos una fibra nerviosa.
- Tipo de adaptación y su estructura.

Anexo A. Informe. Centro Nacional de Memoria Histórica, 2012

ESTADÍSTICAS DEL CONFLICTO ARMADO EN COLOMBIA

En Colombia, entre los años de 1958 y 2012, el conflicto armado ha causado la muerte de **218,094** personas.



1988

2012

MINAS

1988

2012



10,189 **VICTIMAS**

Fuente: PAIMA

2.119
MUERTOS

8.070
LESIONADOS

MUNICIPIOS EN ESTADO CRÍTICO




Centro Nacional
de Memoria Histórica

LIMB LOSS IN THE U.S.A.

SUPPORT THE MISSION

The Amputee Coalition is the leading, national nonprofit organization working to support people with limb loss.

Our mission is to reach out to and empower people affected by limb loss to achieve their full potential through education, support and advocacy, and to promote limb loss prevention.

 #NotALuxury
#ShowYourMettle

LIMB LOSS AWARENESS MONTH

The Amputee Coalition has designated April as Limb Loss Awareness Month to raise awareness about limb loss and limb loss prevention. To learn more, go to amputee-coalition.org.

OVERVIEW

2.1 Million

People living with limb loss.

185K

People have an amputation each year.

507

People lose a limb each day.

1,558 military personnel lost a limb as a result of the wars in Iraq and Afghanistan.

3.6 million people will be living with limb loss by 2050.

36% of people living with limb loss experience depression.

85% of lower-limb amputations are preceded by a foot ulcer.

FACTS

Lifetime healthcare costs for people with limb loss is \$509,275 compared to \$361,200 for people without limb loss.

African Americans are 4 times more likely to have an amputation than White Americans.

Hospital charges for patients who underwent an amputation totaled \$10 billion in 2014.

LIMB LOSS COMMUNITY INCIDENCE

Gender of Amputation Patients, 2014

Female (31%) Male (69%)

Age at Amputation, 2014

<1 (0.2%) 45-64 (46%)
1-17 (1%) 65-84 (36%)
18-44 (11%) 85+ (6%)

LIMB LOSS COMMUNITY PREVELANCE

Causes of Amputation

Vascular Disease (54%)
Trauma (45%) Cancer (2%)

Types of Amputations

Upper limb (35%)
Lower limb (65%)

Referencias

- A, I., & K H, A. (01 de 03 de 1982). Morphology of Cutaneous Receptors. *Annual Reviews*, 5(1), 1-31. doi:10.1146/annurev.ne.05.030182.000245
- Abraira, V. E., & Ginty, D. D. (21 de 08 de 2013). The Sensory Neurons of Touch. *Neuron*, 79(04), 618-639. doi:10.1016/j.neuron.2013.07.051
- Amputee Coalition. (21 de 04 de 2016). <http://www.amputee-coalition.org>. Recuperado el 06 de 11 de 2017, de <http://www.amputee-coalition.org/wp-content/uploads/2016/04/LLAM-Limb-Loss-in-the-USA-Web.pdf>
- Atlantic International University. (2010). <http://cursos.aiu.edu/>. Recuperado el 06 de 08 de 2019, de <http://cursos.aiu.edu/REINGENIER%20EN%20SISTEMAS/6/PDF/Reingenieria%20de%20sistemas%20sesion%206.pdf>
- Barrett, K. E., Barman, S. M., Boitano, S., & Brooks, H. L. (2010). *GANONG, FISIOLÓGÍA MÉDICA* (23 ed.). (J. de León Fraga, A. R. Higuera Murillo, & N. L. García Carbajal, Edits.) Ciudad de México, Mexico: Mc Graw Hill. Recuperado el 2019
- Belmonte, C., & Viana, F. (2009). Nociceptor Responses. En L. R. Squire (Ed.), *Encyclopedia of Neuroscience* (págs. 1191-1198). San Juan de Alicante, España: Academic Press. doi:10.1016/B978-008045046-9.01925-2
- Broche Vázquez, L. T. (Abril de 2015). Influencia de la asimetría de la marcha en el comportamiento biomecánico de las articulaciones de cadera en pacientes con prótesis transfemorales. *SciELO*, 23(2). Recuperado el 20 de 03 de 2017, de http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052015000200016&script=sci_arttext&tlng=en
- C, G., Bolash, R., & Chang, C. (2017). Phantom Limb Pain. En J. P. E., & T. D. R., *Treatment of Chronic Pain Conditions* (págs. 283-286). New York: Springer. Recuperado el 05 de 12 de 2017
- Calogero, O., & Silvestro, M. (08 de 03 de 2016). Intra-neural stimulation elicits discrimination of textural features by artificial fingertip in intact and amputee humans. (E. N. Brown, Ed.) *eLIFE*, 27. doi:10.7554/eLife.09148
- Centro Nacional de Memoria Histórica. (01 de 05 de 2012). www.centrodememoriahistorica.gov.co. (C. N. Histórica, Productor) Recuperado el 01 de 10 de 2017, de <http://www.centrodememoriahistorica.gov.co/micrositios/informeGeneral/estadisticas.html>
- Chortos, A., Liu, J., & Bao, Z. (04 de 07 de 2016). Pursuing prosthetic electronic skin. *Nature Materials*, 15, 937-950. doi:10.1038/NMAT4671

- Clites, T. R., Carty, M. J., Ullauri, J. B., Carney, M. E., Mooney, L. M., Jean-François, D., . . . Herr, H. M. (30 de 05 de 2018). Proprioception from a neurally controlled lower-extremity prosthesis. *Science Translational Medicine*, *10*(443), 1-14. doi:10.1126/scitranslmed.aap8373
- Colombia sin minas. (28 de 05 de 1999). *colombiasinminas.org*. (E. P. COLOMBIA, Ed.) Recuperado el 04 de 06 de 2018, de <http://colombiasinminas.org/wp-content/uploads/2016/04/146337132-Decreto-917-de-1999-Calificacion-de-invalidez.pdf>
- Donald A., S., & Keith C., K. (04 de 1997). Responses of Cutaneous A-Fiber Nociceptors to Noxious Cold. *Journal of Neurophysiology*, *77*(4), 2049-2060. doi:10.1152/jn.1997.77.4.2049
- Flor, H., Birbaumer, N., & Sherman, R. (21 de 07 de 2001). Dolor de miembro fantasma. *Revista de la sociedad española del dolor*, *8*(5), 327-331. Recuperado el 05 de 10 de 2017, de http://revista.sedolor.es/pdf/2001_05_04.pdf
- Foell, J., & Flor, H. (2013). Phantom Limb Pain. En J. M. Rhonda, *Handbook of Pain and Palliative Care* (págs. 417- 430). Nueva York, U.S.A.: Springer. Recuperado el 20 de 11 de 2017
- Fundacion Universitaria Católica Del Norte. (22 de 05 de 2012). <https://www.ucn.edu.co>. Recuperado el 06 de 08 de 2019, de [https://www.ucn.edu.co/sistema-investigacion/Documents/instrumento para caracterizar experiencias.docx](https://www.ucn.edu.co/sistema-investigacion/Documents/instrumento%20para%20caracterizar%20experiencias.docx)
- Gayle, E. R., Edward, J. B., & Douglas, G. (1995). Lower Extremity Foot Ulcers and Amputations in Diabetes. En N. I. Diseases, *Diabetes in America* (2da ed., págs. 409-428). U.S.A.: National Diabetes Data Group. Recuperado el 05 de 12 de 2017, de <https://www.niddk.nih.gov/about-niddk/strategic-plans-reports/Documents/Diabetes%20in%20America%202nd%20Edition/chapter18.pdf>
- Goldsack Jarpa, L., & Loyola, M. (2010). *www.u-cursos.cl*. (D. d. Construcción, Ed.) Obtenido de https://www.u-cursos.cl/fau/2010/1/AO305/1/material_docente/previsualizar?id_material=454046
- Guyton, A., & Hall, J. (2011). *Tratado de fisiología médica* (12 ed.). Barcelona: ELSEVIER. Recuperado el 20 de 05 de 2017
- Hensel, H. (01 de 03 de 1974). THERMORECEPTORS. *Annual Reviews*, *36*(1), 233-249. doi:10.1146/annurev.ph.36.030174.001313
- HENSEL, H., & Marburg, L. (1973). Cutaneous Thermoreceptors. En H. Autrum, R. Jung, W. Loewenstein, & A. Iggo (Ed.), *Handbook of Sensory Physiology* (Vol. II, pág. 860). New York, USA: Board. Recuperado el 16 de 06 de 2018

- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología De La Investigación* (Sexta ed.). Mexico D.F., Mexico: Mc Graw Hill Education. Recuperado el 2019
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., Baptista Lucio, P., Méndez Valencia, S., & Mendoza Torres, C. P. (2007). *www.academia.edu*. Recuperado el 2019, de https://www.academia.edu/17020325/RECOLECCIÓN_DE_LOS_DATOS_CUANTITATIVOS_SEGUNDA_PARTE
- Herr, H. M. (18 de 08 de 2015). Design and Testing of a Bionic Dancing Prosthesis. (U. o. Lei Ren, Ed.) *PLOS ONE*, 06. doi:10.1371/journal.pone.0135148
- Izhikevich, E. M. (05 de 11 de 2003). Simple Model of Spiking Neurons. *IEEE Transactions on Neural Networks* , 14(6), 1569 - 1572. doi:10.1109 / TNN.2003.820440
- K. Tee, B. C., Chortos, A., Berndt, A., Nguyen, A. K., Tom, A., McGuire, A., . . . Bao, Z. (16 de 10 de 2015). A skin-inspired organic digital mechanoreceptor. *Science*, 350(6258), 313-316. doi:10.1126/science.aaa9306
- López M, B., & Hernández R, J. (2010). *www.auladae.com*. (G. paradigma, Ed.) Recuperado el 14 de 03 de 2018, de https://www.auladae.com/pdf/cursos/capitulo/enfermeria_trauma.pdf
- Mancini, F., F. Sambo, C., Ramirez, J. D., H. Bennett, D. L., Haggard, P., & Iannetti, G. D. (18 de 03 de 2013). A Fovea for Pain at the Fingertips. *Current Biology*, 23(06), 496-500. doi:10.1016/j.cub.2013.02.008
- MEDINA DAZA, L. E. (12 de 2006). *repositorio.uchile.cl*. (C. PÉREZ FLORES, N. BELTRÁN MATURANA , P. ESTÉVEZ VALENCIA , & A. PALACIOS VARGAS, Edits.) Recuperado el 2019, de http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/102853/medina_1.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Messlinger, K. (1996). Functional morphology of nociceptive and other fine sensory endings (free nerve endings) in different tissues. En E. B.V., T. Kumazawa , L. Kruger , & K. Mizumura (Edits.), *Progress in Brain Research* (Vol. 113, págs. 273-298). Würzburg, Alemania: ScienceDirect. doi:10.1016/S0079-6123(08)61094-8
- Meulenbelt, H. E. (Mayo de 2006). Skin problems in lower limb amputees: A systematic review. (T. a. Online, Ed.) *Disability and Rehabilitation* , 28(10), 603- 608.
- Moreno Benavides, C., Hernández Castro, J. J., Buendía Hernández, A., Camacho Echeverri, R. E., Castro Ossa, W., Cruz Correa, M. Á., & Flórez Rojas, S. P. (2005). *Medicina del Dolor* (Primera ed., Vol. 1). Bogotá, Colombia: Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario. Recuperado el 10 de 12 de 2018
- Novío Mallón , S. (2007). *Estudio experimental de las vías del dolor de la región de las vibrisas en el cobaya tricolor (Cavia porcellus)*. (L. A. Gómez Segade, Ed.) Santiago de

Compostela, España: Universidad de Santiago de Compostela. Recuperado el 15 de 09 de 2018

- O. Ramos, R., & Baryolo C., A. (15 de 09 de 2005). *Medicina de rehabilitación*. (infoMED, Ed.) Recuperado el 11 de 03 de 2018, de <http://www.sld.cu>: http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-bio/manual_de_amputados.pdf
- Ocampo, M. H. (24 de 03 de 2010). *www.urosario.edu.co*. (F. d. Humano, Ed.) Recuperado el 11 de 10 de 2017, de www.urosario.edu.co/urosario_files/.../09ecdc88-5c0d-47d6-955f-a671bbc97c45.pdf
- Osborn, L. E., Andrei, D., Joseph , B. L., Christopher, H. L., Harrison, N. H., Rahul, K. R., & Nitish , T. V. (20 de 06 de 2018). Prosthesis with neuromorphic multilayered e-dermis perceives touch and pain. (A. A. Science., Ed.) *SCIENCE ROBOTICS*, 3(9), 1-11. doi:10.1126/scirobotics.aat3818
- Portnoy, S., Siev-Ner, I., Shabshin, N., & Gefen, A. (24 de Junio de 2010). Effects of sitting postures on risks for deep tissue injury in the residuum of a transtibial prosthetic-user: a biomechanical case study. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 14(11). doi:10.1080/10255842.2010.504719
- Raspopovic, S., Capogrosso, M., Petrini, F. M., Bonizzato, M., Rigosa, J., Di Pino, G., . . . Rossini, P. M. (05 de 02 de 2014). Restoring Natural Sensory Feedback in Real-Time Bidirectional Hand Prostheses. *Science Translational Medicine*, 06(222), 10. doi:10.1126 / scitranslmed.3006820
- Real Academia Española. (06 de 03 de 2014). *dle.rae.es*, 23. (A. d. Española, Editor) Recuperado el 11 de 10 de 2017, de <http://dle.rae.es/?id=VkUpXkt>
- Riccio, A., Doerner, J. F., & Clapham, D. E. (23 de 10 de 2015). Transient Receptor Potential (TRP) Channels. *ScienceDirect*, 1-36. doi:10.1016/B978-0-12-801238-3.04793-0
- Rongala, U. B., Mazzoni, A., Camboni, D., Carrozza, M. C., & Oddo, C. M. (25 de 07 de 2017). Neuromorphic Artificial Sense of Touch: Bridging Robotics and Neuroscience. *Springer*, 03, 617- 630. doi:10.1007/978-3-319-60916-4_35
- Ros, E., Francisco, P. J., del Pino , B., & Prieto, A. (15 de 10 de 2002). <http://cortivis.umh.es/>. Recuperado el 07 de 06 de 2018, de cortivis.umh.es/2002/ingenieria_neuromorfica.pdf
- Salgado Aguayo, A. R., & Vaca Domínguez, L. A. (14 de 04 de 2009). <https://www.medigraphic.com/>. Recuperado el 2019, de <https://www.medigraphic.com/pdfs/revedubio/reb-2009/reb092b.pdf>
- Schepers, R. J., & Ringkamp, M. (20 de 02 de 2010). Thermoreceptors and thermosensitive afferents. *ELSIEVER*, 34(2), 177-184. doi:10.1016/j.neubiorev.2009.10.003
- Tortora, G., & Derrickson, B. (2011). *Principios de anatomía y fisiología* (11 ed.). Bogotá: Panamericana. Recuperado el 02 de 05 de 2017

Treviño, M., Salazar, S., Escamilla, C., Martínez, H., & Rivera, G. (01 de 11 de 2012). Síndrome del miembro fantasma, dolor real. (J. Soto Vargas, Ed.) *Revista Medica MD*, 4(1), 32-36. Recuperado el 01 de 12 de 20117

Viña Fernández, E. (28 de 05 de 2015). *digibuo.uniovi.es*. Recuperado el 2019, de http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/33761/1/TD_EliseoViña.pdf