

Libros de **Cátedra**

Biofísica para estudiantes de Ciencias Veterinarias

Fernanda Coll Cárdenas y Daniela Olivera (coordinadoras)

n
naturales

FACULTAD DE
CIENCIAS VETERINARIAS



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

BIOFÍSICA PARA ESTUDIANTES DE CIENCIAS VETERINARIAS

Fernanda Coll Cárdenas
Daniela Olivera
(coordinadoras)

Facultad de Ciencias Veterinarias



CAPÍTULO 3

Biofísica de la actividad neuronal animal

Fernanda Coll Cárdenas, Francisco Pellegrino, Joaquín

Bruzzo Lafratto

En el organismo animal, el sistema nervioso tiene como función conducir la información que proviene desde el interior del cuerpo (algún órgano o tejido) o desde el exterior (a través de los órganos de los sentidos), para que sea el cerebro quien la procese y actúe. Esta señal es traducida convirtiéndose en una señal eléctrica, ocurriendo esta traducción gracias a los llamados Tejidos excitables y caracterizándose por la velocidad de su conducción (aproximadamente de $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); así por ejemplo, cuando un animal reacciona ante una pinchadura (estímulo detectado por receptores del dolor), esta información llegará por vía aferente (sensitiva) a los centros del Sistema Nervioso Central quienes serán los encargados de traducir rápidamente la información y por vía eferente (motora) producir la retirada del miembro en fracciones de segundo (Fig. 3.1).

Debido a esto, en este capítulo trataremos diferentes definiciones eléctricas, con el fin de comprender lo que ocurre a nivel orgánico.

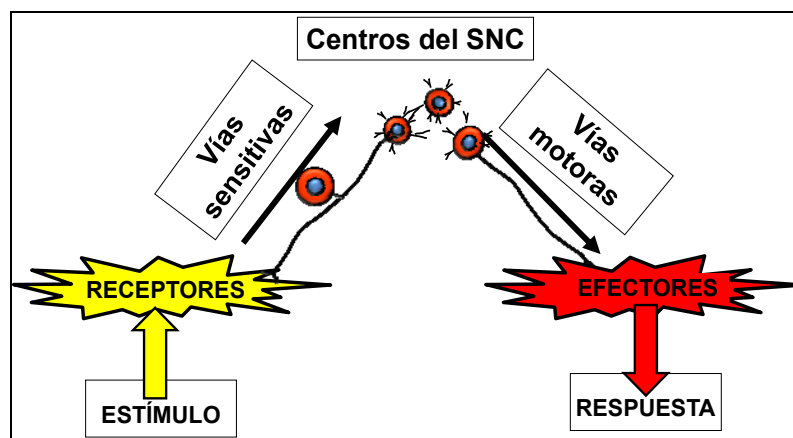


Figura 3.1: Organización funcional del organismo animal

Algunas definiciones eléctricas

Carga eléctrica

Cuando ciertas sustancias como el vidrio se frotran con una tela o con la piel, adquieren la capacidad de atraer objetos tales como trocitos de papel. Este fenómeno es una manifestación de una *fuerza eléctrica*, una de las principales fuerzas de la naturaleza. Dicha fuerza liga los electrones de un átomo y une los átomos de una molécula, determinando, por tanto, las propiedades químicas de las diferentes sustancias. Esta fuerza eléctrica es muy importante en las células, en las que influye, por ejemplo, en el transporte de iones a través de la membrana, estando relacionada también, como nombramos anteriormente, con la transmisión de los impulsos nerviosos y con la contracción de las fibras musculares. Es análoga a la fuerza de gravedad, pero mientras que la fuerza de gravedad entre dos objetos depende de su masa, en el caso de la fuerza eléctrica, la atracción depende de su *carga*. Existe, además, otra diferencia ya que las fuerzas gravitatorias son únicamente de atracción, mientras que las eléctricas pueden ser atractivas o repulsivas.

La *carga eléctrica* (q) es una propiedad básica de las partículas elementales tales como los electrones y los protones, que conforman la materia. De hecho, aquello que mantiene la estructura del átomo como tal, es la fuerza eléctrica de atracción existente entre los protones y electrones del átomo, mientras que los protones entre ellos, ejercen fuerzas de repulsión. Aparecen así, dos clases de cargas eléctricas designadas como cargas positivas (+) y negativas (-). Estas fuerzas observadas entre protones y electrones conducen a enunciar que "*Dos cargas puntuales que presentan igual signo, se repelen y aquellas que presentan signo contrario, se atraen.*" (Fig. 3.2)

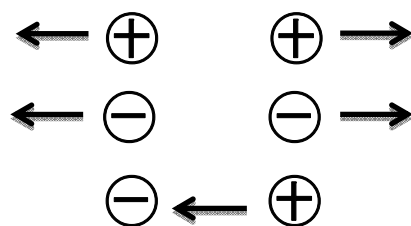


Figura 3.2: Esquema de las diferentes fuerzas de repulsión y atracción entre cargas eléctricas puntuales.

Potencial eléctrico

Si se desea transportar una carga eléctrica de un lugar a otro, es necesario realizar un determinado trabajo o entregar una cierta cantidad de energía, definidos como *potencial eléctrico* (V). Cuanto mayor sea la distancia, mayor deberá ser la energía que se entregue o el trabajo que se deba realizar.

La diferencia de potencial entre dos puntos (ΔV) es igual a la energía que está asociada al desplazamiento de dicha carga eléctrica de un punto a otro.

La energía entregada está dada por la fórmula:

$$E = V \cdot q$$

Donde: E = cantidad de energía realizada [Joule]; V = cantidad de potencial eléctrico [Volt]; q = cantidad de carga desplazada [Coulomb].

Por pasaje de términos, el potencial eléctrico será:

$$V = \frac{E}{q}$$

$$\text{Volt} = \frac{J}{Cb}$$

Unidades derivadas

mV (milivolt) = 10^{-3} volt

μ V (microvolt) = 10^{-6} volt

MG (megavolt) = 10^6 volt

KV (kilovolt) = 10^3 volt

Conductores y Aisladores

Los cuerpos se dividen en *buenos* y *malos* conductores de la electricidad.

Los *buenos* conductores permiten el paso de las cargas eléctricas a través de ellos, mientras que los *malos* conductores, aisladores o dieléctricos, no lo permiten. Entre los primeros, encontramos por ejemplo el alambre de cobre que forma parte de los cables, un cuerpo húmedo, el citoplasma celular, los canales iónicos de la membrana celular; en tanto, entre los otros, están la goma, la madera, la bicapa lipídica de la membrana celular (Fig. 3.3).

También se pueden distinguir dos tipos de conductores:

Conductores de primer grado: son los conductores metálicos, en cuyo interior hay cargas libres que se mueven por la fuerza que ejerce sobre ellas un campo eléctrico. El transporte de la corriente eléctrica la realizan los electrones. No existe transporte de masa.

Conductores de segundo grado: son los electrolitos, cuyas cargas libres son iones (+) o (-), importantes biológicamente, constituidos por soluciones de distinta concentración de ácidos, hidróxidos, sales. El transporte lo realizan los iones quedando cargados positiva o negativamente. En estos casos, sí hay transporte de masa.

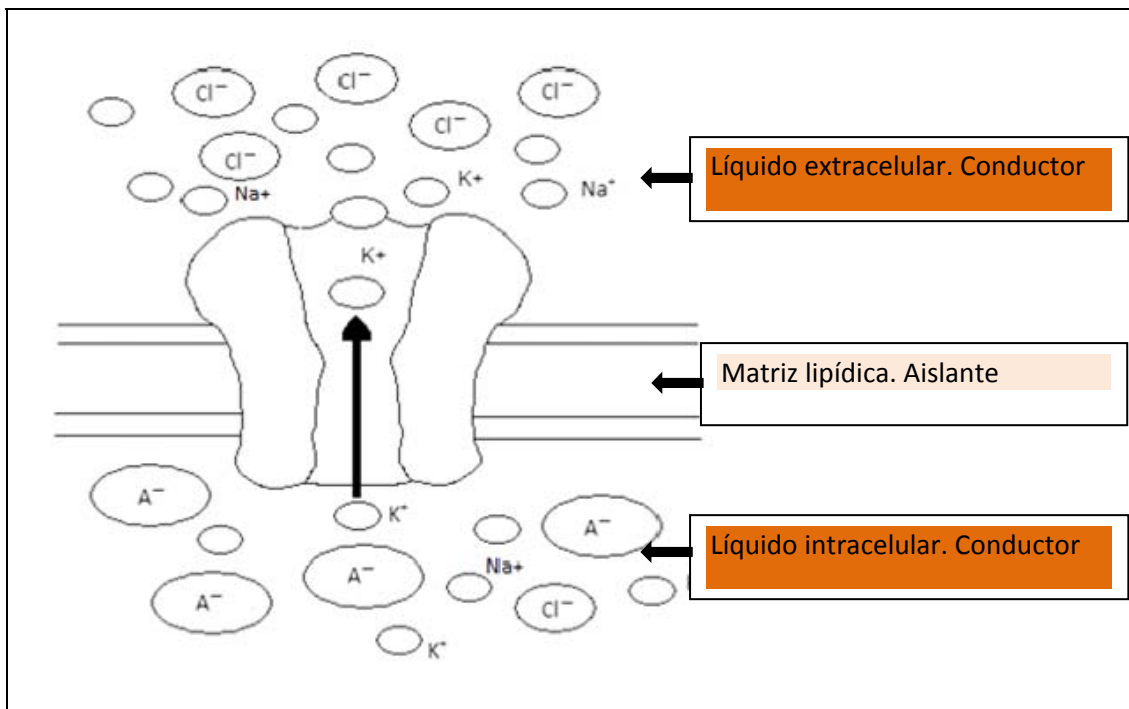


Figura 3.3: Esquema de la membrana celular, determinando buenos y malos conductores de la electricidad.

Resistencia eléctrica. Ley de Ohm

En un conductor eléctrico, la relación entre la diferencia de potencial generada entre dos puntos (ΔV) y la intensidad de la corriente (I) que lo atraviesa, constituye lo que se conoce como Resistencia (R) de dicho conductor, según la Ley de Ohm.

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

$$\text{Ohm } (\Omega) = \frac{\text{Volt}}{\text{Ampère}}$$

Normalmente, todas las sustancias, tanto aislantes como conductores, ofrecen una mayor o menor oposición o resistencia, al paso de la corriente eléctrica, cuya unidad es el ohm (Ω).

En la membrana celular, la intensidad de corriente eléctrica transmitida es inversamente proporcional a la resistencia que ejerce el canal iónico, de acuerdo con esta Ley, expresada por Georg S. Ohm en 1826.

Conductancia

La conductancia (G) está relacionada con la menor o mayor facilidad que ofrece un determinado material al paso de la corriente eléctrica, por consiguiente, sería lo opuesto a la Resistencia (R).

$$G = \frac{1}{R}$$

$$S = \frac{1}{\Omega}$$

La unidad de Conductancia se designa como Siemens (S), donde 1 S equivale a $1/\Omega$ o Ω^{-1} .

A nivel de la membrana celular, cuanto mayor sea la conductancia del canal iónico, mayor será la corriente eléctrica que circule bajo la acción de una diferencia de potencial dada.

Gradiente electroquímico a nivel de la membrana. Potencial de membrana

En todas las células vivas, la membrana celular separa dos compartimientos con una inequidad en la distribución de iones a ambos lados, apareciendo siempre un exceso de cationes en el líquido extracelular (gradiente químico y eléctrico y por consiguiente electroquímico). Dentro de los iones que se encuentran en mayor cantidad en el líquido intersticial, encontramos Na^+ , Ca^{+2} , Cl^- y HCO_3^- , mientras que en el líquido intracelular predominan K^+ , Mg^{+2} , PO_4H^- y aniones no difusibles, generalmente proteicos. Esto genera una diferencia de potencial eléctrico entre ambas caras de la membrana celular, conocido como

potencial de membrana. Las diferencias eléctricas e iónicas condicionan la diferencia de potencial y no se equilibran por más que penetren más cationes a la célula o salgan al exterior.

Si quisiéramos medir este potencial, bastaría con insertar en el citoplasma celular un microelectrodo de vidrio lleno de una solución electrolítica, conectado a un osciloscopio y otro electrodo sumergido en el líquido extracelular. Convencionalmente, se considera el potencial extracelular igual a cero. En las diferentes células se observará que el valor del *potencial de membrana en reposo* oscila entre -60 y -90 mV; el signo negativo indica que el interior celular es más negativo con respecto al exterior (Fig. 3.4). Sin embargo, si colocáramos ambos microelectrodos en el líquido extracelular o en el citoplasma, veríamos que no se registra diferencia de potencial, ya que separadamente, ambos se comportan como eléctricamente neutros.

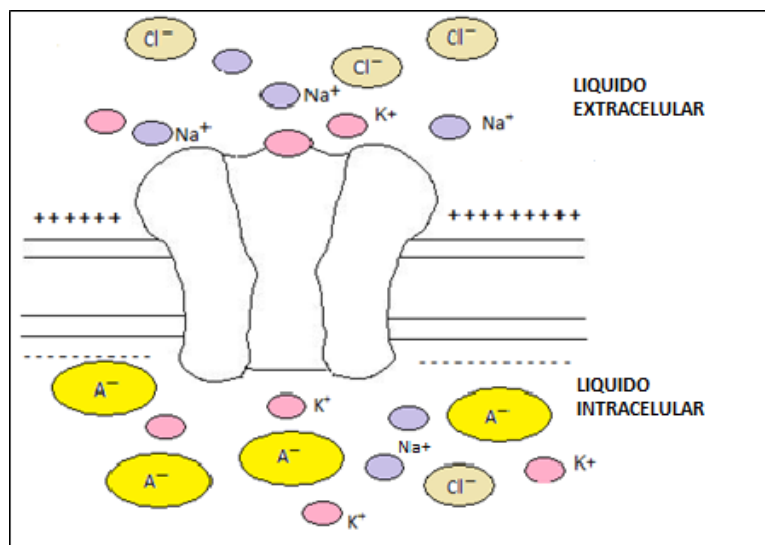


Figura 3.4: Esquema de la diferencia de potencial de membrana entre el exterior e interior de la membrana celular.

Potencial de membrana en reposo: Su origen y medición. Ecuación de Goldman-Hodgkin y Katz

El término de potencial de membrana en reposo (E o V_r), hace referencia al potencial eléctrico generado en la célula, cuando ésta no sufre ningún tipo de perturbación. Es aquél potencial en estado estacionario de la célula, en el que no se produce un flujo neto de cargas a través de la membrana; estando determinado, por tanto, por las diferentes concentraciones

iónicas existentes a ambos lados de la membrana y por las permeabilidades que cada ion presenta para esa membrana.

La desigual distribución de los iones se mantiene principalmente, debido a: a) la presencia en la membrana, de la bomba de $\text{Na}^+ - \text{K}^+$, que cotransporta Na^+ hacia fuera y K^+ hacia dentro, en diferentes cantidades, gracias a la hidrólisis de ATP (intercambia 3 Na^+ por 2 K^+); b) la presencia en el interior celular, de aniones no difusibles (sulfatos, fosfatos orgánicos y proteinatos), que en el caso especial de las proteínas, debido a su tamaño, no logran atravesar la membrana y a c) la mayor permeabilidad que la membrana presenta al potasio, con respecto al sodio, la que es generalmente unas 100 veces superior. Estos tres factores hacen posible la generación y mantenimiento del potencial de membrana en reposo.

Este potencial puede ser estimado en base a la Ecuación desarrollada por Goldman-Hodgkin y Katz, que se presenta a continuación:

$$E = \frac{R \cdot T}{F} \cdot \text{Ln} \frac{P_{\text{K}^+}[\text{K}^+]_e + P_{\text{Na}^+}[\text{Na}^+]_e + P_{\text{Cl}^-}[\text{Cl}^-]_i}{P_{\text{K}^+}[\text{K}^+]_i + P_{\text{Na}^+}[\text{Na}^+]_i + P_{\text{Cl}^-}[\text{Cl}^-]_e}$$

Donde: E = potencial de membrana en reposo; R= 8,31 Joule/K mol (constante de los gases), (recordemos que 1 Joule = 1 Volt . cb); T = temperatura en K; F = 96500 cb (constante de Faraday); i = concentración interna o intracelular; e = concentración externa o extracelular; P = coeficiente de permeabilidad de cada ion.

El hecho de considerar únicamente estos iones (K^+ ; Na^+ y Cl^-) se debe a que, en la práctica, son los únicos electrolitos que tienen concentración suficiente y coeficientes de permeabilidad importantes como para tener influencia en el valor del potencial de membrana en reposo. Como la movilidad real de un ion, no es posible determinarla, se la reemplaza por este coeficiente de permeabilidad (P) que tiene en cuenta el coeficiente de partición de dicho ion y el espesor de la membrana. Este concepto tiene en cuenta, por consiguiente, las características particulares de la membrana, con respecto a la mayor o menor capacidad que presentará para que el ion, la atraviese.

Básicamente, la ecuación de Goldman-Hodgkin y Katz nos dice que cuanto mayor sea la concentración de un tipo de ion y la permeabilidad de la membrana hacia él, mayor será su papel en la determinación del potencial de membrana. A su vez, si la diferencia de potencial depende del flujo y éste, además, del gradiente de concentración, es lógico que para mantener la diferencia de potencial será necesario mantener dicho gradiente.

Potencial de equilibrio de un ion. Ecuación de Nernst

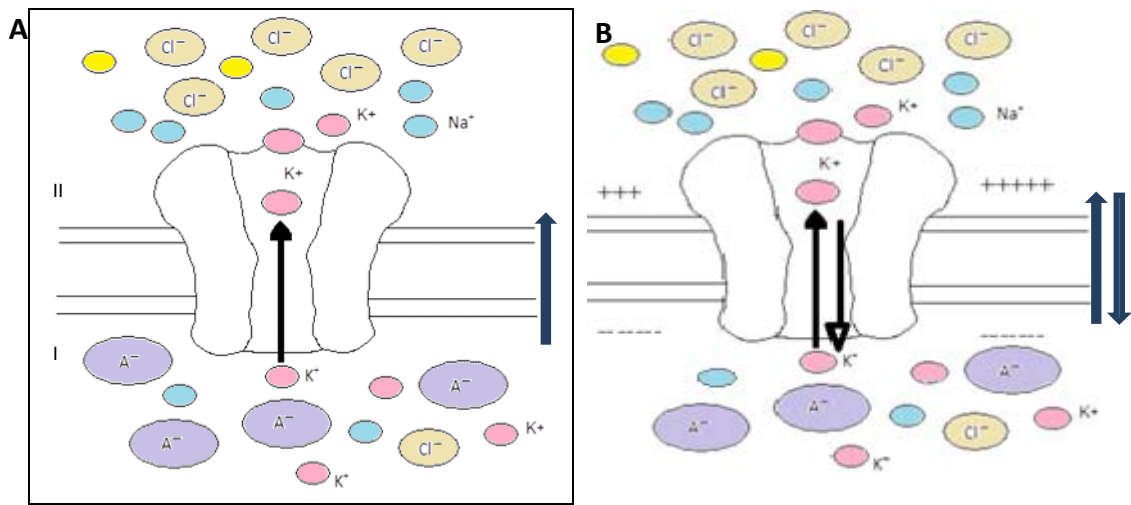


Figura 3.5: Potencial de equilibrio de un ion.

Para lograr entender cómo se genera el potencial de equilibrio de un determinado ion, tengamos en cuenta lo que se observa en la Figura 3.5. En A, se observa una membrana hipotética que es sólo permeable al K^+ , el cual tenderá a difundir del compartimento I hacia el II siguiendo el gradiente de concentración. Al difundir cada vez más potasio, se genera un aumento de cargas positivas en el compartimento II, que se observa en B y por tanto un aumento de cargas negativas en el compartimento I. Estas cargas, positivas y negativas, debido a la fuerza de atracción entre cargas de sentido opuesto, se depositan a ambos lados de la membrana, produciéndose así una diferencia de potencial que puede llegar a ser determinada al colocar dos electrodos y medirla con un voltímetro.

En este momento, se generan dos fuerzas opuestas que actúan sobre el potasio: una fuerza química que favorece el flujo de este ion del compartimento I hacia el II (debido a su gradiente

químico) y una fuerza eléctrica que favorece el pasaje de K^+ del compartimento II hacia el I (debido al gradiente eléctrico de potencial). Llegado un cierto tiempo, estas fuerzas opuestas equilibran sus acciones y se balancean, resultando en que no haya más pasaje de este ion, con flujo neto igual 0. Es allí cuando se dice que *el ion se encuentra en equilibrio pasivo* y el potencial de membrana generado corresponde al *potencial de equilibrio de dicho ion*. En este caso, al medirlo con un voltímetro, su valor será de -75mv (potencial de equilibrio del K^+).

Por tanto, se define al potencial de equilibrio de un ion, como al valor de potencial de membrana en el cual no existe flujo neto de dicho ion, pudiendo ser éste, calculado en cualquier célula y dependiente, únicamente de la relación de concentraciones de este ion a ambos lados de la membrana. La forma de calcularse es a partir de la llamada Ecuación de Nernst, que se expresa de la siguiente manera:

$$E = \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \frac{C_e}{C_i}$$

Donde: E= potencial de equilibrio; R = constante de los gases (como ya vimos en la Ecuación anterior, tiene un valor de 8,31 Joule/K mol); T = temperatura absoluta en K a la que sucede la reacción (en el cuerpo animal, generalmente 310 K); z = carga del ion (+1 para el caso del K^+ , +1 para el Na^+ , -1 para el Cl^-); F = constante de Faraday (96500 cb/mol); C_e y C_i = Concentraciones extra e intracelular del ion.

Tanto R como F son constantes, por lo cual el valor de R.T/F sólo dependerá de la temperatura, que generalmente en el interior del cuerpo animal es de 310 K (37°C); además si queremos pasar de Ln a Log multiplicamos por el factor 2,303, quedando redondeado en un valor de 60 mV, por lo cual podemos decir que la ecuación quedará:

$$E = 60 \text{ mV} \cdot \text{Log} \frac{C_e}{C_i}$$

En la Tabla siguiente (Tabla 3.1) se presentan algunos valores de concentraciones intra y extracelulares de los principales iones y sus valores calculados de potencial de Equilibrio de cada uno de ellos según la Ecuación de Nernst, en un axón gigante de calamar (considerando una temperatura de 20°C).

Tabla 3.1: Concentraciones iónicas intra y extracelulares y potencial de equilibrio de Nernst en un axón gigante de calamar.

iones	Concentración en LIC (mM)	Concentración en LEC (mM)	Potencial de Equilibrio (mV)
K ⁺	400	20	-75
Na ⁺	50	440	+55
Cl ⁻	52	560	-60

Tejidos excitables del organismo. Potencial de acción

Los tejidos nervioso y muscular, son ejemplos típicos de los llamados *tejidos excitables del organismo*, ya que en ellos el potencial de membrana experimenta variaciones periódicas, cíclicas y rápidas como respuesta a algún estímulo, que produce la excitación eléctrica celular. Es así, que ese potencial que estaba en reposo con un valor cercano a los -70 o -80mV, varía experimentando la aparición de un cambio en la conductancia para alguno de los iones involucrados en el potencial de membrana como son el Na⁺, el K⁺ o el Ca⁺², siendo esta variación de la permeabilidad debida a la apertura de canales activados por un ligando o mensajero químico como es la acetilcolina, o activados por voltaje debido a un estímulo eléctrico. Definimos así al *potencial de acción*, como un cambio rápido y transitorio en el potencial de membrana en respuesta a un estímulo de intensidad adecuada (por encima del umbral) que se propaga rápidamente por la membrana celular. Dicho potencial de acción, consta de dos etapas o fases principales: despolarización y repolarización. Cada potencial de acción comienza con un cambio rápido y transitorio desde el potencial de membrana negativo en reposo hasta un potencial positivo (*despolarización*) y termina con un potencial que se vuelve a negativizar casi igual de rápido (*repolarización*).

Cuando la célula es excitada ante la llegada de un impulso, se produce un cambio en la polaridad de la membrana por la apertura en forma explosiva de gran cantidad de los canales de Na⁺ activados por voltaje, lo que permite que estos iones con carga positiva difundan hacia el interior, por ejemplo a nivel del axón nervioso (*etapa de despolarización*) (Fig. 3.6). Es así, que el potencial de membrana que era cercano a -70mV durante el reposo, aumenta rápidamente hacia la positividad, alcanzando valores de hasta +30mV. Cuando llega a este

valor, cercano al del potencial de equilibrio para el ion sodio, los canales voltaje dependientes para el Na^+ se inactivan y se cierran. En ese momento, se produce la apertura de mayor cantidad de canales voltaje dependientes para el K^+ , alcanzando la membrana su mayor permeabilidad para este ion. De esta manera, la rápida difusión de potasio hacia el exterior reestablece el valor negativo normal del potencial de membrana, produciéndose la *etapa de repolarización* (Fig. 3.7). Al llegar nuevamente al valor del potencial de membrana en reposo, puede producirse que los canales voltaje dependientes para el K^+ , permanezcan aún abiertos, continuando el flujo de mayor cantidad de dichos iones, produciéndose la *etapa de hiperpolarización*, hasta alcanzar un valor de potencial de membrana cercano al potencial de equilibrio para el K^+ . Es en este momento que dichos canales se inactivan y se cierran alcanzándose el valor del potencial de membrana en reposo.

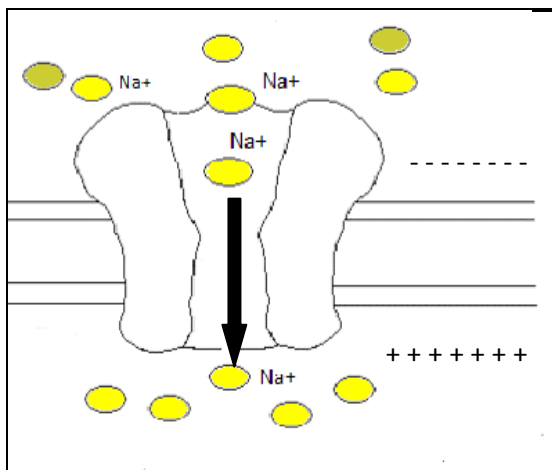


Figura 3.6: Etapa de despolarización de la membrana.

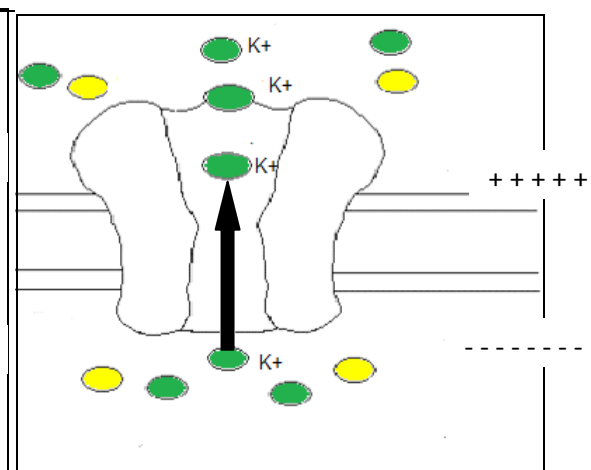


Figura 3.7: Etapa de repolarización de la membrana.

La respuesta celular a un estímulo umbral es siempre la misma en función de la llamada *Ley del Todo o Nada*, que establece que la célula responderá con un potencial de acción

exactamente igual en valores de tiempo y de diferencia de potencial frente a cualquier tipo de estímulo umbral o superior pero que ante un estímulo inferior al umbral no se originará dicho potencial de acción.

Las neuronas son células que se especializan en recibir y propagar la información en forma de impulsos nerviosos. En ella se distinguen tres regiones principales (Fig. 3.8): el cuerpo celular o soma que presenta prolongaciones llamadas dendritas, las que desempeñan un papel principal en la excitación y recepción del impulso; el axón que actúa como la unidad conductora del mismo, pudiendo estar o no recubierto por una vaina de mielina y el botón terminal o terminal axónico que constituye el elemento de transmisión sináptica de la información.

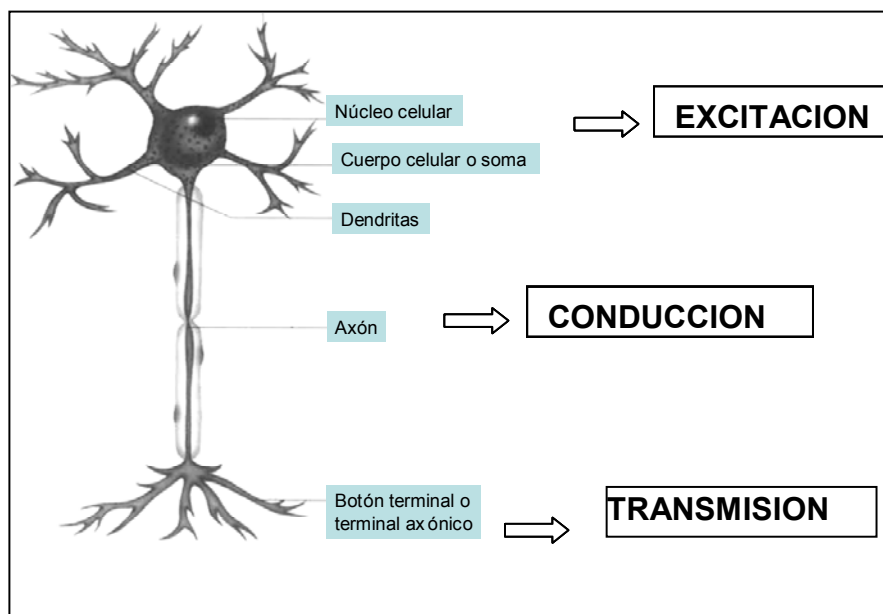


Figura 3.8: Estructura típica de una célula neuronal

Como dijimos anteriormente, cuando un estímulo supera un determinado umbral, la neurona se excita y cambia su polaridad a nivel de su membrana, produciéndose el potencial de acción. Es importante destacar que el que el número de iones que se desplazan a través de la pared celular durante las etapas de despolarización y repolarización es muy pequeño en relación a la cantidad total de iones que hay dentro de la célula. Por lo tanto, un solo potencial de acción no producirá un cambio importante en la concentración de iones a nivel celular. La célula podrá, por tanto, excitarse miles de veces antes de que la concentración de Na^+ o K^+ se vea afectada.

El potencial de acción generado en un punto de la membrana se transmite rápidamente en todas direcciones, ya que la despolarización de una zona causa la apertura de los canales vecinos y como la neurona es una estructura fibrilar, la despolarización se propagará a lo largo de toda la fibra, hasta que se haya despolarizado toda la membrana.

El potencial de acción consta de un periodo en el cual por más que llegue un nuevo estímulo no se producirán cambios en la célula, este momento corresponde a la despolarización y durante el inicio de la repolarización y se denomina *Periodo refractario absoluto* y sirve para que el impulso se transmita en una sola dirección. Pero luego de dicho inicio y durante la repolarización puede producirse que la aplicación de un nuevo estímulo pueda producir, sin necesidad de llegar al reposo, un nuevo potencial de acción; para que esto ocurra, dicho estímulo deberá tener una intensidad mayor que la del estímulo inicial, este periodo se llama *Periodo refractario relativo*.

El axón neuronal tiene por función la conducción del impulso. Si el axón está recubierto de mielina, esta sustancia actuará como un aislante eléctrico impidiendo el pasaje del impulso. Pero naturalmente, el recubrimiento no es total, ya que existen ciertas zonas de constricciones de la vaina conocidas con el nombre Nodos o nódulos de Ranvier, a través de los cuales se producirá la propagación del potencial. En este caso dicha conducción será de tipo saltatoria, ya que irá de nodo en nodo y por tanto tendrá una mayor velocidad (Fig. 3.9). En el caso en que el axón no esté cubierto de mielina cada potencial de acción actuará como estímulo para la siguiente porción de la membrana, produciéndose la conducción por contigüidad y teniendo una menor velocidad que en el caso anterior (Fig. 3.10).

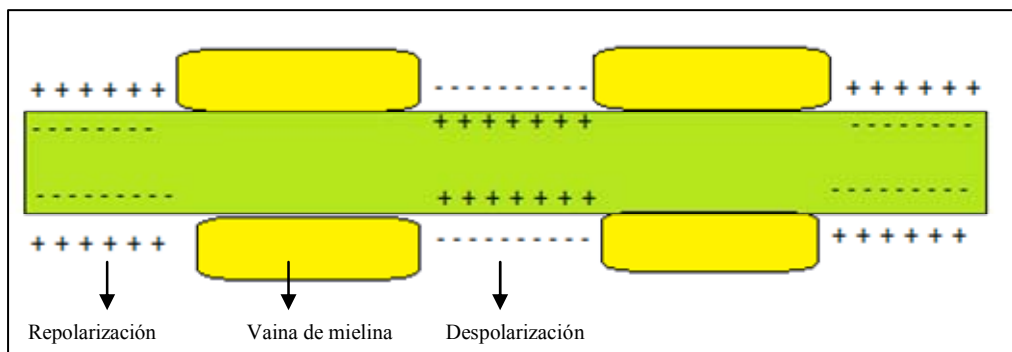


Figura 3.9: Propagación del impulso en un axón miélinico.

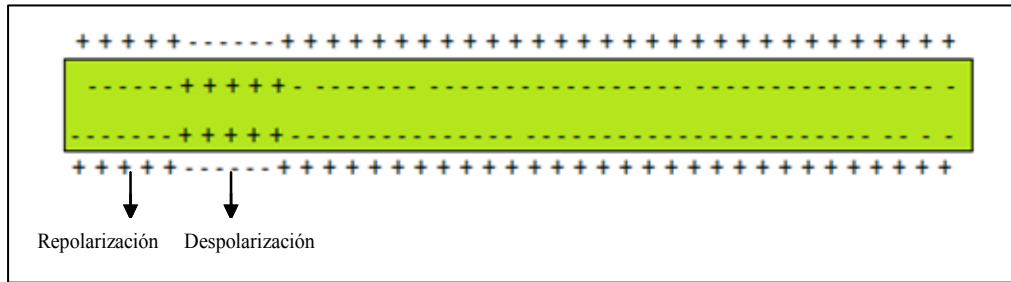


Figura 3.10: Propagación del impulso en un axón amielínico.

La transmisión del impulso nervioso se realiza por medio del proceso conocido como *sinapsis*. Mediante este proceso, las células del sistema nervioso se conectan entre sí o con otro tipo de células (musculares). Estas conexiones pueden realizarse a partir de dos tipos de sinapsis: eléctricas o químicas (Fig. 3.11). En las primeras, que ocurren en menor cantidad, las dos células neuronales se encuentran en contacto directo; así los canales iónicos de las membranas presinápticas y postsinápticas están juntos y las zonas de contacto se denominan uniones tipo hendidura o tipo gap. Este tipo de uniones en las células excitables permite que la transmisión del impulso sea con rapidez y sincronización, como si formaran un verdadero sincitio eléctrico. En las sinapsis químicas, existe una separación física o espacio intersináptico entre las dos células en donde es vertido el neurotransmisor (catecolamina, acetilcolina, GABA, histamina, etc.), que es la sustancia o mediador químico que transmitirá la información. Los neurotransmisores se liberan a partir de botones terminales existentes en la membrana presináptica difundiendo hacia el espacio o hendidura intersináptica y a partir de allí interaccionan con proteínas específicas, los receptores postsinápticos, existentes en la membrana postsináptica, produciendo su despolarización o hiperpolarización, dependiendo del tipo de neurotransmisor secretado, provocando así, una respuesta de tipo excitatoria o inhibitoria, respectivamente.

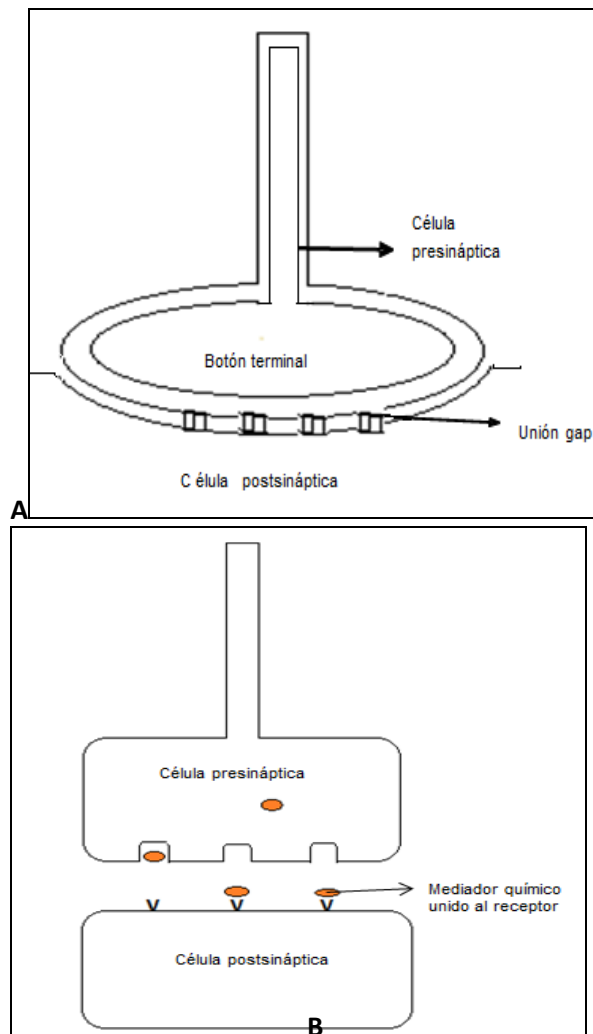


Figura 3.11: A) Sinapsis eléctrica. B) Sinapsis química.

Potenciales Eléctricos del Corazón

Introducción

El corazón es el órgano principal del aparato circulatorio. Está formado por 4 cavidades, dos aurículas (izquierda y derecha) y dos ventrículos (izquierdo y derecho). Asimismo, estructuralmente presenta una capa interna denominada endocardio, la cual recubre las cavidades 4 cavidades. Inmediatamente después se encuentra el miocardio, que constituye el músculo cardíaco propiamente dicho. A este último le sigue la capa más externa denominada epicardio y, finalmente, el corazón se encuentra limitado por el pericardio, que lo protege y separa del resto de los órganos.

El corazón está compuesto por tres tipos de músculo cardíaco: miocardio auricular, miocardio ventricular y las fibras musculares excitadoras o también llamadas, fibras conductoras especializadas (marcapasos). A pesar de que en estas últimas la capacidad de contracción es débil ya que carecen de fibras contráctiles, su importancia se basa en la propiedad que tienen de generar potenciales de acción, haciendo del corazón un órgano autónomo, es decir, que puede contraerse en ausencia de un estímulo nervioso. Por su parte, tanto el músculo auricular como el ventricular están formados por fibras musculares de trabajo (contráctiles), capaces de contraerse en respuesta al potencial de acción generado por las fibras musculares excitadoras.

Potenciales eléctricos en el músculo cardíaco

El potencial de membrana en reposo de las fibras cardíacas en el miocardio auricular y ventricular es de aproximadamente -90 mV. Como todo tejido excitable, este potencial no se modifica si el tejido no es estimulado. Una característica importante del miocardio es que la contracción se regirá bajo la *Ley del Todo o Nada*, ya explicada anteriormente, es decir, que ante la llegada de un estímulo la contracción sucederá completamente o no se dará si el estímulo no alcanza el umbral.

El potencial de acción es el mecanismo básico que utiliza el miocardio para transmitir el impulso eléctrico. Al producirse un potencial de acción, el potencial de membrana en reposo que se encontraba próximo a los -90 mV se eleva hasta un valor positivo de $+20$ mV, aproximadamente.

A nivel cardíaco, el impulso eléctrico se genera en el nódulo sinusal también llamado sinoauricular (S-A) o nódulo S-A, que se encuentra ubicado en la pared súpero lateral posterior de la aurícula derecha. Este nódulo tiene la capacidad de autoexcitarse, actuando como el marcapasos cardíaco. Posteriormente el impulso se propaga al miocardio auricular y de este a través de las vías internodulares llega al nódulo auriculoventricular (A-V). Este último está ubicado en la pared posterior de la aurícula derecha. Aquí el impulso procedente de las aurículas sufre un pequeño retraso, para luego propagarse por medio del haz de Hiss, de sus ramas y por las fibras de Purkinje, hacia todo el miocardio ventricular (Fig. 3.12).

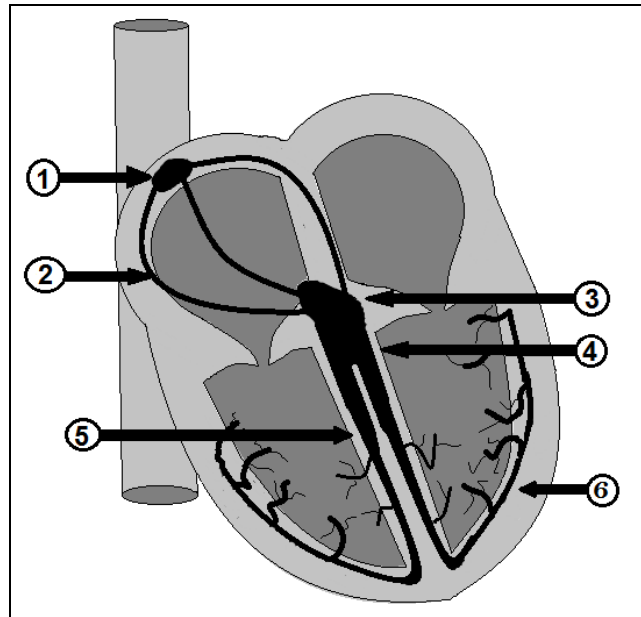


Figura 3.12: Representación del sistema de conducción eléctrica del corazón. 1, nódulo sinuauricular; 2, vías internodulares; 3, nódulo auriculoventricular; 4, haz de His; 5, ramas derecha e izquierda del haz; 6, fibras de Purkinje.

A nivel celular, en las fibras miocárdicas, durante la llegada del potencial de acción se produce la activación de los siguientes canales iónicos dependientes de voltaje o voltaje sensibles:

- Canales rápidos de sodio (Na^+).
- Canales lentos de calcio (Ca^{+2}).
- Canales lentos de Na^+ .
- Canales de potasio (K^+) sensibles al voltaje.

Estos canales se activarán a distintas velocidades y tiempos, permitiendo el ingreso de cargas eléctricas positivas al interior celular, generando consigo la liberación de calcio desde los túbulos sarcoplasmáticos y, finalmente, la contracción de las fibras miocárdicas.

Para poder comprender esto, veremos cómo se produce el potencial de acción en las fibras miocárdicas ventriculares. En la Figura 3.13 podemos ver 5 fases, indicadas con los números de 0 a 4, durante las cuales se producen los siguientes acontecimientos:

- Fase 0: Apertura de canales rápidos de Na^+ . Se produce el ingreso masivo de iones Na^+ al interior celular.
- Fase 1: Se cierran los canales rápidos de Na^+ y se abren los canales de K^+ , lo que genera una repolarización parcial al salir cargas netas positivas hacia el exterior celular.

- Fase 2: “Fase de Meseta”. Comienzan a abrirse los canales lentos de Na^+ y Ca^{+2} , que permiten el ingreso de estos iones al interior celular, mientras que los canales de K^+ continúan abiertos. Esto produce la fase de meseta característica.
- Fase 3: Se cierran los canales lentos de Na^+ y Ca^{+2} , los canales de K^+ continúan abiertos, lo que precipita la repolarización.
- Fase 4. Se activa la bomba de Na^+/K^+ ATPasa y se recupera el potencial de membrana en reposo.

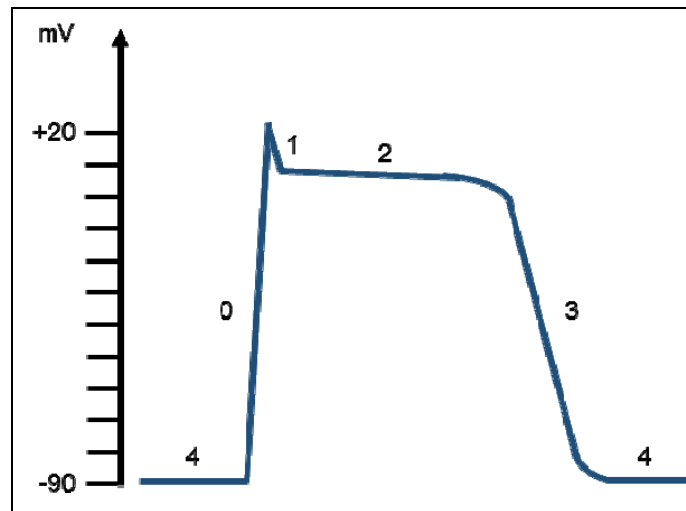


Figura 3.13: Representación gráfica del potencial de acción en las células miocárdicas ventriculares expresado en milivoltios (mV). Descripción detallada en el texto.

Bases Físicas del Electrocardiograma

Introducción

El electrocardiograma (ECG) consiste en el registro gráfico de la actividad eléctrica del corazón. Esto es posible gracias a que los potenciales eléctricos generados por el corazón se distribuyen en el organismo hasta llegar a la superficie corporal. Al colocar los electrodos del electrocardiógrafo en determinados puntos de la superficie corporal, denominados derivaciones, se pueden registrar los potenciales eléctricos.

El electrocardiógrafo es el aparato eléctrico que registra los potenciales eléctricos generados por el corazón. La ubicación de los electrodos sobre la superficie corporal determina la formación de un triángulo, conocido como “Triángulo de Einthoven”.

Consideraciones generales para realizar un electrocardiograma

Para realizar el ECG el animal debe estar tranquilo, evitando cualquier factor estresante. Por ello, es ideal un ambiente tranquilo, con poca luz y libre de ruidos. La posición de preferencia en los animales domésticos es decúbito lateral derecho, ya que ha sido estandarizada internacionalmente. En ocasiones donde dicha posición pueda representar un riesgo para el animal, el ECG puede realizarse en estación o incluso en decúbito esternal.

En el canino doméstico suelen emplearse 4 electrodos también llamados “cocodrilos” por su aspecto dentado. Los mismos se identifican con diferentes colores y se colocan en la piel de la siguiente manera:

- Electrodo rojo: Miembro anterior derecho, a la altura del codo.
- Electrodo negro: Miembro posterior derecho, a la altura de la rodilla.
- Electrodo verde: Miembro posterior izquierdo, también a la altura de la rodilla.
- Electrodo amarillo: Miembro anterior izquierdo, a la altura del codo.

En algunas situaciones suele colocarse un quinto electrodo para evaluar las derivaciones precordiales. Estas derivaciones son menos utilizadas en la medicina veterinaria. Su ubicación más frecuente es en el 6to espacio intercostal a la altura del corazón, por encima de la punta del ventrículo izquierdo (Imagen 3.1).

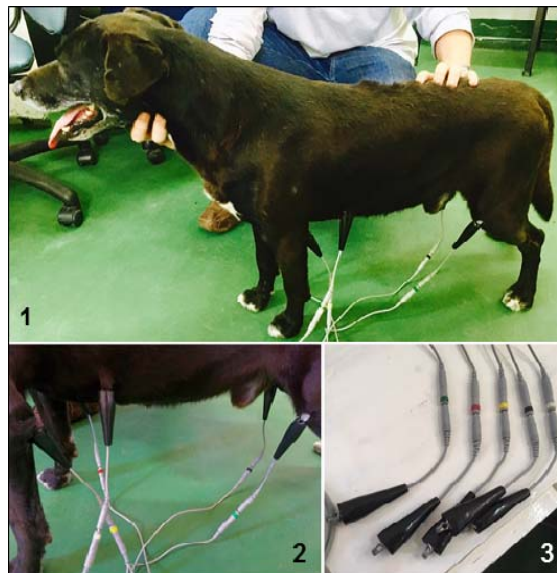


Imagen 3.1: 1y 2) Ubicación de los electrodos en un canino macho en estación. 3) Identificación de los electrodos por color.

Electrocardiograma normal

El ECG en condiciones fisiológicas normales está formado por una onda P, un complejo QRS y una onda T (Fig. 3.14).

La onda P representa la despolarización de las aurículas, que sucede antes de la contracción auricular. Corresponde al potencial de acción generado en el nódulo sinoauricular que difunde por las vías internodulares hacia el nódulo auriculoventricular.

El complejo QRS representa la despolarización de los ventrículos, que sucede antes de la contracción ventricular. En este caso, se activan las fibras musculares de los ventrículos. La onda de despolarización que se va extendiendo por ambos ventrículos de la siguiente forma:

- Onda Q, representa la despolarización del septum interventricular, pared que divide los dos ventrículos.
- Onda R, representa la despolarización de la punta del ventrículo izquierdo.
- Onda S, representa la despolarización de la base del ventrículo izquierdo.

La onda T representa la repolarización de los ventrículos, es decir, cuando los ventrículos se recuperan de su estado de despolarización.

El segmento P-R es el espacio comprendido entre el final de la onda P y el inicio del complejo QRS. Durante este periodo finaliza la despolarización de las aurículas y se inicia la activación del nódulo A-V.

El segmento S-T corresponde a la fase lenta de la despolarización de los ventrículos. Básicamente se inicia al terminar el complejo QRS y finaliza al iniciar la onda T.

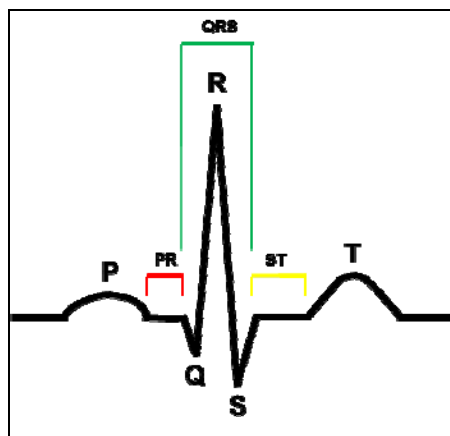


Figura 3.14: Representación gráfica de un electrocardiograma normal. Onda P; Complejo QRS; Onda T; Segmento PR; Segmento ST.

Referencias

- Castellote S. B. (1995) Fisiología del nervio. En: A. García Sacristán. *Fisiología Veterinaria (1ra edición)* (pp. 11-40). Madrid, España: McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Cisale H. (2011). Membrana celular y transporte. En: H. Cisale. *Física Biológica Veterinaria. (2º edición)* (pp. 89-112). Buenos Aires: Editorial Eudeba.
- Frumento A.S (1995). Bases electrofisiológicas. En A.S Frumento Biofísica (3ra Edición), *Bases biofísicas de la electrocardiografía* (pp. 209-231). Madrid, España: Mosby-Doyma Libros.
- Guyton AC, Hall JE (2001). Músculo cardíaco, el corazón como bomba. En C. A. Guyton y J. E. Hall (Eds.), *Tratado de fisiología médica (10ma edición)* (pp. 115-127). México: McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Guyton AC, Hall JE (2001). Estimulación rítmica del corazón. En C. A. Guyton y J. E. Hall (Eds.), *Tratado de fisiología médica (10ma edición)* (pp. 129-136). México: McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Guyton AC, Hall JE (2001). Electrocardiograma normal. En C. A. Guyton y J. E. Hall (Eds.), *Tratado de fisiología médica (10ma edición)* (pp. 137-143). México: McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Parisi M (2001). Biofísica cardíaca y respiratoria, de la atmósfera y del mar. En M. Parisi. *Temas de Biofísica* (pp. 197-205). Santiago, Chile: McGraw-Hill Interamericana de Chile LTDA.