

APLICACIONES DE LA ELECTROQUÍMICA EN NEUROFISIOLOGÍA

APPLICATIONS OF ELECTROCHEMISTRY IN NEUROPHYSIOLOGY

Olga P. Márquez, Jairo Márquez P.

Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias, Laboratorio de Electroquímica -
Grupo de Salud y Electroquímica Mérida 5101-Venezuela
ORCID: 0000-0001-6230-1456; Email: ,olgamq@gmail.com

Recibido: 16-01-2026

Aceptado: 20-05-2026

RESUMEN

La neurofisiología es una disciplina, dentro de la medicina, dedicada al entendimiento de los mecanismos y funciones del sistema nervioso del cuerpo humano. El líquido cefalorraquídeo (LCR) es un fluido corporal que puede utilizarse para el diagnóstico de diversas enfermedades. Sin embargo, la obtención de LCR requiere un procedimiento invasivo y doloroso denominado punción lumbar (PL). Este procedimiento se aplica a cualquier paciente con riesgo conocido de daño en el sistema nervioso central (SNC) o de enfermedad neurodegenerativa, independientemente de su edad. En consecuencia, puede tratarse de un procedimiento muy doloroso, especialmente en infantes y pacientes de la tercera edad. Por otro lado, la detección de biomarcadores de enfermedades en el LCR permite que los diagnósticos sean lo más precisos posible. Esta revisión tiene como objetivo explorar nuevas propuestas de biosensores electroquímicos que han tenido un impacto en la ciencia biomédica. La electroquímica ha mostrado ser una poderosa herramienta que juega un rol muy importante en el desarrollo de la electrofisiología, facilitando y simplificando los procedimientos de diagnóstico de afecciones neurológicas.

Palabras clave: neurofisiología, biosensores electroquímicos, sistema nervioso, neurotransmisores, líquido cefalorraquídeo

ABSTRACT

Neurophysiology is a branch of medicine dedicated to understanding the mechanisms and functions of the human nervous system. Cerebrospinal fluid (CSF) is a bodily fluid that can be used to diagnose various diseases. However, obtaining CSF requires an invasive and painful procedure known as a lumbar puncture (LP). This procedure is performed on any patient with a known risk of central nervous system (CNS) damage or neurodegenerative disease, regardless of age. Consequently, it can be a very painful procedure, especially for infants and elderly patients. On the other hand, the detection of disease biomarkers in CSF allows for the most accurate diagnoses possible. This review aims to explore new proposals for electrochemical biosensors that have had an impact on biomedical science. Electrochemistry has proven to be a powerful tool that plays a very important role in the development of electrophysiology, facilitating and simplifying diagnostic procedures for neurological conditions.

Keywords: neurophysiology, electrochemical biosensors, nervous system, neurotransmitters, cerebrospinal fluid

Olga P. Márquez: Ph.D. en Electroquímica (Univ. de Southampton, U.K.), licenciada en Química (UCV-ULA), miembro del personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias-ULA. e-mail: olgamq@ula.ve/

Jairo Márquez P: Ph.D. en Electroquímica (Univ. de Southampton, U.K.), licenciado en Química (UCV-ULA), miembro del personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias-ULA. e-mail: jamar@ula.ve/

Introducción

El sistema nervioso, es una gran red intrínsecamente eléctrica y química, siendo así un área completamente interdisciplinaria, de estudio natural para las técnicas electroquímicas. Estas herramientas de medición, fundamentadas en la interacción entre la electricidad y la materia, permiten a los neurocientíficos explorar y cuantificar una amplia gama de sustancias químicas clave en el entorno cerebral.

Desde iones simples hasta complejos neurotransmisores, la electroquímica ofrece una ventana única para observar los procesos neuronales dinámicos.

El estudio electrofisiológico es una herramienta primordial en el diagnóstico y tratamiento de las arritmias cardíacas. Es un estudio invasivo que consiste en evaluar el sistema eléctrico de conducción del corazón y al mismo tiempo inducir y estudiar las arritmias cardíacas.

El objetivo de este artículo es describir algunos aspectos relevantes de la importancia de la electroquímica en el campo de la neurociencia.

Neurofisiología

La neurofisiología es la rama de la fisiología que estudia el funcionamiento dinámico del sistema nervioso (central, periférico y autónomo) mediante el registro de su actividad bioeléctrica. Permite analizar cómo las neuronas se comunican y cómo el cerebro, médula y nervios integran información para regular conductas, movimientos y funciones sensoriales.

Permite comprender los mecanismos electroquímicos que subyacen a la función nerviosa, tanto en estado normal como patológico 1. Campos de estudio: Abarca desde la actividad a nivel de membrana neuronal (potenciales de acción) hasta funciones superiores del cerebro.

Estructuras del sistema nervioso

El sistema nervioso es una red de neuronas que se encarga de generar, modular y transmitir información entre las diferentes partes del cuerpo humano (figura 1). Esto permite que ocurran muchas actividades importantes del organismo, como la regulación de funciones vitales del cuerpo (latidos del corazón, respiración, digestión), sensación y movimientos corporales, sentir dolor, entre otras. En síntesis, las estructuras del sistema nervioso gobiernan la conciencia, cognición, comportamiento y recuerdos.

Encéfalo

Es donde se procesa la información proveniente del cuerpo y se generan comandos a los tejidos corporales de cómo responder y funcionar frente a los diferentes estímulos. Comprende todo el espectro de las funciones corporales, desde la respiración hasta el pensamiento.

Comprende cuatro partes: Cerebro (telencéfalo), diencefalo, cerebelo y tronco encefálico (figura 2). En estas cuatro partes se procesa la información proveniente del cuerpo y se generan comandos u órdenes que indican a los tejidos de nuestro cuerpo cómo responder y funcionar frente a los diferentes estímulos del medio externo

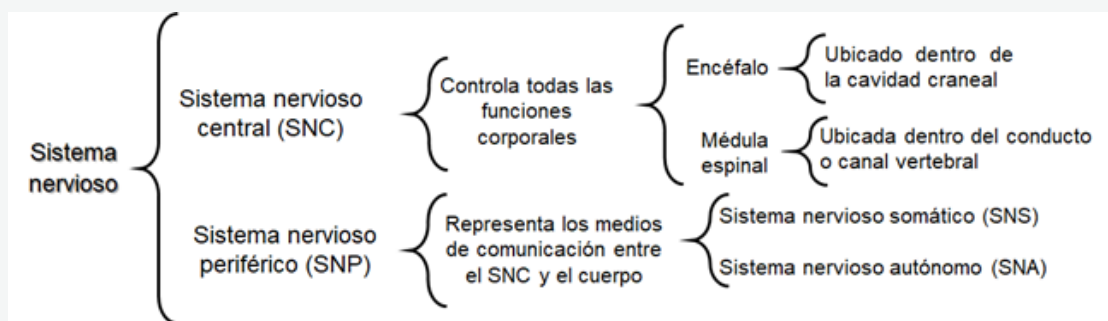


Figura 1.- Cuadro esquemático describiendo la estructura del sistema nervioso

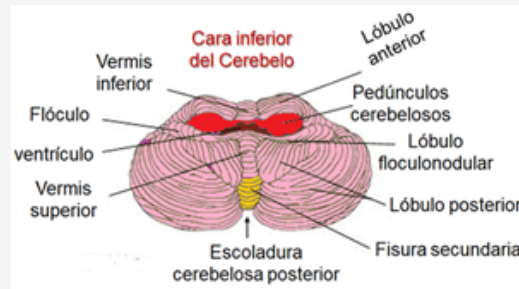
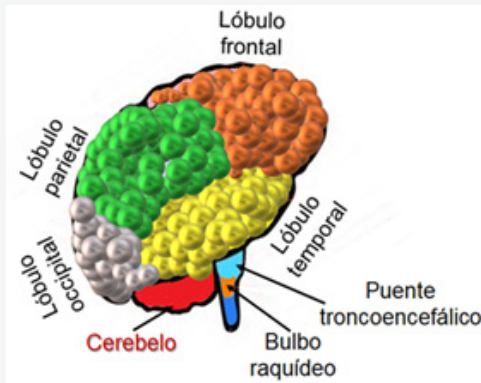


Figura 2.- Figura descriptiva del encéfalo y la masa cerebral

e interno. Estas órdenes abarcan todo el espectro de las funciones corporales, desde respirar hasta pensar.

Médula espinal

Es la continuación del tronco encefálico. Puede generar órdenes, pero solo para procesos involuntarios como los reflejos: Ejemplo: si se percibe calor fuerte en una mano, la médula ordena que la mano se retire, No obstante, su función principal es conducir información entre el encéfalo y el resto del cuerpo. El cilindro de la médula espinal consta de fascículos de axones que se extienden hacia arriba y hacia abajo para conducir señales hacia el cerebro o desde el mismo (figura 3).

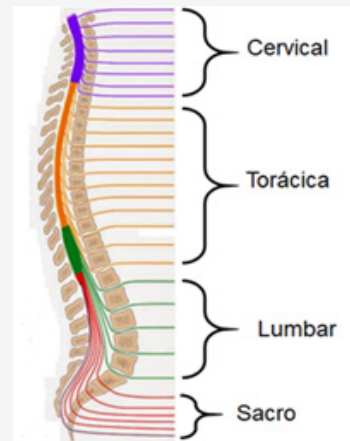


Figura 3.- Corte transversal de una médula espinal

Nervios periféricos

Forman la red de comunicación entre el cerebro y la médula espinal con el resto del cuerpo, incluyendo extremidades, órganos y piel, transmitiendo información motora y sensorial (figuras 4 y 5).

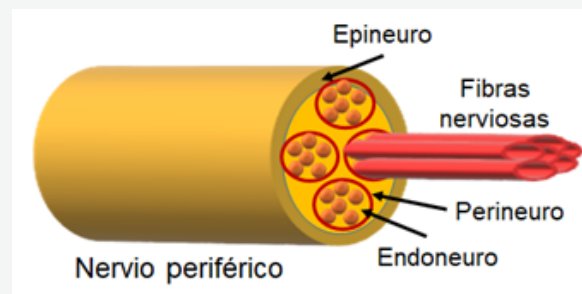


Figura 5.- Representación gráfica de un nervio periférico

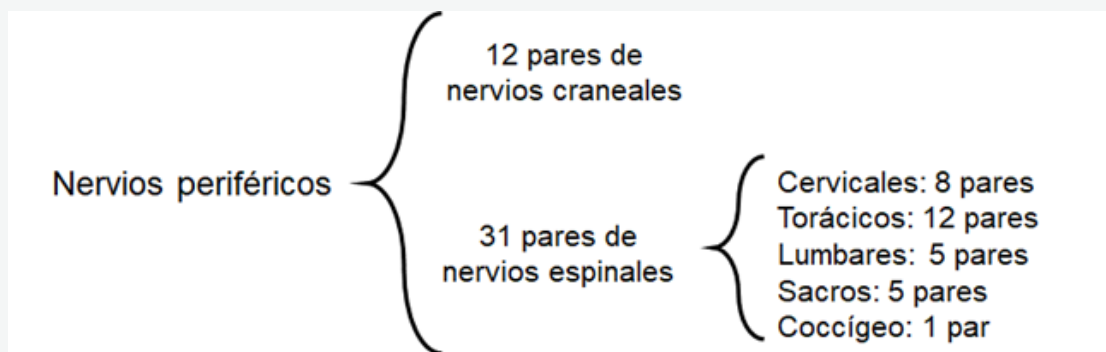


Figura 4.- Cuadro esquemático describiendo los nervios periféricos

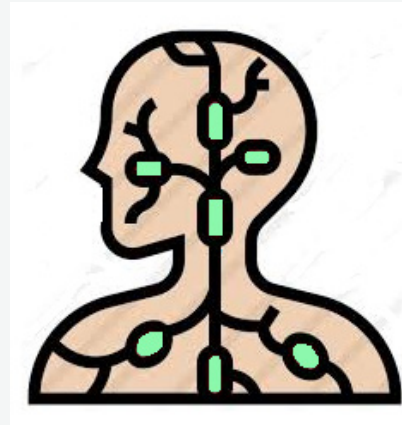


Figura 6.- Representación de ganglios en el cuerpo humano

Ganglios

Son agrupaciones de cuerpos neuronales, con forma de pequeñas lentejas, que se encuentran a lo largo de los nervios, fuera de la médula espinal y el cerebro (figura 6),

Neuronas

Son células nerviosas especializadas que conducen impulsos electroquímicos a lo largo del cuerpo para el control, modulación e integración de las funciones de los tejidos corporales. Permiten que el encéfalo y el cuerpo se comuniquen transmitiendo la información sensorial y los comandos motores como señales eléctricas.

Las neuronas liberan sustancias llamadas neurotransmisores, que llevan el mensaje hasta la siguiente neurona o célula del cuerpo. Una neurona consta de un cuerpo celular, o soma, que posee muchas ramas denominadas dendritas (figura 7).

Si el cuerpo de la célula se despolariza lo suficiente, entonces la región del cono axónico inicia un potencial de acción que viaja por la estructura con forma de cola denominada axón. Las vainas de mielina aumentan la conductividad, o velocidad de transmisión de la señal.

Los mecanismos más complejos del sistema

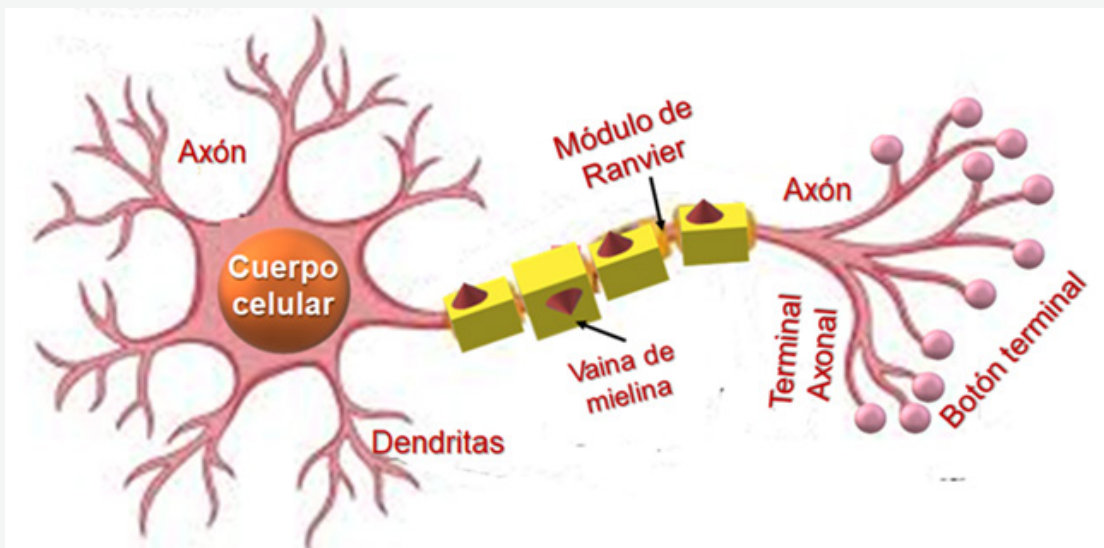


Figura 7.- Representación gráfica de una neurona

nervioso dependen de mensajes enviados a través de neuronas. Las neuronas, junto con la neuroglía que son las células de sostén, componen la totalidad del tejido del sistema nervioso. Reciben y transmiten mensajes rápidamente, como señales eléctricas. Las neuronas liberan neurotransmisores, sustancias químicas que llevan el mensaje hasta la siguiente neurona o célula del cuerpo.

La electroquímica es una herramienta poderosa en el estudio de los neurotransmisores. En 1984 se reporta un método de cromatografía líquida con detección amperométrica, para la determinación de noradrenalina (NA), dopamina (DA) y ácido 3,4-dihidroxifenilacético (DOPAC) en el líquido cefalorraquídeo (LCR) humano y de monos, obteniéndose límites de sensibilidad en el intervalo de 0,1 a 3 pmol/ml de cada especie, utilizando un detector electroquímico.²

La determinación de dopamina (DA) en líquido cefalorraquídeo sintético (LCRa) mediante voltametría de onda cuadrada (SWV) se logró con alto nivel de sensibilidad y selectividad, empleando electrodos de carbono modificados, encontrándose concentraciones de DA en el intervalo nanomolar a micromolar sin interferencia del ácido ascórbico (AA) o ácido úrico.³

La determinación voltamétrica de levodopa (L-DOPA) en medios acuosos se realizó usando el método de electrobobinado de nanofibras de dióxido de titanio (TiO₂).

El electrodo modificado exhibió un área superficial efectiva, más sitios reactivos y una excelente actividad electrocatalítica hacia la oxidación de L-DOPA. En el rango de concentración de 3×10^{-7} a 6×10^{-5} M de L-DOPA, las corrientes de pico anódicas, medidas mediante voltametría de pulso diferencial (DPV), presentaron una buena relación lineal con un límite de detección (LOD) de 15,94 nM y una buena sensibilidad de $0,0806 \mu\text{A} \mu\text{M}^{-1}$. El método propuesto se aplicó con éxito para cuantificar L-DOPA en líquido cefalorraquídeo, suero sanguíneo y plasma humanos.⁴

El uso de óxido de grafeno reducido, dopado con nitrógeno (N-rGO) como sensor electroquímico para la evaluación de dopamina, ofrece ventajas prometedoras para una detección directa y sencilla del neurotransmisor. Se realiza previamente la reducción hidrotérmica del Grafeno, utilizando amitrol (3-amino-1,2,4-triazol, también conocido como aminotriazol o 3-AT) como dopante de nitrógeno. Se observó una relación directa entre el contenido de oxígeno en el N-rGO y el rendimiento electroquímico de estos sensores.

De este modo, la detección de Dopamina (DA) en presencia de ácidos ascórbico y úrico resultó más sensible y selectiva al utilizar la muestra de N-rGO menos reducida. La atracción entre el oxígeno electronegativo de la estructura del grafeno y la DA catiónica facilita el proceso de adsorción, lo que podría explicar este comportamiento.⁵

Se ha reportado el desarrollo de un procedimiento sensible para la determinación simultánea de ácido ascórbico (AA), dopamina (DA), ácido úrico (UA) y triptófano (TRP) utilizando un electrodo compuesto a base de nanoesferas (NB) de negro de carbono (CBNB) y nanotubos de carbono (CNT).⁶ El electrodo CBNB/CNT/GCE presentó picos voltamétricos bien definidos para AA, DA, UA y TRP. El procedimiento propuesto también mostró una excelente actividad catalítica y logró grandes incrementos en las respuestas de corriente de DA, AA, UA y TRP.

La determinación simultánea en el electrodo CBNB/CNT/GCE se llevó a cabo mediante voltametría de onda cuadrada (SWV). Las respuestas de corriente anódica cambiaron linealmente con las concentraciones en el intervalo de $2,0 \times 10^{-5}$ – $4,0 \times 10^{-4}$ M para AA, $5,0 \times 10^{-8}$ – $2,75 \times 10^{-6}$ M para DA, $1,0 \times 10^{-6}$ – $4,5 \times 10^{-5}$ M para UA y $2,5 \times 10^{-8}$ – $4,8 \times 10^{-6}$ M para TRP. Los límites de detección obtenidos con CBNB/CNTs/GCE fueron de $5,71 \times 10^{-6}$ M para AA, $1,7 \times 10^{-8}$ M para DA, $4,2 \times 10^{-7}$ M para UA y $1,1 \times 10^{-8}$ M para TRP. El compuesto de CNTs y CBNB proporcionó buena reproducibilidad y excelente selectividad para DA, AA, UA y TRP. El procedimiento propuesto también se aplicó a muestras farmacéuticas y

alimentarias con resultados satisfactorios.

El desarrollo de sistemas de estimulación cerebral profunda (ECP) de sistema cerrado representa una oportunidad significativa para la innovación en la aplicación clínica de las terapias de neuroestimulación. A pesar de la naturaleza vertiginosa de las enfermedades neurológicas, las aplicaciones de ECP de sistema abierto son deficientes para modificar parámetros en tiempo real para reaccionar a las fluctuaciones en los estados de la enfermedad. Por ende, la práctica actual para la designación de parámetros de estimulación, como la duración, la amplitud y la frecuencia de pulso, es un proceso algorítmico.

Los parámetros de estimulación ideales son altamente individualizados y deben reflejar tanto la presentación específica de la enfermedad como la fisiopatología única de cada individuo. Los parámetros de estimulación actualmente requieren un largo proceso de ensayo y error para lograr el máximo efecto terapéutico y solo pueden modificarse durante las visitas.

Existe, entonces, un gran interés en el desarrollo de marcadores neuroquímicos y electrofisiológicos para el desarrollo de tecnologías de neuroestimulación. Los biomarcadores electrofisiológicos, como los potenciales de campo locales, se han utilizado para diagnosticar estados de enfermedad. La detección y cuantificación en tiempo real de sustancias neuroquímicas puede ser igualmente útiles para la caracterización de enfermedades.

Por lo tanto, la introducción de analitos neuroquímicos medibles ha enriquecido significativamente las opciones de biomarcadores para sistemas de neuromodulación sensibles a la retroalimentación. Esto permite la incursión en el uso potencial de biomarcadores para impulsar los enfoques de neuroestimulación para el tratamiento de la enfermedad de Parkinson, el temblor esencial, la epilepsia, el síndrome de Tourette, el trastorno obsesivo-compulsivo, el dolor crónico y la depresión. Además, se revisan los desafíos y los

avances en el desarrollo de la tecnología de neuroestimulación de circuito cerrado, así como las oportunidades para las plataformas de circuito cerrado de próxima generación.⁷

La enfermedad de Parkinson (EP) es un trastorno neurodegenerativo progresivo que afecta a las neuronas dopaminérgicas de la sustancia negra. La pérdida de estas neuronas provoca una disminución en la liberación de dopamina (DA) en el cuerpo estriado y, por consiguiente, un deterioro de las funciones motoras. La DA es uno de los neurotransmisores importantes que se monitorizan para el diagnóstico, la progresión y el tratamiento de la EP.

Por lo tanto, los métodos de detección de DA sensibles y selectivos son de gran relevancia clínica. Se ha descrito un nuevo dispositivo microfluídico para la detección electroquímica de DA. Este dispositivo funciona en el intervalo de concentraciones de 0,1 a 1000 nM de DA y requiere un volumen de muestra de ~2,4 μ L. Mediante este sensor, se puede hacer un seguimiento de los cambios en los niveles de DA en el líquido cefalorraquídeo y el plasma, durante el tratamiento con el fármaco l-3,4-dihidroxifenilalanina.⁸

Una característica patológica de la enfermedad de Parkinson (EP) es la pérdida progresiva de neuronas dopaminérgicas y la disminución del contenido de dopamina (DA) en la sustancia negra pars compacta en cerebros con EP. La DA es el neurotransmisor de las neuronas dopaminérgicas. La evidencia acumulada sugiere que la DA interactúa con factores ambientales y genéticos para contribuir a la fisiopatología de la EP.

Se ha demostrado que las alteraciones en la síntesis, el almacenamiento, el transporte y el metabolismo de la DA promueven la degeneración de las neuronas dopaminérgicas en varios modelos de EP.

La DA es inestable y puede sufrir oxidación y metabolismo para producir múltiples subproductos reactivos y tóxicos, incluyendo especies reactivas de oxígeno, quinonas de DA y 3,4-dihidroxifenilacetaldehído.

Es por ello que se están generando descubrimientos recientes sobre las vías fisiopatológicas relacionadas con la DA y se analizan las posibles estrategias protectoras y terapéuticas para mitigar las complicaciones asociadas con la DA.⁹

El líquido cefalorraquídeo (LCR) es un fluido corporal que permite el diagnóstico de diversas enfermedades. Sin embargo, su obtención requiere un procedimiento invasivo y doloroso llamado punción lumbar (PL). Este procedimiento se aplica a cualquier paciente con riesgo conocido de daño en el sistema nervioso central (SNC) o enfermedad neurodegenerativa, independientemente de su edad.

Por lo tanto, puede ser un procedimiento muy doloroso, especialmente en bebés y ancianos. Por otro lado, la detección de biomarcadores de enfermedades en el LCR permite obtener diagnósticos lo más precisos posible. Es por ello que se están abriendo la exploración de nuevas alternativas electroquímicas que han impactado la ciencia biomédica. Los biosensores han surgido como técnicas para acelerar la detección de biomarcadores conocidos en fluidos corporales como el LCR. Los biosensores se pueden diseñar y modificar de diversas maneras y formas según sus aplicaciones finales para detectar y cuantificar biomarcadores de interés.

Este proceso también puede influir significativamente en la detección y el diagnóstico del LCR. Por lo tanto, es importante comprender el papel de esta tecnología en el campo de la ciencia biomédica, que avanza rápidamente.¹⁰

La detección y el diagnóstico de enfermedades neurológicas en la asistencia sanitaria moderna plantean retos importantes que repercuten directamente en los resultados de los pacientes. La naturaleza compleja de estas afecciones amerita un seguimiento exhaustivo de los biomarcadores asociados a la enfermedad, de manera continua y en tiempo real. Las estrategias actuales de detección química convencional presentan una eficacia clínica limitada debido a los requisitos previos de análisis de laboratorio, que involucra mucha mano de obra, a

la dependencia de la experiencia de los médicos y a las intervenciones prolongadas y recurrentes. La electrónica biointegrada para la detección química es un campo emergente y multidisciplinar impulsado por los rápidos avances en ingeniería eléctrica, biosensores, ciencia de los materiales, química analítica e ingeniería biomédica. Se propone el estudio de biomarcadores neurológicos fundamentales y la exploración de elementos de bio-reconocimiento, estrategias de detección, diseños de transductores y métodos de transmisión inalámbrica de señales.¹¹

Se ha desarrollado un nuevo electrodo de Sonogel-Carbono (SNGC) modificado con un aminoácido (L-leucina; Leu) para la detección sensible de ácido homovanílico (HVA). Usando las técnicas voltametría cíclica (CV) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Se examinó el rendimiento analítico del sensor SNGC-Leu, incluyendo el intervalo lineal de la curva de calibración analítica, la reproducibilidad, la selectividad y el límite de detección. Se empleó la voltametría de pulso diferencial (DPV) para evaluar la respuesta analítica en un intervalo de concentración lineal de HVA de 0,5 μM a 50 μM , con un límite de detección de 0,4 μM . Se obtuvo reproducibilidad y selectividad satisfactorias (coeficiente de variación (%RSD) < 3,5 %). El sensor SNGC-Leu se utilizó con éxito para detectar HVA en orina humana y líquido cefalorraquídeo (LCR) sintético, mostrando tasas de recuperación adecuadas del 97,5-102 % y del 96,3-106 %, respectivamente.¹²

Los biomarcadores desempeñan un papel fundamental en el diagnóstico de enfermedades, la evaluación de la eficacia terapéutica, la valoración del pronóstico y la selección de fármacos. Sin embargo, la concentración traza de estos marcadores en entornos fisiológicos complejos plantean importantes retos para una detección eficaz.

Es necesario evitar la interferencia de señales no específicas, que pueden llevar a confundir otras sustancias con biomarcadores y afectar a la precisión de los resultados de detección. Con los rápidos avances en las tecnologías electroquímicas

y los algoritmos de inteligencia artificial (IA), los biosensores electroquímicos inteligentes se han convertido en un enfoque prometedor para la detección biomédica, ya que ofrecen rapidez, especificidad, alta sensibilidad y precisión.¹³

Los modelos computacionales han demostrado que los patrones de carga superficial pueden inducir un transporte de fluidos y el transporte de solutos. Los flujos simulados exhibieron transiciones no lineales y comportamientos oscilatorios que imitaban ritmos fisiológicos. La evidencia sugiere que la electrostática puede modular la dinámica del líquido cefalorraquídeo, complementando las fuerzas mecánicas.

Tozzi¹⁴ ha propuesto que es probable que las fuerzas electrostáticas, a través de la electroósmosis, desempeñen un papel importante en la regulación del flujo del líquido cefalorraquídeo, de manera que la dinámica del líquido cefalorraquídeo puede ser sensible a los procesos electrohidrodinámicos, lo que ofrece una nueva perspectiva para los biosensores electroquímicos.

Esta hipótesis podría conducir a nuevos métodos de diagnóstico y terapias para

trastornos neurológicos como la hidrocefalia y las enfermedades neurodegenerativas.

Biomarcadores para detección electroquímica en neurofisiología

Un biomarcador es una especie que puede ser detectada y medida con cierto grado de precisión y exactitud mediante técnicas bioanalíticas, en este caso, técnicas electroanalíticas, como indicador de procesos biológicos bien sean normales, patológicos o respuestas farmacológicas luego de un tratamiento terapéutico. De acuerdo al National Institute of Health (NIH), la definición de biomarcador como “aquellas características biológicas, bioquímicas, antropométricas, fisiológicas, etc., objetivamente mensurables, capaces de identificar procesos fisiológicos o patológicos, o bien una respuesta farmacológica a una intervención terapéutica”.¹⁵

Las técnicas de detección electroquímica son cruciales para el estudio in vivo de enfermedades neurológicas y la liberación excitotóxica (proceso celular activo donde la célula expulsa moléculas grandes, proteínas o neurotransmisores al exterior) de estas sustancias.

Neurotransmisores

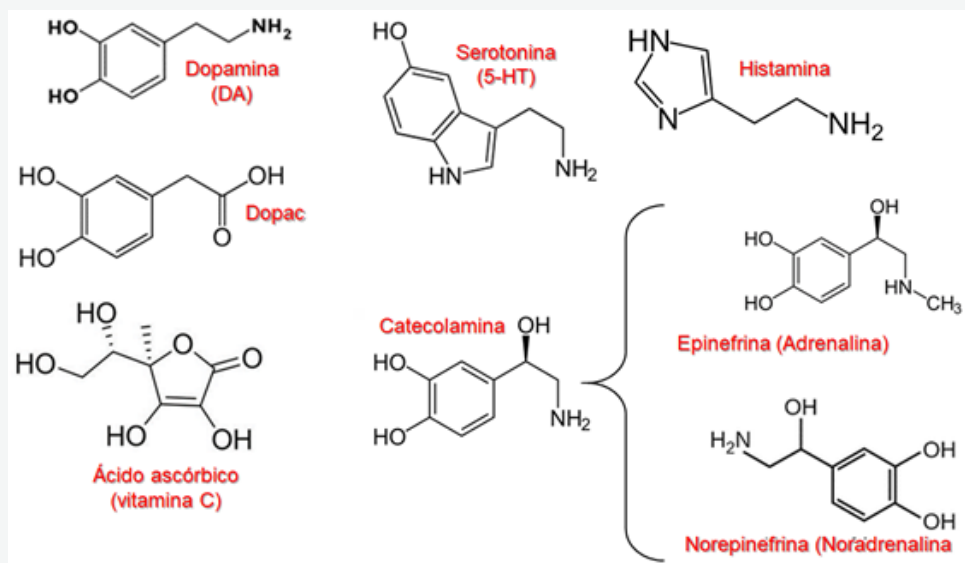
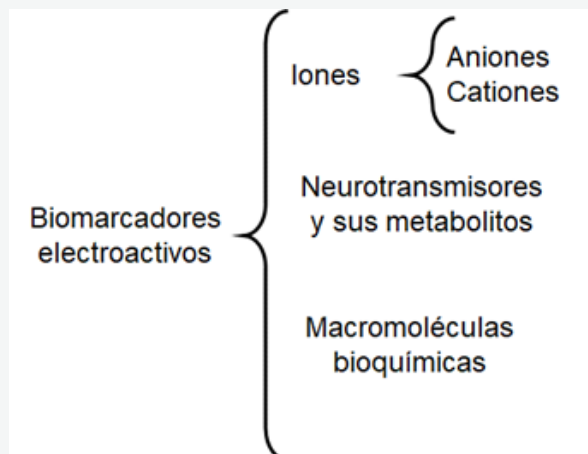


Figura 8.- Representación gráfica de moléculas de marcadores neurotransmisores



Metálicos (cationes)

Na⁺ (Sodio), K⁺ (Potasio), Li⁺ (Litio), Ca²⁺ (Calcio), Mg²⁺ (Magnesio), Hg²⁺ (Mercurio), Pb²⁺ (Plomo), Cd²⁺ (Cadmio), Cu²⁺ (Cobre), Zn²⁺ (Zinc), Ni²⁺ (Niquel), Co²⁺ (Cobalto), Fe²⁺ (Ferroso), Fe³⁺ (Férrico).

Aniones:

CO₃²⁻ (Carbonato), Cl⁻ (Cloruro), Br⁻ (Bromuro), I⁻ (Ioduro), CN⁻ (Cianuro), S²⁻ (Sulfuro), NO₃⁻ (Nitrato), SO₄²⁻ (Sulfato), PO₄³⁻ (Fosfato).

Macromoléculas electroactivas

Son marcadores primordiales en el desarrollo de biosensores electroquímicos de alta sensibilidad para el diagnóstico clínico y la investigación en el área de la salud. Se pueden citar:

Enzimas (Proteínas Redox)

Las enzimas redox (oxidoreductasas) son marcadores biocatalíticos que inducen la transferencia de electrones o protones entre moléculas, estimulando el metabolismo energético, reparaciones de ADN y fotosíntesis.

La reparación enzimática redox del ADN (figura 9) regula la integridad genómica frente al estrés oxidativo, utilizando enzimas como APE1, tiorredoxina (Trx1) y ADN glicosilasas para detectar y corregir daños.^{16,17}

Estos mecanismos redox permiten a las células reparar rupturas de cadenas.

mediante sitios activos especializados que utilizan cofactores (NAD⁺/NADP⁺, FAD) y sufren cambios conformacionales (transferencia directa o mediada de electrones) para facilitar la reacción. Son marcadores biocatalíticos capaces de producir especies electroactivas, como el peróxido de hidrógeno H₂O₂, mediante la oxidorreducción de especies.

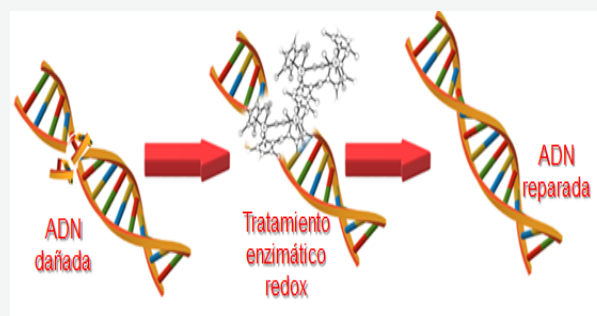


Figura 9.- Representación gráfica mostrando la reparación de una cadena de ADN con mediadores enzimáticos redox, previniendo así la mutagénesis

Es de gran importancia el diagnóstico clínico de biomarcadores de dopamina. El desarrollo de la tecnología en química analítica para la detección cualitativa y cuantitativa de los niveles de dopamina in vitro e in vivo. Se ha reportado una revisión sobre el desarrollo de métodos de detección no enzimática para la determinación simultánea de varios neurotransmisores¹⁸ en base a nanomateriales de carbono.

Un interesante artículo, publicado el año 2019, ofrece un acopio de la actividad realizada por varios investigadores entre los años 2010-2019, con énfasis en el progreso realizado en metodologías para el desarrollo de biosensores nanoestructurados para detección y cuantificación de neurotransmisores in vitro, in vivo y ex vivo.¹⁹

La detección de Dopamina es un medio poderoso para el control de la enfermedad de Parkinson, la cual es una enfermedad neurodegenerativa debido al agotamiento de la dopamina a causa de la pérdida progresiva de neuronas nigroestriales.

La determinación y cuantificación electroquímica sobre electrodos de grafeno modificados.²⁰

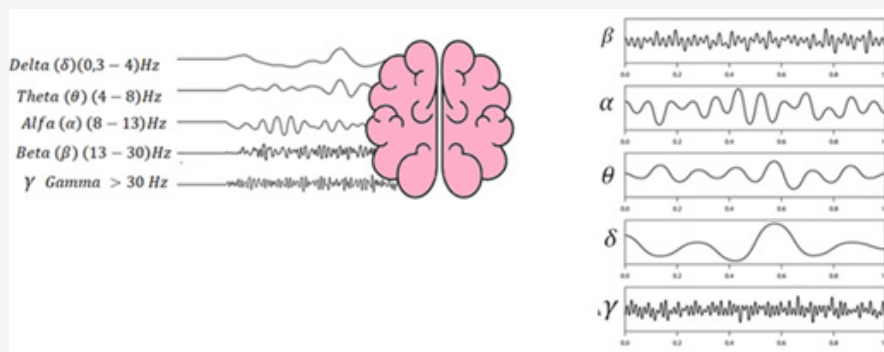


Figura 10.- Actividad eléctrica del cerebro mostrada mediante un electroencefalograma

En resumen, la tecnología electroquímica es fundamental para entender cómo el sistema nervioso genera el comportamiento y para el diagnóstico clínico de patologías neurológicas. Algunas de las patologías tratadas: Epilepsia, trastornos del sueño (narcolepsia, apnea), enfermedades neuromusculares, Parkinson, y problemas de memoria o visión.

El electroencefalograma (EEG) es un estudio mediante el cual se mide los impulsos eléctricos (la actividad eléctrica) del cerebro (figura 10), lo que se denomina ondas cerebrales.

Un EEG mide estas ondas a través de pequeños electrodos en forma de botón que se colocan sobre el cuero cabelludo del paciente para registrar las variaciones en el potencial eléctrico de la actividad cerebral.

Así es posible diagnosticar la presencia de cualquier tipo de crisis convulsiva, confusiones, lesiones en la cabeza, tumores cerebrales, infecciones, enfermedades degenerativas y disturbios metabólicos,

para evaluar trastornos del sueño y para investigar causas de desmayo o pérdida del conocimiento.

También es muy útil para confirmar la muerte cerebral de un paciente en estado de coma. La figura 10 muestra el programa de pulsos eléctricos aplicados para estimular el cerebro y la respuesta eléctrica que se obtiene.

Se puede observar en la figura 12 el arreglo para la aplicación de impulsos de estimulación electroquímica a cerebro del paciente.

La electroquímica in vivo es una herramienta fundamental para hurgar en las consecuencias químicas en las redes neuronales del cerebro.

Actualmente se está adelantando una revolución tecnológica en este campo, acompañada de innovaciones en los conceptos, principios, métodos y dispositivos electroquímicos.

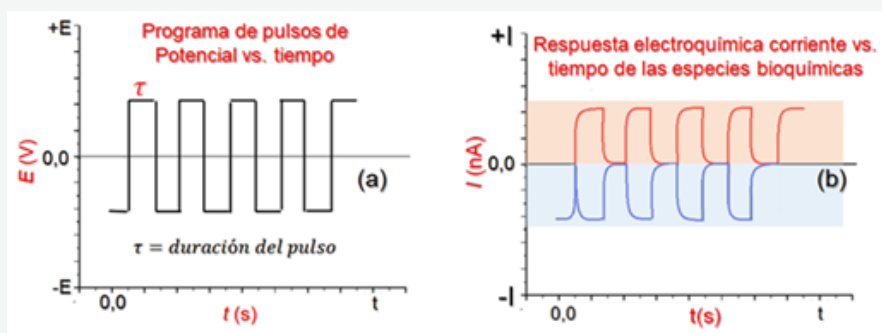


Figura 11.- (a) Aplicación de técnicas de transitorios de potencial (dependientes del tiempo) para la evaluación y determinación de sistemas bioquímicos (b) Respuesta corriente – tiempo para la cuantificación de las especies

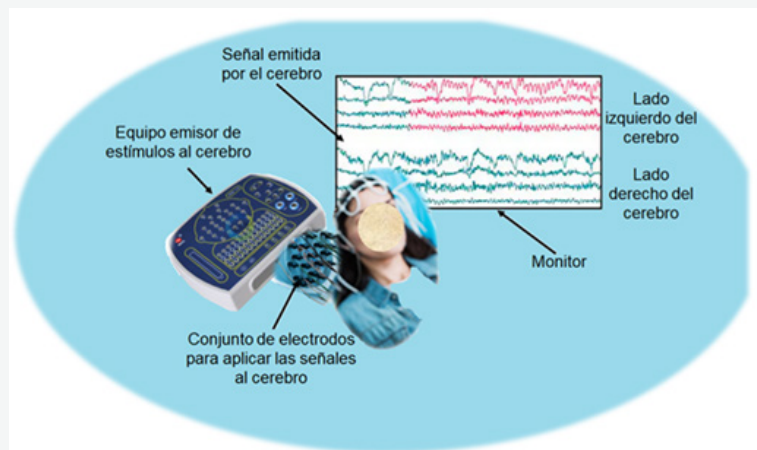


Figura 12.- Arreglo para la aplicación de impulsos de estimulación electroquímica a cerebro del paciente

Las aplicaciones actuales de los enfoques electroquímicos se han ampliado desde la medida de concentraciones neuroquímicas hasta la modulación y la imitación de las señales cerebrales.

Electromiografía (EMG)

Es un procedimiento de diagnóstico que se utiliza para evaluar la salud de los músculos y las células nerviosas que los controlan (neuronas motoras). La EMG y los estudios de conducción nerviosa son pruebas que chequean el funcionamiento de los músculos y los nervios que los controlan. A medida que los músculos reaccionan contrayéndose, emiten señales eléctricas, que son detectadas y medidas (figura 13).



Figura 13.- Arreglo para el estudio de Electromiografía

Generalmente se requiere cuando el paciente presenta los siguientes síntomas:

- ⊗ Hormigueo en todo el cuerpo
- ⊗ Entumecimiento de las extremidades
- ⊗ Debilidad muscular
- ⊗ Dolor o calambre muscular
- ⊗ Algún tipo de dolor en las extremidades superiores e inferiores

La figura 14 muestra el proceso clínico de de Electroneurografía y el Electroneurograma ob

Los resultados de esta técnica permiten diagnosticar las siguientes patologías:

- ⊗ Trastornos musculares, como distrofia muscular o polimiositis.
- ⊗ Afectación de la conexión entre el nervio y el músculo, como la miastenia gravis.
- ⊗ Trastornos de los nervios que se encuentran fuera de los nervios periféricos, como síndrome del túnel carpiano o neuropatías periféricas.
- ⊗ Trastornos en las neuronas motoras del cerebro o la médula espinal, como esclerosis lateral amiotrófica o poliomielitis.
- ⊗ Trastornos en la raíz del nervio, como una hernia discal en la columna vertebral.

Esta técnica también es muy útil en la unidad de cuidados intensivos.²¹

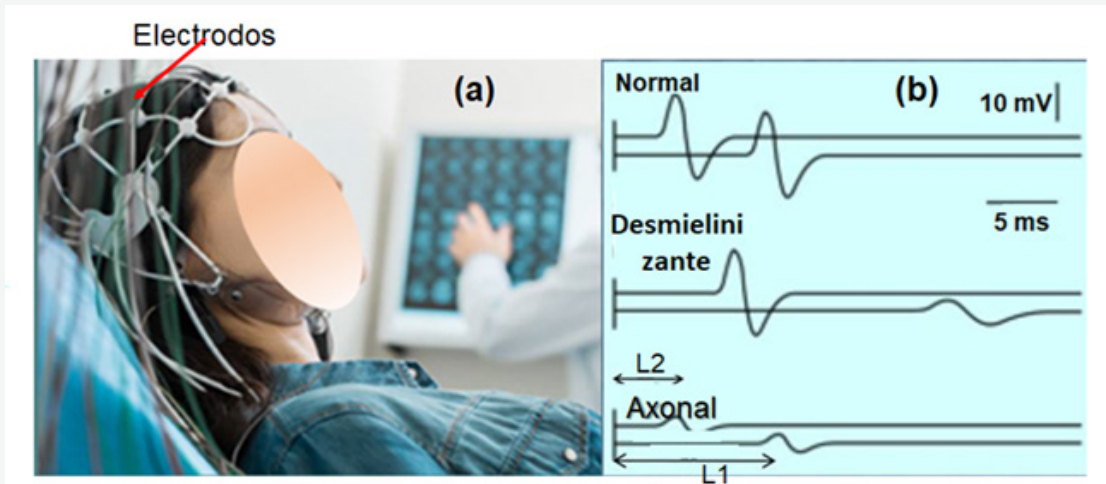


Figura 14.- (a) Procedimiento de Electroneurografía y (b) Electroneurograma

Electroneurografía (ENG)

Es un procedimiento de diagnóstico que evalúa la función de músculos y nervios periféricos.²²⁻²⁵ es una técnica no invasiva y poco molesta usada para el estudio de la conducción de las fibras nerviosas, motoras, sensibles y mixtas, evaluándose básicamente la integridad y la función de los nervios periféricos. En el examen se realiza el registro del potencial eléctrico generado en el músculo o en el propio nervio. al estimular uno o más puntos de la fibra nerviosa a través de la piel. Usualmente se colocan electrodos de superficie sobre la piel del paciente. Pocas veces se utilizan electrodos de aguja. Con el paciente preparado y los electrodos

colocados en el lugar correspondiente se aplican estímulos eléctricos de intensidad y duración variables.

Potenciales evocados

Es un procedimiento de diagnóstico que evalúa la respuesta del sistema nervioso ante estímulos sensoriales; involucra las evaluaciones neuropsicológicas del funcionamiento del cerebro. la prueba del potencial evocado está clasificada como una técnica objetiva psicofisiológica. Las pruebas objetivas implican que la administración, registro, puntuación y análisis de sus datos, se realicen a partir de aparatos. Esta prueba en concreto es poco

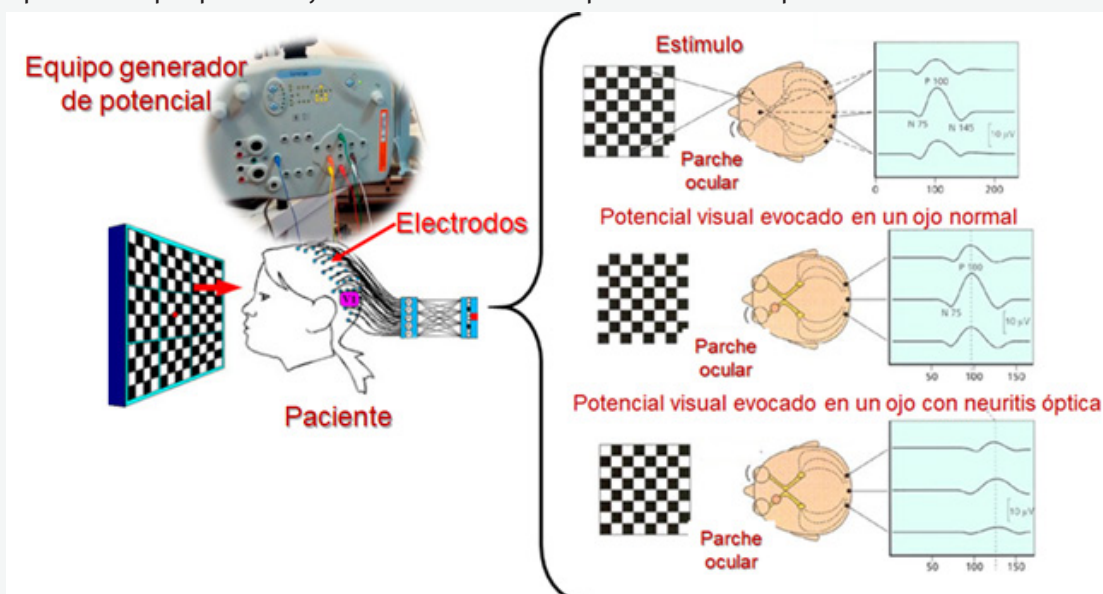


Figura 15.- Sistema electrofisiológico para la evaluación del nervio óptico

invasiva, indolora. La prueba evalúa un tipo de respuesta psicofisiológica muy concreto. Específicamente, sirve para estudiar la actividad eléctrica del cerebro en respuesta a estímulos sensoriales de diferente tipo (auditivos, visuales, somatosensoriales, etc.), es decir, estímulos que proceden de cualquier modalidad, y de corta duración. Este tipo de respuesta parece que tiene relación con el nivel intelectual de la persona.

Tipos de potenciales evocados:

Visuales: Evalúan el nervio óptico mediante patrones de luz o tableros en una pantalla (figura 16).

Auditivos: Evalúan las vías auditivas y el tallo cerebral usando sonidos o clicks en auriculares (figura 16).

periférico hasta el cerebro involucrando todas las estructuras que están en este camino especialmente a la médula espinal que es su mayor aplicación. La evaluación se realiza mediante pequeños impulsos eléctricos en la piel (por lo general, en brazos o piernas) como se muestra en la figura 17.



Figura 17.- Implementación de evaluación mediante potenciales evocados somatosensoriales



Fig
ev

Somatosensoriales: Es un examen que mide la actividad eléctrica desde el nervio

Polisomnografía

Durante el sueño suelen generarse trastornos debido a ciertas patologías como el síndrome de apnea-hipopnea, lo cual limita en forma recurrente el flujo aéreo en el sistema respiratorio. Esto ocasiona descensos de la saturación de la oxihemoglobina (SaO_2) y microdespertares, lo que provoca un sueño no reparador. La Polisomnografía es una técnica electrofisiológica usada como un procedimiento de diagnóstico que estudia los trastornos del sueño (figura 18).

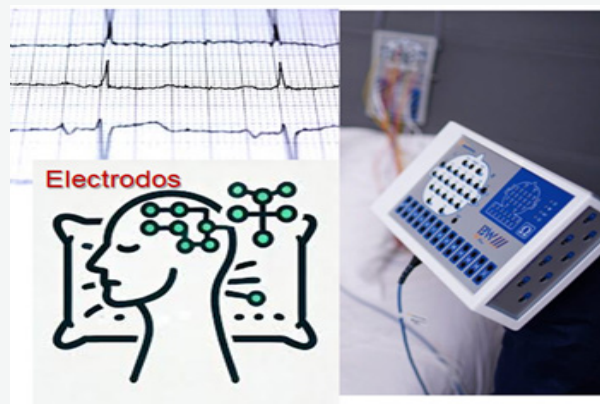


Figura 18.- Sistema electrofisiológico para la evaluación de trastornos del sueño

Conclusiones

En resumen, La electrofisiología es una disciplina que estudia las propiedades eléctricas de las células y los tejidos biológicos. En medicina, la electrofisiología se refiere al uso de diversas técnicas para medir la actividad eléctrica de las células del cuerpo, en particular las del corazón, el cerebro y el sistema nervioso. La electroquímica está estrechamente involucrada con la electrofisiología. La química electroanalítica es una tecnología poderosa en la detección y cuantificación de los neurotransmisores y sus metabolitos en forma muy limpia, selectiva y de alta sensibilidad, mediante las técnicas de potenciometría, voltametría cíclica, voltametría de pulso diferencial (con sus alternativas de redisolución anódica y catódica). En la Universidad de los Andes, se ha concretado un grupo interdisciplinario denominado Grupo de Salud y Electroquímica, el cual acopia investigadores de las Facultades de Ciencias, Medicina y Farmacia, con el apoyo del Hospital universitario (IAHULA) y CORPOSALUD – Mérida.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los doctores Antonio Rangel, Alexis Rosas y Carlos Marín, de la Facultad de Medicina por su gran apoyo en el área médica y por su gran entusiasmo en la interdisciplinaridad,

Referencias

- 1.- Mills, Kerry R. (ed.), Oxford Textbook of Clinical Neurophysiology, (Oxford, 2016; online Academic, 2016), <https://doi.org/10.1093/med/9780199688395.001.0001>.
- 2.- Seppala T., Scheinin, Capone A., Linnoila M. (1984) Liquid chromatographic assay for CSF catecholamines using electrochemical detection. *Acta pharmacol. et toxicol.* 55, 81-87.
- 3.- De Toledo R.A., Santos M.C., Cavalheiro E.T.G, Mazo L.H. (2005). Determination of dopamine in synthetic cerebros.
- 4.- Arvand M., Ghodsi N, (2014). Electrospun TiO₂ nanofiber/graphite oxide modified electrode for electrochemical detection of L-Dopa in human cerebrospinal fluid. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 204 3(1)393-401.
- 5.- Wiench P. González Z., Menéndez R, Grzyb B., Gryglewicz G. (2018). Beneficial impact of oxygen on the electrochemical performance of Dopamine sensors based on N-doped reduced graphene oxides. *Sensors and actuators B: Chemical*, 257, 143-153.
- 6.- Baytak A.K., Aslanogla M, (2020) A novel sensitive method for the simultaneous determination of ascorbic acid, dopamine, uric ácido and tryptophan using a voltammetric platform based on carbón black nanoballs. *Arabian Journal of Chemistry* 13 1702-1711.
- 7.- Price J. B., E. Rusheen A, B. Barath A. S., Rojas Cabrera J.M., Shin H., Chang S-Y, J. Kimble C. J., Bennet K. E., Blaha C. D., Lee K. H., Yoonbae Oh (2020) Clinical applications of neurochemical and electrophysiological measurements for closed-loop neurostimulation *Neurosurg Focus* 49 (1) E6,1-8.
- 8.- Senel M., Dervisevic E., Alhassen S., Dervisevic M., Alachkar A., Cadarso V.J., Voelcker N.H. (2020) Microfluidic electrochemical sensor for cerebrospinal fluid and blood Dopamine detection in a mouse model of Parkinson disease. *Anal. Chem.* 92(18) 12347-12355.

- 9.- Zhou, ZD, Yi, LX, Wang, DQ et al. Papel de la dopamina en la fisiopatología de la enfermedad de Parkinson. *Transl Neurodegener* 12 , 44 (2023). <https://doi.org/10.1186/s40035-023-00378-6>.
- 10.- Hatami-Fard, G., & Anastasova-Ivanova, S. (2024) Advancements in cerebrospinal fluid biosensors; bridging the gap from early diagnosis of the detection of rare diseases. *Sensors* 24(11),3294-3390.
- 11.- Chena S., Li Liua T , Jiaa Y , Jinghua Li (2025) Recent advances in bio-integrated electrochemical sensors for neuroengineering, *Fundamental Research*, 5(1) 29-47.
- 12.- Achache M., García-Guzmán J.J., Seddik N.B., Cubillán-Aguilera L., Palacios-Santander J.M, Bouchta D., Choukairi M. (2025) A novel sonogel-Leucine Electrochemical sensor for the detection of neuroblastoma biomarker in human urine and synthetic cerebrospinal fluid. *Talanta*, 286, 1274.
- 13.- Yafeng Liu, Xiaohui Liu, Xuemei Wang, Hui Jian (2025) AI-Empowered Electrochemical Sensors for Biomedical Applications: Technological Advances and Future Challenges *Biosensors* 2025, 15, 487 (1-33).
- 14.- Tozzi A. (2025). Charged Interfaces in the Brain: How Electrostatic Forces May Guide Cerebrospinal Fluid Dynamics. *European Journal of Neuroscience*. 61(9),e 70145.
- 15.- Strimbu K, Tavel JA (2010). What are biomarkers? *Curr Opin HIV AIDS* 5: 463- 466.
- 16.- Aliena, N. G. (2023). REPARACION DEL ADN: EL FIEL ENTRE LA VIDA Y EL OCASO CELULAR. In *BioqHo* 2023.
- 17.- Romero, L. F. S. (2026). Evaluación de la regulación epigenética en células de cáncer de mama sobrevivientes a terapia fotodinámica (Doctoral dissertation, INSTITUTO NACIONAL DE ASTROFÍSICA, ÓPTICA Y ELECTRÓNICA).
- 18.- Thangavelu R.M, Duraisam N. (2024). Critical Review on Carbon Nanomaterial Based Electrochemical Sensing of Dopamine the Vital Neurotransmitter. *Qeios* <https://doi.org/10.32388/42DHBV.2>, (1-17).
- 19.- Ardakani Z.T., Hosu O., Cristea C., Ardakani M.M., Marrazza G. (2019) Latest in Electrochemical Sensors for Neurotransmitters: A Review. *Sensors* 2019 19(9)2037 <https://doi.org/10.3390/s19092037>.
- 20.- Kujawska M., Bhardwaj S.K, Mishra Y.K., Kaushik A. (2021) Uso de biosensores basados en grafeno para la detección de dopamina y un diagnóstico eficaz de la enfermedad de Parkinson. *Biosensores (Basilea)*31 de octubre de 2021;11(11):433. doi:10.3390/bios11110433.
- 21.- Bravo DAG, Libreros AM, Sánchez MJS (2026) Desempeño muscular periférico en cuidado intensivo adulto: revisión literaria. Archivo PDF: 599.97 Kb Páginas: 62-70 <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=123042>.
- 22.- Delgado, T. (2026). Comunicaciones LXI Reunión Anual de la SENFC Granada, 29 a 31 de octubre de 2025. *Rev. Neurol*, 81(4), 50865.
- 23.- Abreo-Ariza, A., Méndez, J. M., Solà-Jürschik, R., & Gili-Grahit, S. (2026). Neuroplasticidad del nervio radial superficial, ¿es diferente del resto? A propósito de un caso clínico.

Dolor® Investigación, Clínica & Terapéutica, 41(1).

- 24.- Castán Gasquet, R., Pardo Sanz, M. P., Casas Lázaro, J., Estallo Bernadós, V., & Roman Cosculluela, N. (2026). Evaluación de la eficacia de férulas nocturnas y terapia ocupacional en síndrome del túnel carpiano. *Cadernos Brasileiros de Terapia Ocupacional*, 34, e4081.