

ANÁLISIS DE LOS MODELOS NEURONALES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE INTERFERENCIA DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS NO IONIZANTES EN LA TRANSMISIÓN SINÁPTICA NEURONAL

ANALYSIS OF NEURAL MODELS FOR THE DESIGN OF A SYSTEM FOR INTERFERING WITH NON-IONIZING ELECTROMAGNETIC WAVES IN NEURONAL SYNAPTIC TRANSMISSION

Cristina Vilardell Balasch

Universidad San Francisco Xavier

vilardell.cristina@usfx.bo

<https://orcid.org/0000-0002-3136-2130>

Recibido: 30 Abril 2025 / Revisado: 3 Agosto 2025 / Aceptado: 19 Agosto 2025 / Publicado: 23 Septiembre 2025

Resumen

La necesidad de comunicación de los seres humanos ha conllevado al uso masivo de tecnologías inalámbricas como redes celulares y WiFi, generando preocupaciones respecto a los efectos de las ondas electromagnéticas no ionizantes (OENI) en la salud humana. Esta investigación propone un modelo neuronal que permita simular la interferencia de estas ondas sobre el proceso de sinapsis neuronal, particularmente sobre el potencial de acción. Se realiza un estudio comparativo de diversos modelos neuronales utilizando análisis documental y el método Delphi. Como resultado, se determinó que el modelo de Hodgkin-Huxley es el más adecuado, al representar con precisión la respuesta bioeléctrica de la neurona frente a estímulos electromagnéticos.

Palabras clave: Tecnologías inalámbricas, radiación no ionizante, salud humana, sinapsis neuronal, modelos neuronales, método Delphi

Introducción

El crecimiento exponencial de las tecnologías inalámbricas ha impulsado investigaciones acerca de sus posibles efectos en el organismo humano. Diversos estudios han mostrado resultados contradictorios respecto a los efectos térmicos y no térmicos de la radiación emitida por dispositivos como celulares y routers WiFi. La comunidad científica y organismos internacionales como la OMS reconocen la necesidad de investigaciones profundas y modelado teórico que permitan entender los mecanismos de interacción entre la radiación y los sistemas biológicos, especialmente a nivel neuronal (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2022).

Metodología

Esta investigación utilizó una metodología mixta con predominancia cualitativa, dado que combina análisis documental y método Delphi, ambos de naturaleza cualitativa, complementados con análisis cuantitativo de datos para la validación y ponderación de resultados.

En la primera fase, se realizó un análisis documental de modelos neuronales relevantes Hodgkin-Huxley, FitzHugh-Nagumo y McCulloch & Pitts— a partir de fuentes primarias y revisiones académicas, evaluando criterios como estabilidad, representación eléctrica y formulación matemática. En la segunda fase, se aplicó el método Delphi con 10 expertos en neurociencia que cumplieran los siguientes criterios de inclusión:

- Grado académico mínimo de maestría en neurociencia, bioingeniería o áreas afines.
- Experiencia profesional mínima de 10 años en investigación o docencia universitaria sobre actividad neuronal.

- Disponibilidad para responder a dos rondas de cuestionarios en un plazo establecido y disposición para ajustar sus respuestas según la retroalimentación recibida.

El procedimiento incluyó dos rondas Delphi con un intervalo de 10 días entre cada una. En la primera ronda se presentó un cuestionario estructurado con preguntas cerradas (escala Likert de 1 a 5) y abiertas, solicitando la valoración de cada modelo neuronal para simular la interferencia de OENI en la transmisión sináptica. Se garantizó anonimato, iteración y retroalimentación controlada entre rondas, conforme a las directrices metodológicas descritas (Keeney et al., 2011; Hsu & Sandford, 2007).

El nivel de consenso se fijó en un $\geq 80\%$ de concordancia entre participantes (Diamond et al., 2014; Jünger et al., 2017). En caso de no alcanzar este umbral en la primera ronda, se devolvieron a los expertos resúmenes estadísticos y comentarios agregados para reconsideración en la segunda ronda.

Resultados

El análisis documental permitió establecer una matriz comparativa que identificó las ventajas del modelo de Hodgkin-Huxley como el más completo desde el punto de vista biofísico y analítico. Los resultados del Delphi confirmaron esta selección, destacando su capacidad para integrarse con modelos de radiación electromagnética.

A continuación, se presenta una tabla comparativa que resume las principales características evaluadas en los modelos neuronales analizados, destacando la ventaja del modelo de Hodgkin-Huxley para simular interferencias electromagnéticas.

Tabla 1. *Tabla comparativa características modelos neuronales*

Modelo	Tipo de Modelo	Representación eléctrica	Ecuaciones diferenciales	Adecuado para OENI
McCulloch & Pitts	Lógico	No	No	No
FitzHugh-Nagumo	Dinámico simplificado	Parcialmente	Sí	Parcialmente
Hodgkin-Huxley	Biofísico completo	Sí	Sí	Sí

Además, los resultados del método Delphi aplicado a diez expertos en neurociencia se muestran en la siguiente tabla. La puntuación de cada modelo fue de 1 a 5 según su adecuación para simular los efectos de las OENI.

Tabla 2. *Tabla resultados Delphi*

Modelo	Promedio de puntuación Delphi	Nivel de consenso	Comentarios relevantes
McCulloch & Pitts	1.8	Bajo	Modelo simplificado no representa dinámica biofísica.
FitzHugh-Nagumo	3.6	Medio	Aproximación válida pero limitada en precisión.
Hodgkin-Huxley	4.9	Alto	Altamente detallado y adaptable a simulaciones EM.

El análisis documental permitió establecer una matriz comparativa que identificó las ventajas del modelo de Hodgkin-Huxley como el más completo desde el punto de vista biofísico y analítico. Este modelo, formulado con ecuaciones diferenciales no lineales, describe los flujos iónicos a través de la membrana neuronal, permitiendo simular con precisión el potencial de acción (Hodgkin & Huxley, 1952). Se definieron parámetros relevantes para las OENI (frecuencia,

potencia, polarización) en relación con la membrana neuronal

Los resultados del Delphi confirmaron esta selección, destacando su capacidad para integrarse con modelos de radiación electromagnética y concluyendo que las frecuencias en el rango de microondas presentan mayor potencial de interacción por resonancia con los ritmos eléctricos neuronales (Foster & Repacholi, 2004).

Discusión

La elección del modelo de Hodgkin-Huxley responde a su base fisiológica demostrada, permitiendo representar el comportamiento eléctrico de la neurona frente a estímulos externos. Su adaptabilidad a circuitos eléctricos permite simular la interferencia de las OENI en ambientes computacionales.

La integración entre el modelo HH y una fuente de campo electromagnético como entrada en la membrana neuronal permite observar variaciones en la generación del potencial de acción, lo cual ha sido teóricamente predicho en otros estudios con modelos similares (Montoya et al., 2003; Gerstner et al., 2014).

Desde una perspectiva biofísica, el modelo HH ofrece una aproximación cuantitativa de las propiedades de conductancia iónica en membranas neuronales, lo que posibilita el acoplamiento con parámetros electromagnéticos como la frecuencia, intensidad y duración de las OENI. Esto proporciona una vía para explorar correlaciones entre exposición crónica y

variaciones en la excitabilidad neuronal, hipótesis que han sido sugeridas por estudios experimentales in vitro (López et al., 2014).

Además, diversos autores han resaltado que los efectos de las OENI pueden depender de la modulación de la señal y su proximidad a los ritmos cerebrales (Foster & Repacholi, 2004), lo que hace pertinente utilizar modelos con capacidad para capturar respuestas temporales complejas. En ese sentido, el modelo HH, con su base en ecuaciones diferenciales no lineales, resulta especialmente adecuado para simular la posible sincronización o interferencia con oscilaciones neuronales naturales.

Por otro lado, estudios como los de (Hardell et al., 2009) enfatizan la necesidad de considerar factores individuales y ambientales que podrían amplificar la susceptibilidad a la radiación, sugiriendo que el modelado computacional debe contemplar escenarios variados. Este artículo representa un primer paso en la formulación de modelos teóricos integrados que puedan apoyar estudios clínicos y epidemiológicos en curso.

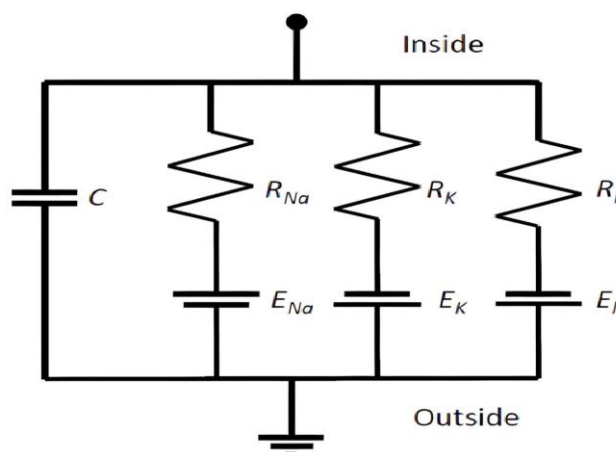


Figura 1. Representación esquemática del modelo de Hodgkin-Huxley y su equivalente eléctrico.

Adaptado de Hodgkin, A. L., & Huxley, A. F. (1952). A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *The Journal of Physiology*, 117(4), 500-544.

Conclusiones

El presente estudio identifica al modelo de Hodgkin-Huxley (HH) como la representación biofísica más adecuada para simular los efectos de las ondas electromagnéticas no ionizantes (OENI) en el proceso de transmisión sináptica neuronal. Su formulación detallada basada en ecuaciones diferenciales no lineales permite modelar con precisión los cambios dinámicos de los potenciales de acción bajo diferentes condiciones de exposición a campos electromagnéticos.

La selección del modelo HH se fundamenta en:

- Su capacidad para reproducir el comportamiento eléctrico real de la membrana neuronal,
- Su adaptabilidad a la integración de parámetros de campos electromagnéticos como frecuencia, potencia y polarización,
- Y su validación a través del método Delphi con alta concordancia entre expertos en neurociencia.

Se destaca que el modelo HH permite no solo simular la generación y propagación del potencial de acción bajo condiciones normales, sino también analizar cómo las OENI podrían alterar estos procesos mediante mecanismos como la modificación de los flujos iónicos y la alteración de la excitabilidad neuronal.

Como línea futura de trabajo, se recomienda:

- Implementar simulaciones computacionales avanzadas mediante plataformas especializadas como **NEURON** o **Genesis**, que permiten la incorporación de fuentes de campos electromagnéticos externas,

- Establecer protocolos experimentales que validen empíricamente los efectos modelados, a través de cultivos neuronales in vitro sometidos a distintas configuraciones de exposición a OENI,
- Explorar la influencia de diferentes parámetros de modulación de la señal, considerando la proximidad de las frecuencias de OENI a los ritmos neuronales endógenos.

Finalmente, el presente modelo ofrece un marco teórico sólido para posteriores investigaciones clínicas y epidemiológicas sobre el impacto neurológico de la exposición prolongada a tecnologías inalámbricas, contribuyendo al diseño de normativas de protección basadas en evidencia científica.

Agradecimientos

Agradezco la colaboración de los expertos participantes del método Delphi y a las instituciones universitarias que facilitaron la difusión del cuestionario.

Referencias Bibliográficas

Foster, K. R., & Repacholi, M. H. (2004). Biological effects of radiofrequency fields: Does modulation matter? *Radiation Research*, 162(2), 219-225.

FitzHugh, R. (1961). Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane. *Biophysical Journal*, 1(6), 445-466. [https://doi.org/10.1016/s0006-3495\(61\)86902-6](https://doi.org/10.1016/s0006-3495(61)86902-6)

Gerstner, W., Kistler, W. M., Naud, R., & Paninski, L. (2014). *Neuronal Dynamics: From Single Neurons to Networks and Models of Cognition*. Cambridge University Press.

Hardell, L., Carlberg, M., & Hansson Mild, K. (2009). Epidemiological evidence for an association between use of wireless phones and tumor diseases. *Pathophysiology*, 16(2-3), 113-122.

Hodgkin, A. L., & Huxley, A. F. (1952). A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *The Journal of Physiology*, 117(4), 500–544.

López, E. P., Saldías, D. P., & Hernández, M. A. (2014). Efectos neurológicos por teléfonos celulares: revisión bibliográfica y modelos matemáticos. *Interciencia*, 39(12), 843-849.

McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4), 115-133.
<https://doi.org/10.1007/BF02478259>

Montoya, C. B., Calvet, H. C., & Ledesma, A. C. (2003). Análisis y Simulación con INTEGRA del Modelo de FitzHugh-Nagumo para una Neurona. *Aportaciones Matemáticas*, (32), 31-49.

Nagumo, J., Arimoto, S., & Yoshizawa, S. (1962). An active pulse transmission line simulating nerve axon. *Proceedings of the IRE*, 50(10), 2061-2070.
<https://doi.org/10.1109/JRPROC.1962.288235>

Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2022). *Campos electromagnéticos y salud pública: teléfonos móviles*. Recuperado de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/electromagnetic-fields-and-public-health-mobile-phones>

Zavala, R. R. (2013). Posibles efectos provenientes del uso excesivo de la comunicación inalámbrica. *Revista Iberoamericana de las Ciencias de la Salud*, 2(4), 25-57.