

# ONDAS VIAJERAS EN TU CEREBRO

ELÍAS MANJARREZ

*Tu rostro ya no es el mismo porque siempre viaja en el tiempo y el espacio, pálpalo, y siente cómo se transforma.*

La intuición nos enseña que todo cambia con el tiempo y en el espacio. Sin embargo, no siempre comprendemos que muchos de esos cambios se deben a procesos ondulatorios, ni valoramos lo suficiente la importancia de las ondas que se desplazan de un punto a otro en la materia no viva, o en la materia viva. Aquí te explicaré que en nuestro cerebro existen ondas viajeras que permiten la comunicación entre regiones anatómicas distantes, tanto durante el sueño como en la vigilia.

La física y la química nos han mostrado que la materia exhibe vibraciones propagantes. La luz, por ejemplo, está compuesta por ondas electromagnéticas viajeras, mientras que el sonido se transmite mediante ondas mecánicas. Por su parte, la biología nos enseña que los seres vivos han desarrollado sensores celulares especializados, como la vista y el oído, para detectar esas ondas. Pero, ¿qué sensores se emplean para detectar las ondas viajeras cerebrales?

La respuesta es que las ondas viajeras cerebrales se pueden detectar con un dispositivo amplificador que registra la actividad eléctrica mediante pequeños sensores metálicos llamados *electrodos*, que se colocan sobre el cuero cabelludo con respecto a un electrodo de referencia que se posiciona en la piel de las orejas.

A este dispositivo se le conoce como amplificador de electroencefalografía (EEG). Los sensores metálicos del amplificador de EEG, al estar en contacto con un gel conductor, captan las señales eléctricas de miles de millones de neuronas. Desde que Hans Berger introdujo el dispositivo de EEG para uso clínico en la década de 1920 [1], sabemos que el cerebro genera patrones eléctricos rítmicos conocidos como oscilaciones.

Aunque el interés por las ondas cerebrales es antiguo, solo con el desarrollo del EEG de alta densidad fue posible observar que muchas de estas oscilaciones no son estáticas. En realidad, se propagan a través de la corteza como si fueran ondas viajeras. Registros más recientes, como la electrocorticografía (ECoG), donde los electrodos se colocan directamente sobre el cerebro durante cirugías, y los registros intracerebrales, han permitido estudiar estos fenómenos con mayor precisión.

Así, casi doscientos años después, la neurociencia nos está mostrando de manera más precisa cómo algunas de estas oscilaciones se desplazan en el espacio cortical como si fueran ondas viajeras, revelando una nueva forma de comunicación entre regiones anatómicas.

Uno de los hallazgos más llamativos fue reportado por Massimini y colaboradores (2004) [2], quienes observaron que durante el sueño profundo las oscilaciones lentas del cerebro se propagan desde la zona frontal hacia la parte posterior de la cabeza. Esto sugiere que el sueño no es una desconexión, sino una forma organizada de actividad cerebral que puede influir en la plasticidad sináptica.

Es metafórico comparar el ritmo del sueño profundo con el oleaje del mar. Mientras una ola marina aparece cada siete segundos, el cerebro dormido produce una onda cada segundo o incluso más lento, en un ritmo inferior a 1 Hz.

En 2017, Kurth y su equipo [3] replicaron los hallazgos de Massimini y colaboradores en niños de distintas edades. Encontraron que las ondas cerebrales viajeras durante el sueño recorren distancias más cortas en los más pequeños, lo que sugiere que este fenómeno está vinculado al desarrollo de la mielina, una sustancia esencial para la transmisión rápida de señales neuronales. De manera metafórica podríamos decir que el cerebro de los niños más pequeños durante el sueño se

*Uno de los hallazgos más llamativos fue reportado por Massimini y colaboradores (2004) [2], quienes observaron que durante el sueño profundo las oscilaciones lentas del cerebro se propagan desde la zona frontal hacia la parte posterior de la cabeza. Esto sugiere que el sueño no es una desconexión, sino una forma organizada de actividad cerebral que puede influir en la plasticidad sináptica.*

comporta como una bahía pequeña en que las olas son más cortas, y el de los adultos a una playa de mar abierto en que las olas son más amplias.

Estudios más recientes en adultos despiertos, como los de Zhang et al. (2018) [4] y Mohan et al. (2024) [5], han mostrado que las ondas en frecuencias theta y alfa también se propagan por la corteza. Su dirección cambia según la tarea cognitiva que se esté realizando. Cuando aprendemos, viajan de atrás hacia adelante, y cuando recordamos, lo hacen en sentido contrario. Esto indica que las ondas viajeras ayudan a coordinar la actividad cerebral de forma dinámica.

Algo importante es que el estudio de las ondas cerebrales viajeras es prometedor en la clínica médica, ya que podrían usarse como biomarcadores del grado de afectación neurológica. Por ejemplo, Sihn y Kim (2024) [6] encontraron que las personas con esquizofrenia exhiben ondas alfa viajeras que no siguen su trayectoria habitual, lo que puede estar relacionado con la desconexión funcional que caracteriza al trastorno.

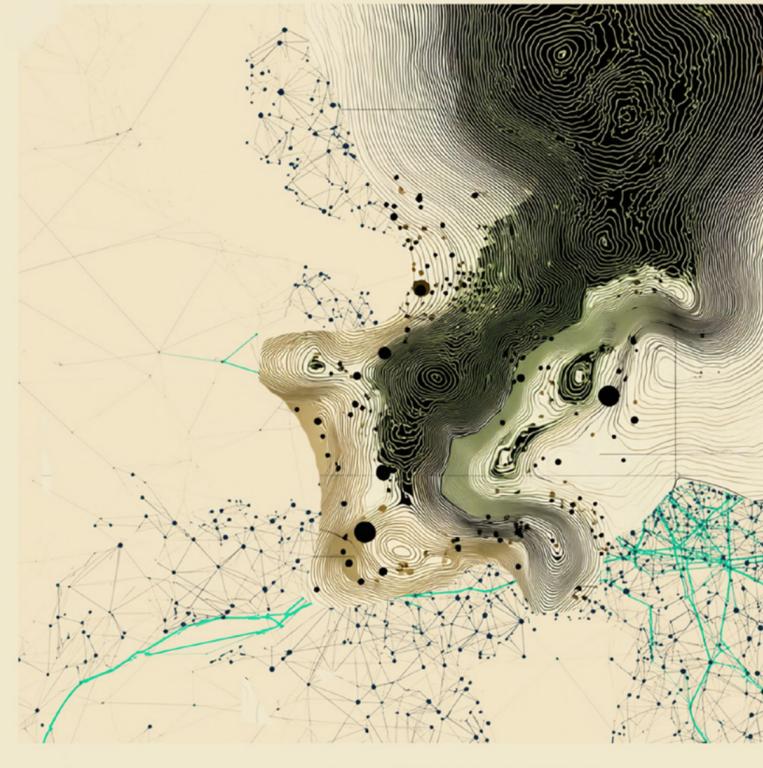
Del mismo modo, Guo y colegas en el 2025 [7] propusieron que, en personas jóvenes con depresión, las ondas

viajeras alfa en el hemisferio izquierdo inducidas por estímulos visuales intermitentes de 10 estímulos fóticos por segundo (10 Hz) podrían predecir si responderán o no a un tratamiento. Estos hallazgos abren la puerta a una medicina más personalizada y preventiva.

Los estudios recientes en animales permiten verificar que la propagación de ondas cerebrales en humanos no es un fenómeno secundario y tienen un papel funcional. En 2023, Zabeh y su equipo [8] mostraron que los monos exhiben ondas beta que viajan entre áreas del cerebro relacionadas con la toma de decisiones. Lo más interesante fue que estas ondas eran más evidentes después de una recompensa, y que su propagación parecía influir en las decisiones del animal en la siguiente tarea.

Esta investigación es muy reveladora. En el experimento, los monos debían mirar un punto en una pantalla y luego hacer un movimiento rápido de los ojos hacia un nuevo punto que aparecía inesperadamente en la misma pantalla para obtener jugo como recompensa. A este movimiento rápido de los ojos se le llama movimiento sacádico.

*Los estudios recientes en animales permiten verificar que la propagación de ondas cerebrales en humanos no es un fenómeno secundario y tienen un papel funcional. En 2023, Zabeh y su equipo [8] mostraron que los monos exhiben ondas beta que viajan entre áreas del cerebro relacionadas con la toma de decisiones. Lo más interesante fue que estas ondas eran más evidentes después de una recompensa, y que su propagación parecía influir en las decisiones del animal en la siguiente tarea.*



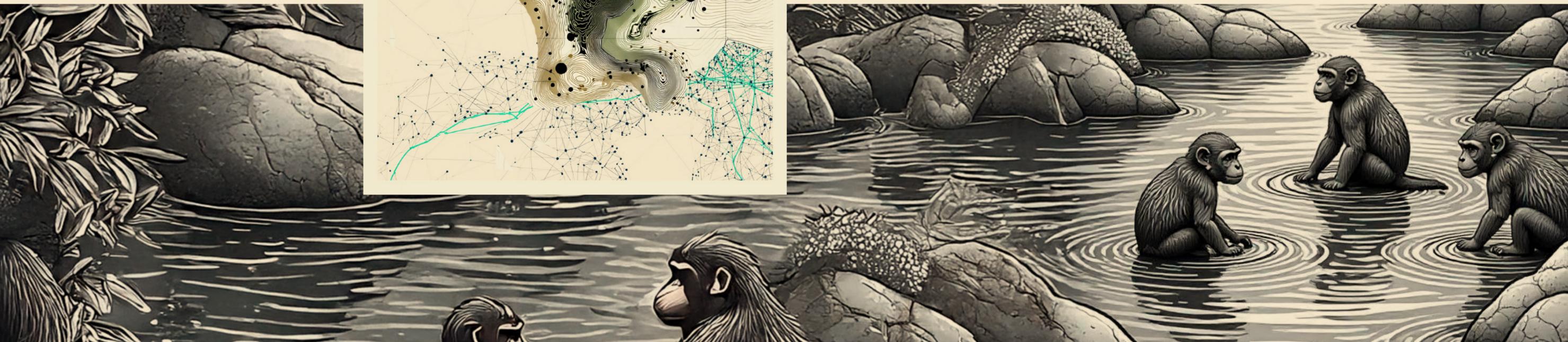
Como resultado, el mono recibía o no una recompensa, de forma probabilística (por ejemplo, un 70 % de posibilidad de obtener jugo si miraba correctamente el nuevo punto emergente). ¿Por qué esto es interesante? Aunque la recompensa era aleatoria, los monos cambiaban su comportamiento dependiendo de si habían recibido jugo en la prueba anterior. Por ejemplo, si habían sido premiados, era más probable que respondieran con mayor rapidez o precisión en la siguiente sacada. Si no habían recibido jugo, podían dudar o reaccionar de forma distinta, como si recordaran que no funcionó antes.

Lo interesante es que las ondas viajeras aumentaban durante estos cambios de comportamiento asociados a la recompensa, sobre todo en la zona frontal. Esto sugiere que el cerebro estaba procesando el historial de recompensas para influir en la siguiente decisión.

De forma similar, Liang y colegas, también en el 2023 [9], demostraron que en monos que realizaban tareas motrices, la dirección de propagación de las ondas en la corteza motora se relacionaba con la dirección del movimiento que iban a ejecutar. Es decir, las ondas viajeras portan información conductual precisa.

Otros trabajos recientes han mostrado que los modelos computacionales aportan una base para entender cómo se producen y se mantienen las ondas viajeras en el cerebro, además de servir para diseñar nuevas tecnologías de estimulación cerebral más precisas.

En el 2024, Koller y su equipo [10] propusieron que las ondas viajan siguiendo patrones dictados por la conectividad estructural del cerebro (el conectoma), como las redes de fibras de sustancia blanca. De manera análoga, en este 2025, Butler y Cruz [11] simulaban redes de neuronas con plasticidad sináptica y observaron que las ondas viajeras pueden formar rutas preferidas en la red, reforzando conexiones a lo largo de su trayectoria. Esto sugiere que las ondas viajeras cerebrales podrían tener un papel activo en el aprendizaje en el humano.



Cabe destacar que casi todos estos trabajos emplean una medida basada en el cambio de fase entre señales propagantes; es decir, analizan la diferencia temporal entre la aparición de una señal eléctrica en diferentes electrodos, ordenándola en el tiempo para inferir su propagación. Sin embargo, en nuestro laboratorio propusimos una alternativa para medir estas ondas con un método basado en el cálculo del centro de masa [12].

En ese trabajo [12] desarrollamos un algoritmo innovador que calcula el centro de masa de las ondas viajeras en el cerebro humano. Usando registros de EEG con 30 electrodos, este método permitió estimar no solo la dirección y trayectoria completa de cada onda viajera, sino también su velocidad instantánea, algo que no ofrecen los métodos tradicionales.

En lugar de asumir una propagación uniforme, el algoritmo reconstruye cómo las ondas realmente se desplazan por la corteza, desde su punto de inicio hasta su destino, identificando trayectorias como frontal-occipital, occipital-frontal o lateral-lateral, entre otras trayectorias. Aunque esta herramienta aún no se ha difundido de forma amplia, puede complementar los enfoques actuales y aportar una perspectiva más detallada sobre el dinamismo cerebral. Ahora mismo estamos trabajando sobre este tema en el laboratorio.

Así, las ondas viajeras no son una curiosidad eléctrica, sino una forma de comunicación cerebral que influye en funciones clave como la memoria, el sueño, el movimiento y la emoción de una recompensa. Además, representan un campo emergente con potenciales aplicaciones médicas.

Para finalizar, me gustaría reflexionar que mientras todo cambia en el tiempo y el espacio las ondas viajeras crean rutas en la materia cerebral, y la despiertan, para mantener un diálogo entre regiones anatómicas, ya sea durante el silencio del sueño o en el bullicio del pensamiento despierto, desplegando en cada cerebro un interior de agitadas olas eléctricas con caminos preestablecidos.

Por eso, así como tu rostro, también tu cerebro ya no es el mismo cada instante. Porque allá adentro hay un mar inquieto, propagante. Pálpalo con el oxígeno de tu respiración profunda, y siente cómo se transforma.



#### ELÍAS MANJARREZ

Profesor investigador titular, responsable del laboratorio de Neurofisiología Integrativa del Instituto de Fisiología, BUAP. Es físico de formación, con maestría en fisiología y doctorado en neurociencias. Obtuvo su doctorado en el departamento de Fisiología, Biofísica y Neurociencias del Cinvestav.

Sus líneas de investigación están enfocadas a entender propiedades emergentes de ensamblajes neuronales en animales y humanos. Es pionero en el estudio de la resonancia estocástica interna en el cerebro, la propagación de ondas en ensamblajes neuronales espinales, la hemodinámica funcional de las emociones, así como de los mecanismos neuronales de la estimulación eléctrica transcranial. Recibió el Premio Estatal de Ciencia y Tecnología del CONCYTEP y ha recibido el premio Cátedra Marcos Moshinsky. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 3.



#### REFERENCIAS:

- [1] Berger H. "Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. 1st report". *Arch Psychiat Nervenkr.* 1929;87:527-570.
- [2] Massimini M, Huber R, Ferrarelli F, Hill S, Tononi G. "The sleep slow oscillation as a traveling wave". *J Neurosci.* 2004;24(31):6862-6870. doi:10.1523/JNEUROSCI.1318-04.2004
- [3] Kurth S, Riedner BA, Dean DC, et al. "Traveling Slow Oscillations During Sleep: A Marker of Brain Connectivity in Childhood". *Sleep.* 2017;40(9):zsx121. doi:10.1093/sleep/zsx121
- [4] Zhang H, Watrous AJ, Patel A, Jacobs J. "Theta and Alpha Oscillations Are Traveling Waves in the Human Neocortex". *Neuron.* 2018;98(6):1269-1281.e4. doi:10.1016/j.neuron.2018.05.019
- [5] Mohan UR, Zhang H, Ermentrout B, Jacobs J. "The direction of theta and alpha travelling waves modulates human memory processing". *Nat Hum Behav.* 2024;8(6):1124-1135. doi:10.1038/s41562-024-01838-3
- [6] Sihh D, Kim SP. "Disruption of alpha oscillation propagation in patients with schizophrenia". *Clin Neurophysiol.* 2024;162:262-270. doi:10.1016/j.clinph.2024.02.028
- [7] Guo X, Zhang H, Zeng B, et al. "Electroencephalography Alpha Traveling Waves as Early Predictors of Treatment Response in Major Depressive Episodes: Insights from Intermittent Photoc Stimulation". *Biomedicines.* 2025;13(4):1001. Published 2025 Apr 21. doi:10.3390/biomedicines13041001
- [8] Zabej E, Foley NC, Jacobs J, Gottlieb JP. "Beta traveling waves in monkey frontal and parietal areas encode recent reward history". *Nat Commun.* 2023;14(1):5428. Published 2023 Sep 5. doi:10.1038/s41467-023-41125-9
- [9] Liang W, Balasubramanian K, Papadourakis V, Hatsopoulos NG. "Propagating spatiotemporal activity patterns across macaque motor cortex carry kinematic information". *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2023;120(4):e2212227120. doi:10.1073/pnas.2212227120
- [10] Koller DP, Schirner M, Ritter P. "Human connectome topology directs cortical traveling waves and shapes frequency gradients". *Nat Commun.* 2024;15(1):3570. Published 2024 Apr 26. doi:10.1038/s41467-024-47860-x
- [11] Butler K, Cruz L. "Neuronal traveling waves form preferred pathways using synaptic plasticity". *J Comput Neurosci.* 2025;53(1):181-198. doi:10.1007/s10827-024-00890-2
- [12] Manjarrez E, Vázquez M, Flores A. "Computing the center of mass for traveling alpha waves in the human brain". *Brain Res.* 2007;1145:239-247. doi:10.1016/j.brainres.2007.01.114