

Capítulo 9. El Aprendizaje de Habilidades Quirúrgicas por imitación de los movimientos realizados por un Médico Cirujano influyen en la actividad eléctrica cerebral de Estudiantes de Medicina

Leopoldo Eduardo Flores Mancilla
Pedro Martínez Arteaga
Noemi Gaytán Pacheco
Alejandro Ibáñez Salazar

Universidad Autónoma de Zacatecas

DOI: [10.46990/iQuatro.2025.04.16.9](https://doi.org/10.46990/iQuatro.2025.04.16.9)

Resumen

La enseñanza por un cirujano frecuentemente es substituida por medios digitales, o instructivos, se conoce poco de la actividad cerebral de alumnos de cirugía bajo ambos métodos de enseñanza. **Objetivo.-** Evaluar en estudiantes de medicina mediante electroencefalografía el aprendizaje de una sutura por imitación de movimientos de un médico cirujano y compararlo con el realizado por instrucciones de un manual, dos grupos fueron comparados, el Grupo Instructor (GI) asesorado por un cirujano y Grupo Manual (GM) enseñado mediante manual de suturas, se encontró que el grupo GI registró un mayor voltaje del EEG en los ritmos Theta y Beta del EEG al comparar con el grupo GM ($p < 0.05$). La enseñanza personalizada en cirugía, influye activando más los ritmos Theta y Beta.

Palabras clave

Cirugía aprendizaje, habilidades motoras, electroencefalograma, cerebro, neuronas en espejo

Introducción

El aprendizaje mediante observación ocurre al captar el estímulo visual de otras personas cuando realizan acciones (Van Gog et al., 2009; Vogts et al., 2013). Al observar a un cirujano experto, los estudiantes pueden adquirir información a través de diferentes sistemas sensoriales, desarrollar habilidades avanzadas como el juicio y la conciencia situacional, perfeccionar habilidades en los movimientos de las manos. Este tipo de aprendizaje fomenta el desarrollo de mecanismos de control de movimientos (Mulder, 2007).

La investigación en primates ha mostrado que, en el cerebro, particularmente en regiones de la corteza motora, un sistema complejo de neuronas en espejo puede modular la destreza manual mediante la observación (Acharya & Shukla, 2012; Ariani et al., 2022; Cook et al., 2014). El sistema permite la representación de actividades observadas en el cerebro sin necesidad de práctica física, ello facilita la réplica de movimientos y la comprensión del propósito motor. Al respecto, se ha mostrado que la observación de errores puede ser tan beneficioso como observar el desempeño experto ((Kilner & Lemon, 2013). Asimismo, otro estudio destaca la importancia del aprendizaje por observación al conservar la calma bajo presión y desarrollar resiliencia a largo de un proceso quirúrgico. (Mueller et al., 2022). Combinar la observación de expertos y de sus errores, puede ser una estrategia efectiva, optimizando el aprendizaje de forma práctica y económica. (Han et al., 2022).

El control motor es crucial al permitir a los individuos replicar o imitar movimientos observados, comprender intenciones y corregir errores, facilita la adquisición de habilidades técnicas complejas. La neuroplasticidad, como base del aprendizaje motor, constituye un proceso clave para el desarrollo de la pericia en áreas como la cirugía (Eaves et al., 2024).

Las neuronas espejo (NE), descubiertas en 1992, representan un hallazgo crucial en la neurociencia cognitiva. Identificadas inicialmente en primates, estas células neuronales se activan tanto durante la ejecución como en la observación de acciones con movimiento, establecen un vínculo fundamental entre la percepción y la acción (Rizzolatti & Sinigaglia, 2010; Bonini et al., 2022). Este mecanismo permite interpretar y predecir comportamientos, y refuerza la conexión entre la observación y la acción ejecutada (Acharya & Shukla, 2012).

Dado el impacto de las NE durante el aprendizaje motor, su integración en estrategias educativas ha inspirado avances significativos. En métodos como la observación guiada y las simulaciones prácticas, han optimizado el aprendizaje al combinar visualización, imaginación y práctica física (Rao et al., 2023). Poco se ha explorado de la actividad eléctrica emanada de regiones cerebrales en movimiento y particularmente durante maniobras quirúrgicas. El presente estudio propone evaluar el aprendizaje motor a través de la actividad cerebral en

estudiantes de medicina inexpertos durante la percepción de movimientos observados en un cirujano durante procedimientos para la realización de suturas. Se compararán dos enfoques pedagógicos: una instrucción presencial impartida por el cirujano y una capacitación basada en la lectura de un manual. El estudio busca el aportar evidencia sobre el comportamiento de señales eléctricas neuronales de regiones cerebrales motoras activadas bajo métodos enseñanza de habilidades en cirugía.

Revisión de la Literatura

Las neuronas espejo (NE) fueron descubiertas en 1992, identificadas inicialmente en primates como células neuronales que se activaban tanto al observar cómo al ejecutar acciones. Estas neuronas desempeñan un papel fundamental en la conexión entre la percepción y la acción, además de vincularse con procesos sociales y emocionales (Acharya & Shukla, 2012; Bonini et al., 2022). En humanos y otras especies, las NE están distribuidas en múltiples áreas cerebrales, contribuyendo a la comprensión de intenciones y estados emocionales, son esenciales para la cognición social y la interacción adaptativa (Rizzolatti & Sinigaglia, 2010). El mecanismo de las NE subyace en integrar acciones, emociones y estímulos sociales, siendo clave para interpretar y predecir comportamientos. Su activación conecta áreas relacionadas con el movimiento (corteza premotora), percepción sensorial (lóbulos parietales) y emociones (amígdala y corteza prefrontal), y genera representación interna de la acción observada fortaleciendo la empatía y el aprendizaje social, asimismo, el aprendizaje motor depende de la neuroplasticidad, entendida como la capacidad del cerebro para adaptarse mediante cambios en la activación cortical del cerebro (Acharya & Shukla, 2012; Buccino, 2014).

En habilidades complejas como la cirugía, los médicos expertos presentan redes neuronales más eficientes, mientras que los principiantes muestran mayor activación en el córtex prefrontal, reflejando un proceso de aprendizaje inicial (Eaves et al., 2024). Al respecto, se ha propuesto que el aprendizaje por observación permite generar esquemas mentales a partir de la observación de expertos, combinando procesos de imaginación motora y retroalimentación visual, este método de aprendizaje se apoya en la activación de NE para replicar movimientos observados, comprender intenciones y corregir errores, contribuyendo a la adquisición de habilidades técnicas (Vogt et al., 2013), por lo tanto, la observación de errores activa mecanismos de detección y corrección, mejorando la precisión y adaptabilidad del aprendiz (Errante et al., 2023).

La combinación sincrónica de observación de acciones e imaginación motora, maximizan el aprendizaje motor al integrar representaciones visuales externas con simulaciones internas (Alegre et al., 2010; Eaves et al., 2024). Este enfoque se utiliza eficazmente en contextos de cirugía, rehabilitación tras accidentes cerebrovasculares y enseñanza de habilidades técnicas (Rao et al., 2023).

Bajo esta perspectiva, el involucramiento de las NE ha motivado enfoques innovadores en neurorehabilitación, como el uso de observación de acciones para tratar condiciones neurológicas, incluyendo Parkinson y accidentes cerebrovasculares (Alegre et al., 2010; Buccino, 2014). Además, es posible que en la educación quirúrgica la activación de regiones cerebrales en las que se activan NE, puedan desarrollar habilidades técnicas mediante simulaciones guiadas, optimizando el aprendizaje y reduciendo el riesgo asociado a prácticas en vivo (Eaves et al., 2024; Leff et al., 2008; Rao et al., 2023).

Es por ello la necesidad de explorar cómo se comporta el cerebro de un estudiante novel en cirugía particularmente en regiones cerebrales implicadas en la activación de neuronas cuya actividad eléctrica se ha asociado al movimiento por imitación como es el área Frontal, el electroencefalograma (EEG) es una técnica no invasiva que ofrece la ventaja de alta resolución temporal, es decir, registra la actividad neuronal en el momento de pensamientos, movimientos y aprendizaje, proporciona cuantitativamente el voltaje generado de aproximadamente 100 mil neuronas en 1 mm² de la corteza motora, la actividad eléctrica cerebral o electroencefalograma clásico, se lleva a cabo mediante distintos ritmos de descargas neuronales que tienen como componentes ciclos (ondas) de movimientos de electrones con baja frecuencia (2-5 Hz) y alto voltaje o también llamado ritmo delta, el cual se manifiesta en nuestro cerebro (en mayor porcentaje del EEG) durante las etapas de sueño ligero y sueño profundo denominado de movimientos oculares rápidos (sueño MOR) (Pérez et al., 2024). Otro ritmo cerebral es el ritmo theta de frecuencia media (5-8 Hz) de suma importancia, ya que aparece en nuestro cerebro en regiones específicas como la corteza motora durante las etapas de movimientos voluntarios e involuntarios y además en funciones cognitivas como el aprendizaje y la memoria (Ashraf R., et al., 2023), otro ritmo es el ritmo Alfa de frecuencias medias (8-12 Hz) que aparece en mayor proporción en el cerebro al bloquear estímulos sensoriales como la visión, la audición, este ritmo cerebral es característico de un proceso de meditación, y el ritmo Beta considerado un ritmo de ondas y frecuencias rápidas (13-30 Hz) aparece en nuestro cerebro durante la vigilia y en situaciones de estar alerta o con stress (Fiebelkorn IC & Kastner S., 2019). Poco se conoce de la actividad cerebral durante la enseñanza de habilidades quirúrgicas mediadas en forma personalizada, al respecto se han utilizado técnicas como la Topografía Óptica (técnica que utiliza espectroscopia infrarroja para evaluar

cambios hemodinámicos en la activación neuronal de la corteza motora) mediante ésta técnica, se reportó mayor activación de la corteza prefrontal en aprendices de cirugía y no en los profesores expertos que solamente observaban (Left et al.,2007), sin embargo al igual que otra técnica como la tomografía por emisión de positrones, o la Resonancia Magnética, son técnicas que proporcionan buena resolución espacial, sin embargo durante el registro, la actividad neuronal pudo haber ocurrido debido a que la detección por metabolismo neuronal no es tan rápida en tiempo, en contraste en el registro del EEG la actividad eléctrica de neuronas cerebrales se captura en el instante que se están activando los potenciales eléctricos por lo que debido a su alta resolución temporal es utilizada en la actualidad.

Por lo tanto es importante conocer la participación neuronal en regiones cerebrales en las que se asientan NE mediante un registro de EEG y que se identifican con la actividad motora de imitación, en particular en los movimientos desplegados durante una maniobra quirúrgica por estudiantes de cirugía durante la enseñanza de un cirujano.

Objetivo

El objetivo del presente trabajo fue evaluar en estudiantes de medicina, el efecto en el aprendizaje de una maniobra quirúrgica mediado por imitación de movimientos de un médico cirujano durante una sutura y compararlo con el realizado por instrucciones de un manual, ambos sobre la cuantificación de voltaje en los ritmos del electroencefalograma clásico.

Metodología

Hipótesis

La hipótesis de trabajo que se planteó fue que en estudiantes de medicina, el aprendizaje durante la ejecución de una maniobra quirúrgica por imitación de movimientos de un cirujano se asocia a un voltaje mayor en el ritmo theta del electroencefalograma en comparación con el voltaje registrado durante el aprendizaje mediado por un manual.

Participantes: 10 estudiantes de Medicina fueron seleccionados mediante los siguientes criterios de inclusión: masculinos, nivel de estudios tercer semestre de la carrera de Médico General, sin experiencia previa en maniobras quirúrgicas, diestros, sin alteraciones motoras o sensoriales

Se integraron dos grupos experimentales:

El grupo Instructor (INSTRUCTOR) recibió la instrucción de la técnica de sutura Sarnoff a través de un médico cirujano.

El grupo Manual (MANUAL) que recibió la instrucción de la técnica de Sarnoff a través del manual TÉCNICAS DE SUTURA QUIRÚRGICA PARA ESTUDIANTES DE MEDICINA (Dr. Byron Efrén Serrano Ortega EDILOJA Cía. Ltda)

Previamente a cada participante se le colocaron electrodos bilaterales en el hemisferio derecho (HD) y el hemisferio izquierdo (HI) sobre la superficie del cuero cabelludo en las derivaciones F3 y F4 de acuerdo al sistema internacional 10-20, el registro del EEG se llevó a cabo en las siguientes condiciones:

Condición Basal. - Se realizaron tres registros del EEG de cada participante de pie ante la mesa de cirugía, tranquilo sin movimientos hiperactivos de los miembros superiores. (12 minutos)

Condición Explicación. - Se realizaron tres registros del EEG cuando el grupo INSTRUCTOR recibió la información del médico cirujano (12 minutos), y por separado el Grupo MANUAL recibió la información a través de la lectura del manual (12 minutos)

Condición. - Realización de la Sutura Quirúrgica. Se llevaron a cabo tres Registros del EEG cuando los grupos INSTRUCTOR Y MANUAL realizaban la sutura de Sarnoff sobre un dispositivo de placas de poliestireno (10x20cm), mediante el porta-agujas Ergom Med utilizando una sutura de nylon 000 (Ethicon, Johnson & Johnson) (10-15 minutos).

Condición Posterior a la Sutura quirúrgica. - Se llevaron a cabo tres Registros del EEG cuando los grupos INSTRUCTOR Y MANUAL habían finalizado la sutura de Sarnoff. (5 minutos).

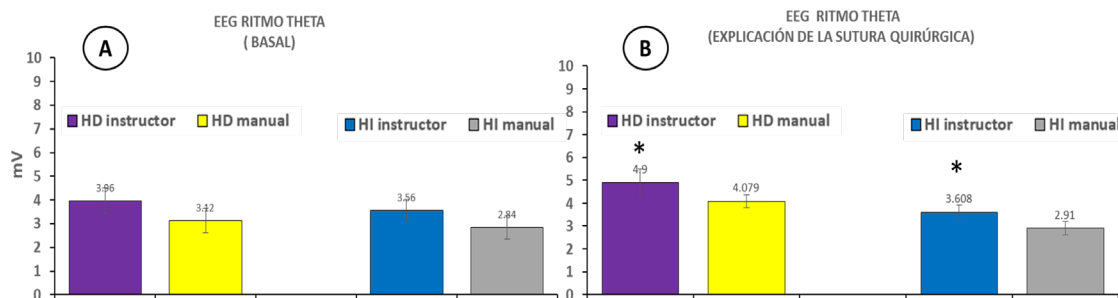
Las señales fueron adquiridas y almacenadas mediante el sistema BIOPAC System MP150 (®USA). Los datos cuantitativos de las señales eléctricas cerebrales fueron analizados estadísticamente mediante el programa ESTADIS, los resultados se describen en el voltaje promedio $\pm$ el error estándar en los ritmos Delta, Theta, Alfa y Beta.

Resultados

Los resultados en el registro del EEG para los ritmos Delta y Alfa, no indicaron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos durante la condición Basal, tanto para el HD, $F(1,8) 0.26$ $p= 0.6242$) como el HI, $F(1,8) 0.47$ $p= 0.5113$) (Figura 9.1 A). Sin embargo, durante la explicación de la sutura, el análisis indicó que el ritmo theta en el grupo INSTRUCTOR registro significativamente un voltaje mayor en el HD $F(1,8) 17.38$ $p= 0.003$) y en el HI, $F(1,8) 13.61$ $p= 0.006$) al comparar con el grupo MANUAL, (Figura 9.1B).

Figura 9.1

Promedio $\pm$ ES del voltaje en el ritmo Theta en el hemisferio derecho (HD) y hemisferio izquierdo (HI) en los grupos INSTRUCTOR y MANUAL durante la condición basal y explicación para la realización de la sutura. * $p < 0.05$ grupo INSTRUCTOR vs grupo MANUAL

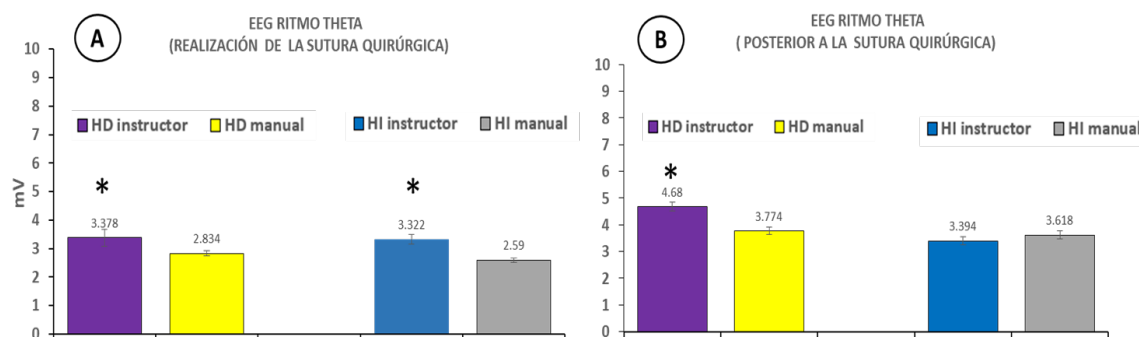


Fuente Elaboración propia.

Durante la condición de realización de la sutura, el análisis indicó que el ritmo theta en el grupo INSTRUCTOR, mostró significativamente un voltaje mayor en el HD $F(1,8) 17.38 p = 0.003$ y el HI, $F(1,8) 13.61 p = 0.006$ (Figura. 9.2A) al comparar con el grupo MANUAL, posterior a la realización de la sutura el grupo INSTRUCTOR mostró significativamente un voltaje mayor al comparar con el grupo MANUAL solamente en el HD, $F(1,8) 17.38 p = 0.003$ pero no en el HI en donde no existieron diferencias entre los grupos (Figura 9.2B).

Figura 9.2.

Promedio $\pm$ ES del voltaje en el EEG en el hemisferio derecho (HD) y hemisferio izquierdo (HI) en los grupos INSTRUCTOR y MANUAL durante la condición basal y explicación para la realización de la sutura, *grupo INSTRUCTOR vs grupo MANUAL, $p < 0.05$



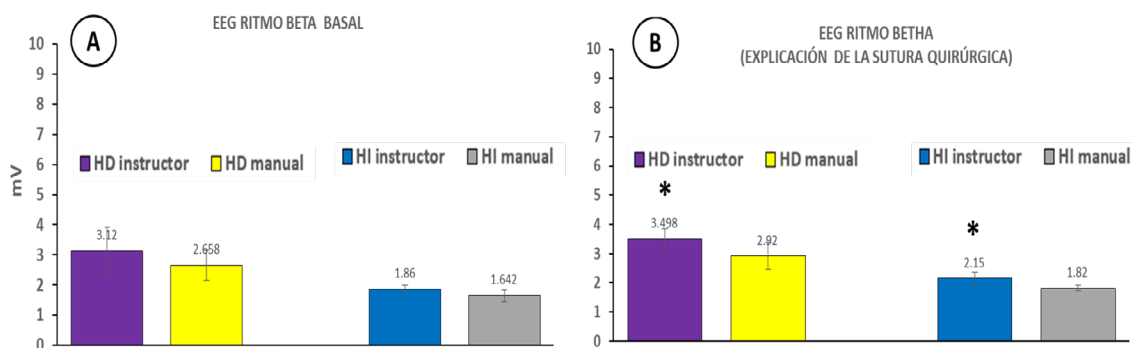
Fuente Elaboración propia.

Por lo que respecta al ritmo Beta, se observó que durante la condición basal no existieron diferencias significativas entre los grupos para el voltaje del EEG tanto en el HD ((1,8)

0.21 $p= 0.5242$) como el HI , $F((1,8) 0.47 p= 0.5113)$ (Figura 9.3A), sin embargo en la condición de explicación, el análisis indicó que el grupo INSTRUCTOR registro significativamente un mayor voltaje en el HD((1,8) 13.23 $p= 0.005$) y en el HI ((1,8) 14.23 $p= 0.009$), al compararse con el grupo MANUAL (Figura 9.3B).

Figura 9.3

Promedio $\pm$ ES del voltaje en el EEG en el Ritmo Beta en el hemisferio derecho (HD) y hemisferio izquierdo (HI) en los grupos INSTRUCTOR y MANUAL durante la condición basal y explicación de la sutura, * grupo INSTRUCTOR vs grupo MANUAL, $p < 0.05$

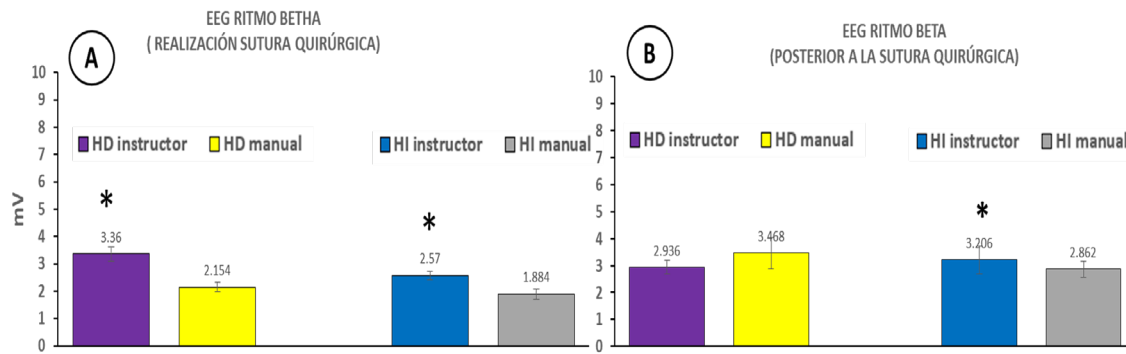


Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, el análisis estadístico indicó que, durante la realización de la sutura quirúrgica, el grupo INSTRUCTOR, registró significativamente un mayor voltaje el ritmo Beta en el HD $F((1,8) 13.61 p= 0.006)$ (Figura 9.4A), sin embargo posterior a la sutura, no existieron diferencias entre ambos grupos en el HD, no obstante en el HI el grupo INSTRUCTOR registro significativamente un mayor voltaje al compararse con el grupo MANUAL , $F((1,8) 17.38 p= 0.003)$ (Figura 9.4B).

Figura 9.4

Promedio $\pm$ ES del voltaje en el EEG del ritmo Beta en el hemisferio derecho (HD) y hemisferio izquierdo (HI) en los grupos INSTRUCTOR y MANUAL durante la condición de realización de la sutura, y posterior a la sutura * grupo INSTRUCTOR vs grupo MANUAL, $p < 0.05$



Fuente: Elaboración propia.

Discusión

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar en estudiantes de medicina el efecto en el aprendizaje de una maniobra quirúrgica mediado por imitación de movimientos de un médico cirujano durante una sutura y compararlo con el realizado por instrucciones de un manual, ambos métodos de enseñanza evaluados mediante el electroencefalograma. Los resultados muestran en primer lugar que, hubo una diferencia en la actividad eléctrica cerebral de zonas involucradas en el aprendizaje por imitación como es la corteza premotora y motora, regiones en donde se asientan NE, se ha reportado que existen zonas cerebrales implicadas en el aprendizaje motor por imitación, las neuronas que participan en este proceso se han identificado como NE, complejos neuronales que también se activan en la empatía, emociones y reflexión sobre errores (Acharya & Shukla, 2012; Buccino, 2014).

Es posible que en el experimento estas neuronas fueron activadas en mayor magnitud en el grupo INSTRUCTOR que estuvo en contacto directo con el cirujano y por lo tanto la estimulación visual y auditiva (Ariani et al., 2022; Cook et al., 2014), fue mejor al compararse con en el grupo MANUAL, es importante considerar que el docente instructor en este caso el cirujano emitió señales visuales y auditivas así como movimientos de habilidad en la realización de la sutura, de tal manera que el proceso de aprendizaje en los alumnos al realizar la sutura imitando los movimientos del docente instructor, se reflejó en la magnitud del voltaje en el ritmo Theta en ambos hemisferios, este ritmo se ha registrado en el EEG durante procedimientos motores y funciones cognitivas (Han Y., et al 2022), en contraste

en el grupo manual el ritmo Theta fue menor en ambos hemisferios . Por otro lado, en el presente estudio se observó que el grupo INSTRUCTOR durante la realización de la sutura y en la condición de terminación de la misma , registró significativamente un mayor voltaje del EEG en el ritmo Beta, lo anterior nos permite especular que la presencia del Docente instructor pudo inducir un mayor alertamiento debido a los estímulos sonoros emanados por su voz, asimismo por la formalidad y respeto hacia su profesionalismo, al respecto se ha reportado que el ritmo Beta se expresa en el EEG durante situaciones de atención, stress y vigilia (Pérez et al., 2024). En el parámetro que se involucró en el estudio que fue el movimiento por imitación al activar las NE en las regiones registradas indujo un ritmo cerebral del EEG identificado en otros estudios como ritmo mu y theta (Ashraf R., et al., 2023). El ritmo theta se ha asociado al movimiento del organismo, en particular a la integración neuronal motora dirigida a la obtención de recompensa o reforzamiento, este último aspecto íntimamente ligado al aprendizaje, en el presente estudio durante la explicación y realización de la sutura, el grupo INSTRUCTOR registró significativamente mayor voltaje en el ritmo theta del EEG en comparación con el grupo MANUAL. En los últimos años, la enseñanza a través de la Neuroeducación ha puesto atención en este constructo y se han llevado a cabo estudios con este enfoque (Goswani, 2014; Howard-Jones, 2014). Sin embargo en el ámbito de la Educación Médica y en concreto en la enseñanza de la cirugía, poco se ha explorado en la generación del conocimiento enfocado en el aprendizaje por imitación mediante el substrato neuronal de regiones cerebrales en las que se asientan NE, el presente estudio es de importancia porque da evidencia de un proceso de enseñanza-aprendizaje, el cual reafirma que son imprescindibles la presencia de dos actores ; el Docente experimentado y el alumno , en particular la presencia física del profesor es preponderante para una mejor activación neuronal en los alumnos, particularmente durante la imitación simultanea de movimientos en este caso una maniobra quirúrgica .

Conclusiones

Se concluye que la enseñanza realizada directamente por un cirujano como docente instructor propicia en los alumnos movimientos por imitación que influyen en un mayor voltaje del ritmo theta y beta cerebral que la implementada por manuales o instructivos que normalmente se lleva a cabo sin la presencia física del docente. Asimismo, la conclusión que surge es la propuesta de que la asistencia del profesor, es vital y necesaria, debido entre otros factores a que durante su enseñanza, sus movimientos y sus actitudes conllevan además del factor psicomotor el principio afectivo, factor de importancia en la educación que no se presenta por medio de enseñanza mediante manuales o grabaciones por vía virtual , finalmente se

concluye que el conocimiento de la actividad eléctrica cerebral en la enseñanza profesional es pertinente para la comprensión del proceso de enseñanza aprendizaje durante la imitación de movimientos del docente. Se requiere implementar investigaciones en las que además de llevar a cabo el registro del EEG en estudiantes bajo procesos quirúrgicos ya estandarizados, o en otras áreas de la educación, se explore también la actividad eléctrica cerebral del docente y ver la posible relación entre los cerebros de alumno y profesor durante la enseñanza.

Referencias

- Acharya, S., & Shukla, S. (2012). Mirror neurons: Enigma of the metaphysical modular brain. In *Journal of Natural Science, Biology and Medicine* (Vol. 3, Issue 2, pp. 118–124). <https://doi.org/10.4103/0976-9668.101878>
- Ashraf R, Abdoli B, Khosrowabadi R, Farsi A, Pineda J.A., The Effect of Modeling Methods on Mirror Neuron Activity and a Motor Skill Acquisition and Retention *Basic Clin Neurosci.* 2023 Sep-Oct;14(5):631-646. doi: 10.32598/bcn.2021.3245.1.
- Alegre, M., Rodríguez-Oroz, M. C., Valencia, M., Pérez-Alcázar, M., Guridi, J., Iriarte, J., Obeso, J. A., & Artieda, J. (2010). Changes in subthalamic activity during movement observation in Parkinson's disease: Is the mirror system mirrored in the basal ganglia? *Clinical Neurophysiology*, 121(3), 414–425. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.11.013>
- Ariani, G., Pruszynski, J. A., & Diedrichsen, J. (2022). Motor planning brings human primary somatosensory cortex into action-specific preparatory states. *ELife*. <https://doi.org/10.7554/eLife>
- Bonini, L., Rotunno, C., Arcuri, E., & Gallese, V. (2022). Mirror neurons 30 years later: implications and applications. In *Trends in Cognitive Sciences* (Vol. 26, Issue 9, pp. 767–781). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2022.06.003>
- Buccino, G. (2014). Action observation treatment: A novel tool in neurorehabilitation. In *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* (Vol. 369, Issue 1644). Royal Society of London. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0185>
- Cook, R., Bird, G., Catmur, C., Press, C., & Heyes, C. (2014). Mirror neurons: From origin to function. *Behavioral and Brain Sciences*, 37(2), 177–192. <https://doi.org/10.1017/S0140525X13000903>
- Eaves, D. L., Hodges, N. J., Buckingham, G., Buccino, G., & Vogt, S. (2024). Enhancing motor imagery practice using synchronous action observation. In *Psychological Research* (Vol. 88, Issue 6, pp. 1891–1907). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00426-022-01768-7>

- Errante, A., Gerbella, M., Mingolla, G. P., & Fogassi, L. (2023). Activation of Cerebellum, Basal Ganglia and Thalamus during Observation and Execution of Mouth, hand, and foot Actions. *Brain Topography*, 36(4), 476–499. <https://doi.org/10.1007/s10548-023-00960-1>
- Fiebelkorn IC, Kastner S., A Rhythmic Theory of Attention. *Trends Cogn Sci*. 2019 Feb;23(2):87-101. doi: 10.1016/j.tics.2018.11.009.
- Goswami U., Neuroscience and education. *Br J Educ Psychol*. 2004 Mar; 74(Pt 1):1-14. doi: 10.1348/000709904322848798urosci. 2014 Dec;15(12):817-24. doi: 10.1038/nrn3817. Epub 2014 Oct 15
- Han,Y., Syed Ali, S. K. Bin, & Ji, L. (2022). Use of Observational Learning to Promote Motor Skill Learning in Physical Education: A Systematic Review. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 19, Issue 16). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijerph191610109>
- Howard-Jones PA. Neuroscience and education: myths and messages .*Nat Rev Neurosci*. 2014 Dec;15(12):817-24.
- Kilner,J. M., & Lemon, R. N. (2013). What we know currently about mirror neurons. In *Current Biology* (Vol. 23, Issue 23). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.10.051>
- Leff, D. R., Leong, J. J. H., Aggarwal, R., Yang, G. Z., & Darzi, A. (2008). Could variations in technical skills acquisition in surgery be explained by differences in cortical plasticity? *Annals of Surgery*, 247(3), 540–543. <https://doi.org/10.1097/SLA.0b013e-31815fa42e>
- Leff D. R., Orihuela-Espina F, Atallah L., et al. Functional near infrared spectroscopy in novice and expert surgeons—a manifold embedding approach. *Med Image Comput Comput Assist Interv Int Conf Med Image Comput Comput Assist Interv*. 2007; 10:270 –277
- Mueller, F., Brommelsiek, M., & Sutkin, G. (2022). Mental 3D Visualization: Building Surgical Resilience for Performing High-Risk Procedures. *Journal of Surgical Education*, 79(3), 809–817. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2022.01.007>
- Mulder,T. (2007). Motor imagery and action observation: Cognitive tools for rehabilitation. *Journal of Neural Transmission*, 114(10), 1265–1278. <https://doi.org/10.1007/s00702-007-0763-z>
- Perez V, Duque A, Hidalgo V, Salvador A.EEG frequency bands in subjective cognitive decline: A systematic review of resting state studies. *Biol Psychol*. 2024 Sep; 191:108823. doi: 10.1016/j.biopsycho.2024.108823.

- Rao, K. N., Arora, R. D., Singh, A., Dange, P., & Nagarkar, N. M. (2023). Observational Learning in Surgical Skill Development. In *Indian Journal of Surgical Oncology* (Vol. 14, Issue 3, pp. 540–544). Springer. <https://doi.org/10.1007/s13193-023-01798-6>
- Rizzolatti, G., & Sinigaglia, C. (2010). The functional role of the parieto-frontal mirror circuit: Interpretations and misinterpretations. In *Nature Reviews Neuroscience* (Vol. 11, Issue 4, pp. 264–274). <https://doi.org/10.1038/nrn2805>
- Van Gog, T., Paas, F., Marcus, N., Ayres, P., & Sweller, J. (2009). The Mirror Neuron System and Observational Learning: Implications for the Effectiveness of Dynamic. Source: *Educational Psychology Review*, 21(1), 21–30. <https://doi.org/10.1007/s>
- Vogt, S., Rienzo, F. Di, Collet, C., Collins, A., & Guillot, A. (2013). Multiple roles of motor imagery during action observation. *Frontiers in Human Neuroscience* (Issue NOV). Frontiers Media S. A. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00807>