

Análisis de los cambios en la activación cerebral durante la aplicación de una secuencia de aprendizaje matemático

L. F. Morales-Moreno¹, F.J. Alvarado-Rodríguez¹, H. Vélez-Pérez¹, A. Romo², R. Romo-Vázquez^{1,*}

¹ Departamento de Ciencias Computacionales, CUCEI, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México.

² Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, CICATA, Unidad Legaria, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.

* rebecca.romovazquez@gmail.com

Resumen—Este trabajo presenta un análisis de los cambios en la actividad cerebral en registros de electroencefalografía (EEG), conteniendo la actividad eléctrica cerebral de diez sujetos sanos durante la ejecución de una tarea matemática antes y después de recibir un entrenamiento de aprendizaje matemático. El índice de correlación fue implementado con el objetivo de cuantificar dichos cambios pre- y post-entrenamiento. Los resultados muestran una disminución en la activación de las regiones cerebrales asociadas al procesamiento matemático. Esto sugiere un aumento en la eficiencia del empleo de los recursos cerebrales necesarios para la ejecución de las tareas matemáticas, luego de que los participantes recibieran dicho entrenamiento.

Palabras clave—Activación cerebral, Correlación, EEG, Matemática educativa.

I. INTRODUCCIÓN

Hasta hace algunos años las neurociencias y los procesos de aprendizaje parecían no tener relación entre sí. Sin embargo, la necesidad de comprender, caracterizar y cuantificar cómo los procesos cerebrales, presentes durante el aprendizaje del ser humano, han generado cada vez más investigaciones. Con el objetivo de estudiar estos procesos en relación al aprendizaje de las matemáticas, investigadores de tres disciplinas (las neurociencias, la ingeniería y la matemática educativa) decidieron proponer estudios en conjunto [1,2].

Así, el objetivo es de estudiar y de explicar a través de fenómenos electrofisiológicos los procesos de enseñanza y aprendizaje de las matemáticas [3]. En la matemática educativa ya se han realizado algunos estudios del análisis de la actividad del cerebro haciendo uso de la activación cerebral mediante métodos de conectividad cerebral [4-6].

La conectividad cerebral es un concepto relativamente nuevo, que ya ha sido aceptado por las neurociencias. Hoy en día se han identificado tres tipos de conectividad cerebral. La primera de ellas es la conectividad anatómica, la cual se refiere a las conexiones físicas entre neuronas (sinapsis) y regiones cerebrales [7]. El segundo tipo es la conectividad funcional, la cual atiende a la dependencia temporal de patrones presentes en la actividad neuronal entre regiones cerebrales, las cuales pueden o no estar anatómicamente separadas [8]. En este tenor, la conectividad funcional puede entonces existir sin necesidad de una conectividad anatómica.

Por último, el tercer tipo de conectividad es conocida como efectiva y permite estudiar cómo un grupo neuronal puede influir sobre otro grupo ya sea vecino o no. Así pues, este tipo de conectividad es dinámica y capaz de proporcionar la dirección del flujo de información entre las regiones cerebrales (direccionalidad) [9].

El presente trabajo se enfoca en estudiar los cambios en la activación cerebral a través de la conectividad funcional por ser el tipo de conectividad más ampliamente conocido y aceptado por la comunidad científica para el análisis de los cambios en dicha activación. Los métodos empleados en la conectividad funcional pueden ser utilizados por los diferentes tipos de técnicas de registro de actividad cerebral como son la Resonancia Magnética funcional (fMRI, por sus siglas en inglés), la Electroencefalografía (EcoG) o la Magnetoencefalografía (MEG). Sin embargo, debido a su alta resolución temporal, bajo costo, portabilidad, no invasividad, además de ser la técnica más ampliamente conocida y empleada, en este trabajo se utilizaron únicamente registros de Electroencefalografía (EEG).

II. METODOLOGÍA

A. Índice de correlación

Como se mencionó anteriormente, este trabajo se enfocó en analizar los cambios en la activación cerebral mediante la conectividad funcional. Para esto, la métrica implementada para cuantificar dicha activación en el dominio del tiempo fue el índice de correlación (r), el cual es definido como (Ec. 1):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde las variables aleatorias dentro de un espacio n se definen como $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ y $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, siendo \bar{x} y \bar{y} las medias de las observaciones X y Y , respectivamente [10].

B. Participantes

La muestra inicial se formó con un total de 27 participantes, todos ellos estudiantes de Ingeniería, con un

rango de edad de 19 a 21 años. Todos presentaron un IQ entre 100 y 120 puntos con base en la prueba rápida de la escala de inteligencia para adultos Wechsler (WAIS-IV). Ninguno de los participantes reportó alguna enfermedad psiquiátrica o psicológica. Sin embargo, diez de los participantes abandonaron voluntariamente el estudio y siete no concluyeron con el proceso. Como resultado de lo anterior, la muestra se redujo a diez participantes (cuatro hombres y seis mujeres). Todos los participantes firmaron un consentimiento informado antes de iniciar este estudio.

C. Tarea experimental

Las tareas experimentales aplicadas a los sujetos consistieron en dos cuestionarios de 18 preguntas, cada uno siguiendo la secuencia y tiempos presentados en la Figura 1. Las preguntas se basaron en el principio matemático de Pareto, también conocido como Ley de Pareto 80/20, el cual enuncia “El 80% de todos los efectos, resulta del 20% de todas las causas”. La representación gráfica de este principio fue propuesta por Joseph M. Jurán y posteriormente se incluyeron las curvas de Lorenz, las cuales son “gráficas de distribución acumulativa”, permitiendo medir distribuciones con base en porcentajes (Figura 2). Este principio es bastante utilizado en una gran diversidad de contextos industriales, ya que permite una toma de decisiones óptima. Es por ello que este principio matemático fue elegido, para ser enseñado al grupo de estudiantes participantes en el estudio. Así, el primer cuestionario, basado en dicho principio, fue diseñado e implementado en la fase de pre-entrenamiento mientras que el segundo cuestionario fue implementado una vez que los sujetos recibieron un entrenamiento con una duración de 4 horas en el aula divididas en dos sesiones de dos horas cada una de ellas y 4 horas de trabajo extra-clase.

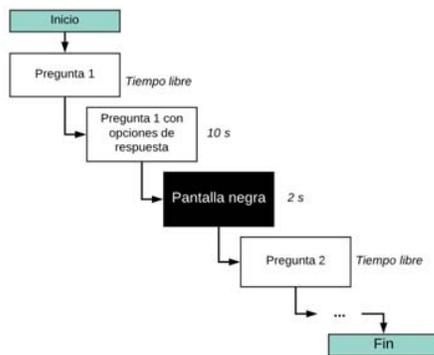


Figura 1. Diagrama de la tarea presentada durante la tarea experimental. El participante no tenía límite de tiempo para realizar la lectura de la pregunta, posteriormente a una indicación realizada en el teclado por el mismo participante, este contaba con diez segundos para seleccionar su respuesta y posterior a esto se presentaba la pantalla en negro por dos segundos. Este proceso se repetía en cada una de las 18 preguntas de la prueba.

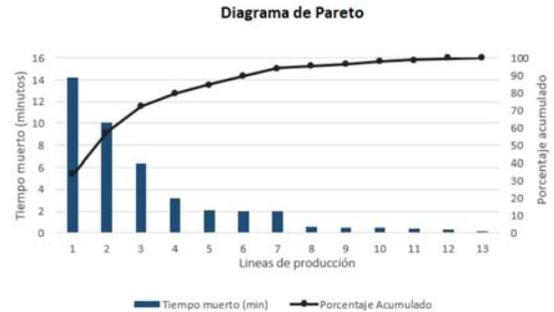


Figura 2. Representación gráfica de principio de Pareto utilizado en la industria. En negro se ilustra la curva de Lorenz.

D. Registros

Los registros de EEG fueron adquiridos al mismo tiempo que las tareas experimentales fueron aplicadas. El equipo utilizado fue un UPM-PLUS, GRASS TECHNOLOGIES, empleando 19 electrodos con referencia en los lóbulos de las orejas y con ubicación espacial de acuerdo al Sistema Internacional 10/20. La frecuencia de muestreo fue de 200 Hz y se aplicó un filtro pasa banda de 1 a 35 Hz. Los registros se llevaron a cabo en una habitación del laboratorio espacial para dicho fin, donde se controló la intensidad de luz y se aisló de sonidos para no generar interferencias. Los participantes fueron instalados en un sillón durante el registro de sus EEG mientras ejecutaban las tareas, las cuales fueron proyectadas en un monitor frente a ellos. Los participantes respondían apretando las teclas de flecha del teclado.

Las condiciones de la habitación de registro se mantuvieron constantes durante el registro pre- y post-entrenamiento de cada uno de los participantes.

E. Análisis conductuales

Las respuestas de cada uno de los participantes, así como el tiempo que tardaron en responder cada una de las preguntas, fueron analizadas mediante la prueba estadística *t*-student, y se consideró un alfa de 0.05. El despliegue y análisis de registros, así como la implementación y ejecución de las pruebas estadísticas fueron realizadas en la plataforma de MATLAB®.

F. Análisis de la activación cerebral

Para este análisis consideraron únicamente cinco segmentos de cada registro, correspondiendo únicamente a respuestas correctas. Luego, cada segmento fue dividido en cuatro ventanas de 1 s de duración. La primera ventana de 1 s representa el registro de la actividad inmediata anterior a la presentación de la pregunta en la pantalla, lo cual lo consideramos un momento de expectación por parte del

participante. La segunda ventana fue tomada en lo que correspondía al primer segundo inmediato a la presentación de la pregunta en la pantalla, por lo que se asoció con el proceso de lectura y análisis de diagramas. La tercera ventana correspondía a 1 segundo de registro antes de que el sujeto emitiera su respuesta en la cual consideramos el momento de decisión. Por último, la cuarta ventana se seleccionó en el primer segundo en el cual el sujeto podía ver las respuestas por lo que se le considero el proceso de acción de la respuesta.

En cada una de estas ventanas seleccionadas se calculó los coeficientes de correlación entre cada una de las combinaciones de pares de los electrodos para obtener su índice de conectividad funcional. Para poder obtener un índice de conectividad global por cada uno de los electrodos, se promediaron los índices de correlación de cada electrodo con cada uno de los demás canales y se obtuvo un índice de conectividad por cada electrodo (Ec. 2).

$$r_{ei} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_{ei} \quad (2)$$

Donde N es el número de electrodos y r_{ei} representa la correlación entre el electrodo e con el electrodo i .

III. RESULTADOS

A. Conductuales

Los resultados conductuales, pre- vs post- entrenamiento, presentan un aumento significativo en la cantidad de respuestas correctas ($t = -2.26, p = 0.036$), aumentando en promedio de 9.7 a 13.6 aciertos por sujeto. Asimismo, se presenta una mejora significativa en el tiempo de resolución de los cuestionarios ($t = 2.24, p = 0.038$), reduciendo en promedio de 473.5 s a 393.4 s el desarrollo de las pruebas. Ver figura 3.

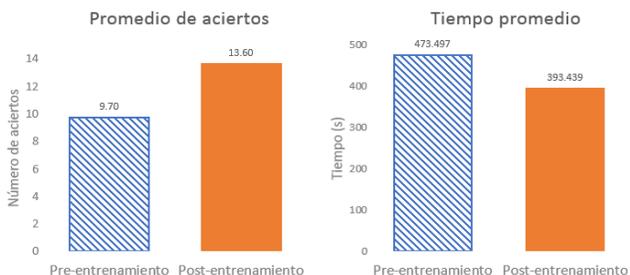


Figura 3. Resultados conductuales. En la gráfica izquierda se observan los resultados conductuales expresados en promedio de aciertos de grupo, en azul el pre- y en naranja el post- entrenamiento. En la gráfica derecha se observan los periodos del tiempo que emplearon los participantes para responder el cuestionario, en azul el pre- y en naranja el post- entrenamiento.

B. Conectividad funcional

Los análisis de los índices de conectividad de los registros pre- vs post- entrenamiento, mostraron una reducción significativa en la región frontal derecha (F8) durante el lapso de la ventana de lectura de la pregunta ($t = 2.18, p = 0.04$), ver Figura 4. También se presentó un aumento en el índice de conectividad en la región parietal central (Pz) durante la realización de la selección de la respuesta ($t = -2.53, p = 0.02$). Pese a que la deferencia no llego a ser significativa, se observó una tendencia a un aumento en el índice de conectividad durante la toma de decisión en la región F8 ($t = 1.94, p = 0.68$). Los demás cambios en los índices de conectividad no mostraron cambios significativos.

IV. DISCUSIÓN

La conectividad funcional cerebral es una propuesta que ayuda a estudiar la dinámica cerebral. Pese a que se han propuesto varios índices para su implementación, nosotros empleamos el promedio de los índices de conectividad para estimar el valor global de conexión de cada uno de los electrodos. En la literatura ha sido bien aceptados los métodos de conectividad funcional en el dominio del tiempo como lo es la correlación. Sin embargo, debido a la complejidad de la dinámica cerebral estos índices de conectividad han sido implementados principalmente en tareas cognitivas simples o durante estado de reposo.

Sin embargo, la mayoría de los procesos cognitivos son complejos, entre ellos el aprendizaje de las matemáticas, que requiere de procesos abstractos y empleo de gran cantidad de recursos neuronales [11,12]. En este trabajo se realizó la implementación de reactivos cuidadosamente elaborados con el fin de que los participantes hicieran uso de recursos tanto para interpretaciones espaciales como para proporciones algebraicas.

Las principales diferencias que se observaron en la conectividad funcional posterior al entrenamiento se ubicaron en la región prefrontal derecha. Esta región está relacionada con la memoria de trabajo visio-espacial [13], la cual tiene un papel importante en el desarrollo de las tareas realizadas durante el cuestionario, debido al componente espacial. Pesé a que esta esta diferencia se encontró principalmente en la ventana de análisis en el momento en el que se mostraba la pregunta y la habíamos designado como ventana de lectura, es probable que los sujetos emplearan ese primer instante para identificar la estructura de la pregunta, así como el material visual presentado en ellas. Por lo tanto, la reducción en la conectividad encontrada en esta región podríamos atribuirla a una reducción en la cantidad de sincronización de esta región con el resto de cerebro, lo que podría reflejar una reducción

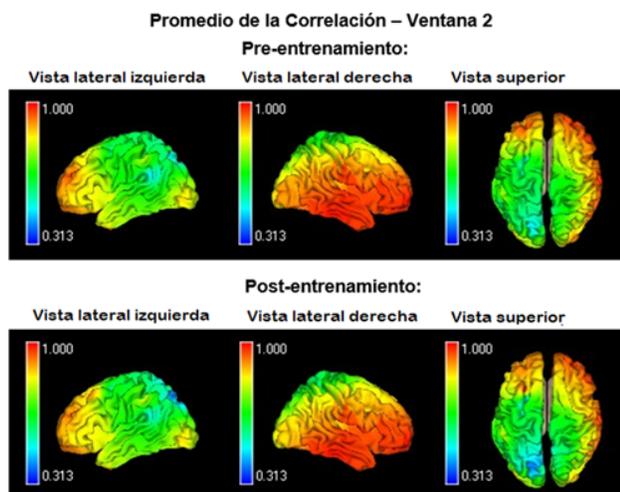


Figura 4. Índices de conectividad. A) Índices observados en los participantes durante los registros pre-entrenamiento en el momento en el que los participantes comienzan a leer la pregunta mostrada en pantalla. B) Índices post-entrenamiento en la misma condición (los participantes comienzan a leer la pregunta mostrada en pantalla, así como las imágenes contenidas en dicha pregunta durante el registro).

en la cantidad de recursos empleados para el reconocimiento de la estructura de las preguntas.

El segundo hallazgo importante se observó en la región parietal central durante la ventana de análisis de la ejecución de la respuesta. Esta región se ha asociado con la generación espacial de un movimiento respuesta, también se piensa que esta es la fuente de información visio-espacial de las neuronas de la región prefrontal [14]. Por lo que la mayor conectividad funcional de esta región cerebral podría deberse a un aumento en la implementación de los recursos visio-espaciales de esta región cerebral para la resolución de la tarea.

V. CONCLUSIÓN

Tras la realización de un entrenamiento orientado por la matemática educativa, la implementación de los índices de conectividad funcional podría ser una herramienta útil para representar de manera objetiva, los cambios generados en la dinámica cerebral debido al mejoramiento de las habilidades cognitivas. Pese a que un aumento en los índices de conectividad se ha asociado con un mejoramiento en las habilidades cognitivas, también estos aumentos se han asociado con un mayor empleo de recursos cerebrales. Es por ello que, pese a las interpretaciones en los resultados realizadas por nuestro grupo de investigación, es necesario realizar una mayor cantidad de estudios para poder realizar mejores interpretaciones a estos índices. Con ayuda de estos índices se observaron cambios en los patrones de conectividad principalmente en las regiones prefrontal

derecha y parietal central, así como mejora en los resultados conductuales post-entrenamiento. Esto último sugiere que existe una evolución en el aprendizaje matemático y en el funcionamiento de la dinámica cerebral, debido a dicho entrenamiento.

RECONOCIMIENTOS

Los autores expresan su reconocimiento y profundo agradecimiento al Laboratorio de Neurofisiología Clínica del Instituto de Neurociencias de la Universidad de Guadalajara por su valioso apoyo durante la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Cruickshank, W. M. A new perspective in teacher education: the neuroeducator. *Journal of Learning Disabilities* 14(6):337-341. 1981. DOI: 10.1177/002221948101400613.
- [2] Fuller, J.K. y Glendening, J.G. The neuroeducator: professional of the future. *Theory into Practice* 24(2):135-137. 1985 DOI: 10.1080/00405848509543161.
- [3] Alicia Ávila. La investigación en educación matemática en México: una mirada a 40 años de trabajo. *Educación Matemática* 28(3):31-59. 2016 DOI 10.24844/EM2803.02.
- [4] Obersteiner, A., Dresler, T., Reiss, K., Ogel, A. C. M., Pekrun, R., Fallgatter, A. J. Bringing brain imaging to the school to assess arithmetic problem solving: chances and limitations in combining educational and neuroscientific research. *ZDM* 42(6):541-554. 2010 DOI:10.1007/s11858-010-0256-7.
- [5] Waisman, I., Leikin, M., Leikin, R. Brain activity associated with logical inferences in geometry: focusing on students with different levels of ability. *ZDM*. 48(3):321-335. 2016. DOI: 10.1007/s11858-016-0760-5.
- [6] Korbinian Moeller, Klaus Willmes, Elise Klein. A review on functional and structural brain connectivity in numerical cognition. *Frontiers in human neuroscience*. 9:227. 2015. DOI: 10.3389/fnhum.2015.00227.
- [7] Redolar Ripoll, Diego. *Neurociencia Cognitiva*: Diego Redolar Ripoll. Madrid: Médica Panamericana, 2014.
- [8] Van den Heuvel, Martijn P., Hilleke E. Hulshoff Pol. Exploración de la red cerebral: una revisión de la conectividad funcional en la RMf en estado de reposo. *Psiquiatría Biológica*. 18(1):28-41. 2011. DOI: 10.1016/j.psiq.2011.05.001
- [9] Karl J. Friston. Functional and effective connectivity: a review. *Brain Connectivity*. 1(1):13-36. 2011. DOI: 10.1089/brain.2011.0008
- [10] Juan-Bosco Romero Márquez, María de los Ángeles López y Sánchez-Moreno. Aspectos geométricos de la regresión y correlación lineal. *Revista Didáctica de las Matemáticas*. 35:32-43. 1998.
- [11] Daniel Ansari, Ian M. Lyons. Cognitive neuroscience and mathematics learning: How far have we come? Where do we need to go?. *ZDM* 48(3):379-383. 2016. DOI: 10.1007/s11858-016-0782-z.
- [12] Campbell, S. R. "Embodied minds and dancing brains: New opportunities for research in mathematics education" en *Theories of mathematics education*. *Advances in Mathematics Education*. Bharath Sriraman and Lyn English. Springer Berlin Heidelberg. 2010, pp. 309-331. DOI:10.1007/978-3-642-00742-2_31.
- [13] Portellano Pérez, J. A. Cerebro derecho, cerebro izquierdo. Implicaciones neuropsicológicas de las asimetrías hemisféricas en el contexto escolar. *Psicología Educativa*. 15(1). 2009.
- [14] Goldman-Rakic, P.S., Friedman, H.R. The circuitry of working memory revealed by anatomy and metabolic imaging. En *Frontal Lobe Function and Dysfunction*. Harvey S.L. Howard M.E. Arthur L.B. Oxford University Press. 1991, pp. 72-91.