

ACTIVIDAD CEREBRAL COMO RESPUESTA A DIFERENTES TIPOS DE TAREAS ARITMÉTICAS

Brain activity as a response to different types of arithmetic tasks

García-Monge, A.^a, Marbán, J.M.^a, Rodríguez-Navarro^a, H. y Escudero, A.^b

^aUniversidad de Valladolid, ^bUniversidad Complutense de Madrid

Resumen

La aritmética temprana es un elemento clave en la alfabetización matemática. Entender cómo se comporta el cerebro en las primeras etapas de la vida al enfrentarse a tareas aritméticas sigue siendo un reto abierto tanto para la neurociencia como para la educación matemática. El objetivo de esta investigación es el de caracterizar la actividad cerebral de una niña de 8 años a través de un enfoque de estudio de caso y mediante varios registros encefalográficos (EEG) tomados a lo largo de 30 sesiones. En cada sesión, se pidió a la niña que realizara 4 tipos de tareas de suma y resta, a saber, cálculo con ábaco, cálculo basado en juegos, aritmética mediada por ordenador y suma y resta convencional con papel y lápiz con números arábigos. Los resultados muestran diferencias estadísticamente significativas en la actividad cerebral entre todas las tareas, lo que nos habla de la especificidad de cada una de ellas en una persona concreta.

Palabras clave: actividad cerebral, electroencefalografía, numeración temprana, tareas aritméticas

Abstract

Early numeracy is at the core of mathematics literacy. Understanding how young learners' brain behave when facing arithmetic tasks is still an open challenge both for neuroscientists and mathematics educators. The aim of this research is to characterize brain activity of an 8-years old girl through a case study approach and by means of several encephalographic records (EEG) taking along 30 sessions. In each session, the girl was asked to perform 4 types of addition and subtraction tasks, namely abacus calculation, game-based calculus, computer-mediated arithmetic and conventional paper and pencil addition and subtraction with Arabic numbers. The results show statistically significant differences in brain activity among all the tasks, which tells us about the specificity of each type of task in a particular person.

Keywords: arithmetic tasks, brain activity, early numeracy, electroencephalography

INTRODUCCIÓN

Existe una amplia bibliografía sobre el procesamiento cerebral ante tareas matemáticas (véase Peters y De Smedt, 2018), si bien la mayoría de los estudios se han realizado en condiciones de laboratorio y, principalmente, con poblaciones en edad universitaria. Recientemente, Anzalone et al. (2022) indicaron que, a pesar de una extensa historia de utilización de electroencefalogramas (EEG) para el estudio de diversos fenómenos neurocognitivos, son pocos los estudios que se han centrado en la actividad cerebral infantil implicada en procesos matemáticos. En este sentido, Van Atteveldt et al. (2018) señalan que uno de los principales retos de la neuroeducación es acercar la investigación a situaciones reales de aprendizaje apareciendo en este contexto los dispositivos EEG como una opción para aumentar las posibilidades de medir la actividad cerebral en tales entornos y mejorar, así, la validez ecológica de los experimentos.

Según Rosenberg-Lee et al. (2011), el segundo y el tercer grado (7-9 años) es un periodo importante para la adquisición y dominio de las habilidades matemáticas básicas. En su estudio registraron que en ese estrecho intervalo surgen cambios significativos en la respuesta y conectividad cerebral relacionados con tareas aritméticas. Las exigencias a estas edades son importantes para los años

escolares posteriores y los problemas que surgen pueden crear ansiedad matemática y conducir a una mala relación con las matemáticas en el futuro, condicionando elecciones posteriores.

La investigación nos muestra que el entrenamiento cambia el cerebro y que el tipo de experiencia pedagógica (las metodologías utilizadas) influye en el procesamiento neuronal, pero al sujeto le afectan muchas variables de la propia tarea, así como variables personales, de desarrollo o culturales. Cada tipo de tarea (manipulativa, visual, simbólica, ...) implica diferentes demandas cerebrales (Peters y De Smedt, 2018). De hecho, existe un amplio debate sobre la relación entre el cálculo simbólico y el no simbólico (Bugden et al., 2019). Así, muchos estudios aportan evidencias de que las habilidades aritméticas simbólicas están enraizadas en circuitos neuronales que evolucionan para representar cantidades aproximadas no simbólicas y, por tanto, el entrenamiento con tareas aritméticas no simbólicas sería una forma de mejorar las habilidades matemáticas, pero también hay muchos cuestionamientos al respecto. Trabajos recientes como el de Bugden et al. (2019), entre otros, muestran algunas arquitecturas de red superpuestas y diferentes para el procesamiento de números simbólicos y no simbólicos. Además, al analizar cada tarea aparecen peculiaridades como el "efecto tamaño del problema" que lleva a utilizar diferentes vías neuronales, aunque el efecto se reduce con el entrenamiento (Núñez-Peña, 2008) o el hecho de que no todos los números se representan de la misma manera para cada persona (por ejemplo, "algunos números se aprecian como más pares que otros", Heubner et al., 2018). A esto hay que añadir las diferencias personales en la resolución de problemas de cálculo similares en función de la edad, la educación o el nivel de habilidad. Por ejemplo, Cho et al. (2011) hablan de alumnado "contador" o "recuperador" según su estrategia dominante (en cada uno de estos grupos se observaría la implicación de diferentes áreas cerebrales). A lo largo de la infancia, la escolarización modifica los circuitos cerebrales implicados en el cálculo (Battista et al., 2018). En la revisión de Peters y De Smedt (2018) se muestra que niños y niñas utilizan en tareas aritméticas redes neuronales que no coinciden plenamente con las de los adultos. Al repetir muchas veces operaciones básicas, estas se automatizan y esto reduce la demanda sobre la memoria de trabajo. Por último, en relación con estos factores personales y evolutivos, hay que considerar que cada tarea se ve afectada por contextos socioafectivos y materiales diferentes.

En este estudio, ignoraremos los factores contextuales y reduciremos la variabilidad personal estudiando las diferencias intrapersonales en las respuestas cerebrales al realizar 4 tipos diferentes de tareas de suma y resta en 30 sesiones, con el fin de caracterizar la actividad cerebral en el contexto individual de aprendizaje de las matemáticas. El análisis prestará atención a los efectos en las bandas de frecuencia delta (0,5-3Hz), theta (4-7Hz), alfa (7-13Hz) y beta (13-30Hz). Harmony (2013) observó que la actividad delta aumenta en tareas de cálculo mental, tareas semánticas y en tareas de memoria de trabajo, y Dimitriadis et al. (2010) mostraron que aumenta con la dificultad de la tarea. Soltanlou et al. (2018) concluyeron que los aumentos en la potencia theta sugerían un cambio de estrategias lentas y procedimentales hacia estrategias procedimentales y de recuperación más eficientes y automatizadas, lo que conducía a un rendimiento más eficiente. Vourkas et al. (2014) observaron una activación de red más distribuida en la banda theta a medida que aumentaban las exigencias de la tarea. En el caso de la banda de frecuencia alfa, los valores alfa reducidos podrían reflejar más recursos cognitivos utilizados por las estrategias procedimentales (Grabner y De Smedt, 2011; Hinault y Lemaire, 2016). Por último, el aumento de la potencia beta se asocia con la carga de trabajo (Pesonen et al., 2007), con la activación mental (Tatum et al., 2008) y con la resolución de problemas y la concentración (Malik y Amin, 2017).

MÉTODO

El diseño de la investigación se basó en un enfoque de caso único siguiendo la larga tradición de este tipo de estudios para la actividad cerebral siempre que el interés sea hallar diferencias intraindividuales en diferentes condiciones, lo que permite prolongar el estudio en el tiempo. Por otro lado, este caso no sería intrínseco, sino instrumental, porque la participante no tiene

características especiales y el estudio se centró en los efectos de distintos tipos de tareas en la misma persona. Al registrar la actividad cerebral durante 30 sesiones, se puede obtener una visión más precisa de los efectos de cada tipo de tarea en esta persona. El estudio fue revisado y aprobado por el Comité de Ética de la Universidad de Valladolid y el consentimiento informado por escrito para participar en este estudio fue proporcionado por los tutores legales de la participante.

Participante

La participante es una niña de 8 años seleccionada porque la familia de la niña solicitó ayuda para desarrollar un programa de refuerzo de matemáticas. La participante era diestra y estaba sana (según sus informes pediátricos y psicopedagógicos). Cursaba tercero de primaria y le gustaban las actividades de geometría, secuenciación y lógica, obteniendo antes del inicio del programa un 74% de competencia en la Escala de Competencia Matemática Temprana de Utrecht (Media 76,09, Van de Rijt et al., 1999) y mostrando ansiedad matemática ante tareas aritméticas, con un puntaje de 78 sobre 100 en la Escala de Ansiedad Matemática Temprana, (Wu et al. 2012), un fenómeno que afecta a un gran número de niñas a esta edad (por ejemplo, Van Mier et al., 2019).

Procedimiento

Se llevó a cabo un procedimiento de 30 sesiones de trabajo (26 minutos cada sesión) asociado a un programa de refuerzo matemático prediseñado y establecido por un especialista externo que tuvo en cuenta no sólo el perfil cognitivo de la participante sino también su perfil afectivo matemático y, en particular, su alto nivel de ansiedad matemática. El programa combinó 4 tipos de tareas de suma y resta (con números del 1 al 10):

- "Ábaco": sumar y restar utilizando un ábaco: Un investigador enunciaba la operación a realizar y la niña disponía de un ábaco Soroban para dar la respuesta. Para reducir posibles artefactos y centrar los registros en la tarea de cálculo, se le pidió que no diera la respuesta verbalmente.
- Cálculo "basado en juegos": En esta tarea se realizaron diferentes juegos de suma y resta basados en el "juego de la tienda". Para comprar y vender se utilizaban monedas unitarias o de diez. Se colocaron veinte productos en una bandeja (juguetes que imitaban comida o abalorios), se marcó cada uno con un precio y se pidió a la participante que comprara dos productos en cada una de sus compras, dando la cantidad de monedas correspondiente. Se le pidió que no diera la respuesta verbalmente.
- Cálculo "mediado por ordenador": Se recurrió a una plataforma online en la que se proponen diferentes operaciones aritméticas con números arábigos. Cuenta con un sistema de recompensas y un entorno virtual en el que intercambiar los puntos obtenidos por diferentes objetos virtuales. Las operaciones se realizaban con una pantalla digital en la que la niña indicaba los resultados de cada operación. Cada operación se presentaba verticalmente en el centro de la pantalla.
- Cálculo escrito: Tareas de suma y resta convencionales con números arábigos usando papel y lápiz. Cada operación se presentaba verticalmente en el centro de una página blanca.

En cada sesión, los cuatro tipos de tareas se presentaban aleatoriamente. De cada tarea se registraron 10 operaciones por sesión. Se dejó un intervalo de 4 segundos entre las operaciones. Las operaciones se centraron en las combinaciones entre números del 1 al 10 ya que el programa trataba de generar una automatización en las operaciones básicas de suma y resta. Se realizaron 10 propuestas por tarea para no superar tiempos de sesión superiores a 30 minutos en la recogida de datos EEG con niños. El tipo de cálculo requerido fue similar en las diferentes tareas. Al comienzo de cada sesión, se recogieron registros con los ojos cerrados, con los ojos abiertos y realizando una tarea consistente en escribir números del 1 al 40. Para que la participante se sintiera más cómoda,

las sesiones se realizaron en su mesa de estudio. La única modificación que se hizo fue incorporar un panel blanco de 1 m de altura alrededor de la mesa para reducir las distracciones. La sala habilitada para las sesiones no estaba aislada, pero no se registraron ruidos. La participante se sentó en una silla cómoda con los brazos apoyados en la mesa de despegue.

Al principio de cada sesión recordamos a la participante la importancia de no realizar movimientos bruscos o innecesarios (parpadeo, movimientos de la mandíbula o la lengua, tensión del cuello...). Para realizar los registros EEG, se utilizó un auricular Emotiv EPOC® con 16 electrodos, 14 canales de registro EEG (AF3, AF4, F3, F4, F7, F8, FC5, FC6, P7, P8, T7, T8, O1 y O2) y 2 electrodos de referencia (P3 y P4), posicionados según el Sistema Internacional 10-20. Los electrodos de este sistema son de contacto y de tipo salino. La impedancia de los electrodos es inferior a 5 k Ω (kilo-ohmios) para obtener una señal de buena calidad. La señal EEG registrada, con una frecuencia de muestreo de 128 Hz, se envía de forma inalámbrica a un receptor Bluetooth colocado en el ordenador. El Emotiv EPOC® dispone de un sistema de cancelación de artefactos en sus electrodos de referencia y un filtro para las frecuencias de 50 (notch filter) y 60 Hz.

Pre-procesado de la señal

El preprocesamiento de datos y los análisis se llevaron a cabo utilizando la caja de herramientas EEGLAB (v.2019.1) para Matlab (R2020a). Se eliminó la línea de base de la señal de EEG para cada canal (-200 a 0 milisegundos). Se aplicó un filtrado espacial de referencia media común (CAR). Para el filtrado frecuencial, los datos se filtraron de paso alto a 0,5 Hz para eliminar las derivas lentas. Los artefactos se identificaron visualmente y se rechazaron de los datos de los canales. Los datos se descompusieron mediante análisis de componentes independientes (ICA). Los componentes que no representaban la actividad cerebral se identificaron visualmente y se eliminaron. Para ello se utilizó la herramienta ICALabel (un clasificador de componentes independientes electroencefalográficos).

Análisis estadísticos

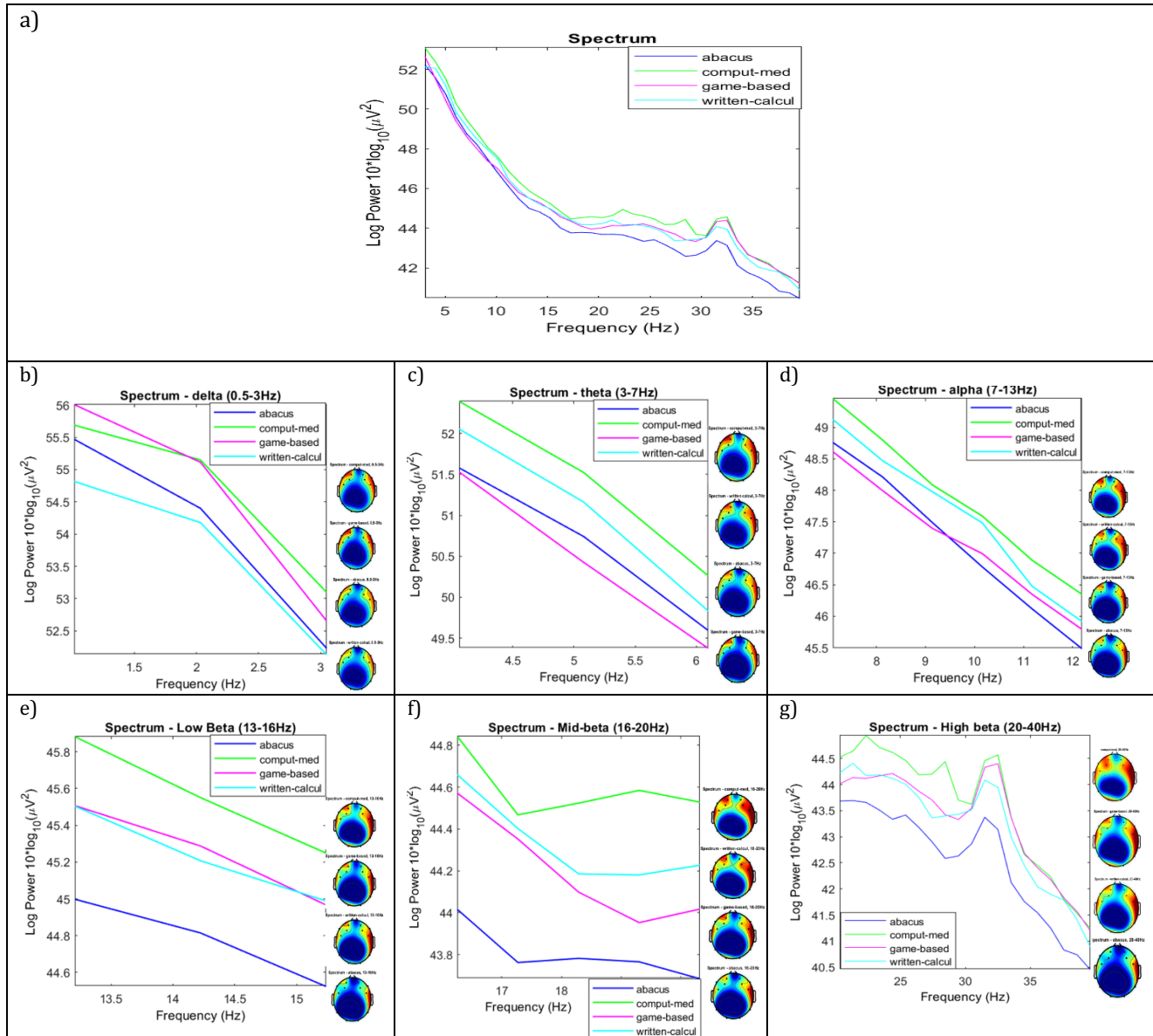
El análisis en el dominio de la frecuencia se realizó mediante el algoritmo de la transformada rápida de Fourier 200 (FFT) (con una resolución de 0,125 Hz) para calcular la densidad espectral de potencia absoluta dentro de las bandas delta (0,5-3 Hz), theta (4-7 Hz), alfa (7-13 Hz) y beta (13-30 Hz). Se trata de una transformación logarítmica basada en la potencia a partir de la medición del microvoltio (μ V) y el tiempo, calculada para cada banda de frecuencia. Dado que mide la potencia con respecto a la unidad de densidad espectral, se expresa en decibelios (dB). Las mediciones de canales y componentes se calcularon previamente. Se calcularon las métricas de densidad espectral de potencia para cada tarea. EEGLAB permite realizar análisis de varianza de los espectros de potencia. Para los espectros de potencia media, los valores p se calculan en cada frecuencia. En este caso se desarrolló una prueba de análisis de la varianza (ANOVA) para detectar diferencias estadísticas entre las cuatro tareas utilizando estadísticas basadas en permutaciones (de 2000 permutaciones). El punto específico de tiempo-frecuencia se consideró significativo a $p \leq 0,001$. También se realizaron análisis de varianza pareados entre los cuatro tipos de tareas.

RESULTADOS

Los resultados tras el análisis de la varianza muestran diferencias significativas entre las densidades espectrales de potencia (PSD) en todas las frecuencias (Figura 1). En la banda delta (0,5-3Hz) hay una diferencia significativa ($p < 0,001$) en el intervalo 0,5-2,5Hz. Entre 2 y 3Hz hay una tendencia hacia la agrupación de las tareas "basadas en el juego" y "mediadas por ordenador", así como otra agrupación de "ábaco" y "cálculo escrito". En la banda theta (4-7Hz) las tareas "mediadas por ordenador" presentan los valores más altos de PSD ($M=51,39$), seguidas de las tareas "cálculo escrito" ($M=51,02$) y "ábaco" ($M=50,74$). El valor más bajo correspondería a las tareas basadas en juegos ($M=50,44$). Las diferencias no significativas se establecerían entre "ábaco" y "basado en

juegos" ($p=0,1001$) y "mediado por ordenador" y "cálculo escrito" ($p=0,023$). Los valores en la banda alfa (7-13 Hz) también muestran diferencias no significativas entre "ábaco" y "basado en juegos" ($p=0,033$) y "mediado por ordenador" y "cálculo escrito" ($p=0,351$). El "mediado por ordenador" presenta los valores más altos ($M=47,86$), seguido del "cálculo escrito" ($M=47,57$), el "ábaco" ($M=47,14$) y el "basado en juegos" ($M=47,19$).

Figura 1. Comparación de los PSD de las tareas de "ábaco", cálculo "mediado por ordenador", cálculo "basado en juegos" y "cálculo escrito". a) visión general, b) banda delta (0,5-3Hz), c) theta (3-7Hz), d) alfa (7-13Hz), e) beta bajo (13-16Hz), f) beta medio (16-20Hz), g) beta alto (20-40Hz).



DISCUSIÓN

Los valores más altos en la frecuencia delta (0,5-3Hz) en tareas basadas en juegos y mediadas por ordenador pueden estar indicando una mayor demanda de concentración, cálculo mental y memoria de trabajo. Las oscilaciones delta parecen estar implicadas en una mayor implicación emocional y en procesos cognitivos relacionados con la atención y la detección de estímulos motivadores en el entorno, aunque también pueden relacionarse con procesos de atención. Los aumentos de potencia delta en la tarea matemática difícil, por su parte, podrían interpretarse como un reflejo de la inhibición de la red de modo por defecto durante las estrategias procedimentales. Sin embargo,

debemos considerar los hallazgos de Fernández et al. (2002) en su trabajo comparando la memoria de dígitos entre adultos y niños. En esta investigación señalan que la potencia no aumentó en las frecuencias delta en los niños (que se ha relacionado con la inhibición), lo que se relaciona con una inhibición infantil deficiente debida a la inmadurez del lóbulo frontal. En este caso, los valores más altos en las tareas "basadas en juegos" podrían explicar la implicación emocional y la atención; y en las tareas "mediadas por ordenador", la atención y una mayor implicación de la memoria de trabajo en el cálculo.

En la banda theta (4-7Hz) las tareas "mediadas por ordenador", seguidas de las tareas de "cálculo escrito" presentan los valores más altos lo que puede estar reflejando un mayor uso de estrategias procedimentales y de recuperación automatizadas (recuperación de hechos aritméticos). Harmony et al. (1999) observaron aumentos en la banda theta durante una tarea aritmética compleja. Los efectos theta a 3,9 Hz estaban relacionados con la producción del habla interna, el almacenamiento y el ensayo de la memoria de trabajo verbal. Las diferencias a 5,46 Hz se consideraron asociadas a la atención sostenida. Fernández et al. (2002), al estudiar la actividad 278 de niños que realizaban tareas de retención numérica que activaban la concentración interna o la atención a la *mentación* interna, observaron aumentos de potencia dentro de las frecuencias theta en la mayor parte del córtex, un área relacionada con la memoria de trabajo. Un efecto más pronunciado en niños que en adultos puede interpretarse como un mayor esfuerzo de los niños, ya que se ha demostrado que estas frecuencias aumentan con la carga de memoria. En este caso, los valores más altos en "mediado por ordenador" y "cálculo escrito" pueden deberse al habla interna, al almacenamiento y al ensayo de la memoria de trabajo verbal.

También las respuestas a las tareas "mediadas por ordenador" y "cálculo escrito" muestran los valores más altos en la banda alfa. Los valores alfa reducidos podrían reflejar más recursos cognitivos requeridos por las estrategias procedimentales de múltiples pasos, en relación con la estrategia de recuperación menos exigente, aunque autores como Klimesh (2012) señala que el acceso prolongado a la información almacenada (en tareas como matemáticas) implica la aparición de entradas de memoria inhibitorias irrelevantes para la tarea, lo que refleja una mayor actividad de la banda alfa. Además, Fernández et al. (2002) observaron que la potencia alfa disminuía en los adultos, mientras que aumentaba en los niños y explicaron que este resultado concuerda con la hipótesis de una respuesta inmadura en los niños. En este caso, los valores más altos en "cálculo mediado por ordenador" y "cálculo escrito" frente a "ábaco" o "basado en juegos" podrían deberse a un acceso prolongado a la información almacenada (Klimesh, 2012).

El aumento de la potencia beta se asocia con la carga de trabajo (Pesonen et al., 2007), con la activación mental (Tatum et al., 2008) y con la resolución de problemas y la concentración (Malik y Amin, 2017). Esos procesos podrían explicar los valores más altos de "mediada por ordenador". La mayor diferencia con las otras tareas se encuentra en el rango beta bajo, que Abhang et al. (2016) asocian con la concentración focalizada e introvertida y Spüler et al. (2016) con la dificultad de la tarea. Además, Abhang et al. (2016) señalan que el beta alto estaría asociado a un arousal alto (en este caso los valores más altos en este rango se reportan en "computer-mediated", "written-calculus" y "game-based"). En otras palabras, las tareas "mediadas por ordenador" parecerían ser más difíciles para esta persona, provocarían arousal y requerirían una concentración más introvertida, a diferencia de las tareas de "ábaco".

CONCLUSIONES Y LIMITACIONES

La comparación de estas cuatro tareas muestra diferencias en la actividad cerebral entre las tareas basadas en la manipulación de objetos ("ábaco" y "basada en juegos") y entre las tareas basadas en representaciones numéricas simbólicas escritas ("mediada por ordenador" y "cálculo escrito"), lo que nos habla de la especificidad de cada tipo de tarea, independientemente de que se basen en cálculos a través de objetos o con representaciones numéricas simbólicas escritas. A la luz de

investigaciones previas, interpretamos que valores altos de la frecuencia delta de la tarea basada en juegos podrían indicar mayor implicación emocional y atención; valores altos en la banda delta de la mediada por ordenador reflejarían atención y mayor implicación de la memoria de trabajo en el cálculo. Los valores altos en las bandas theta y alfa de las tareas mediadas por ordenador y de cálculo escrito podrían reflejar cálculo mental, demanda de memoria de trabajo y acceso prolongado a la información almacenada. Los valores altos de las tareas "mediadas por ordenador" en la banda beta estarían indicando que, para esta persona, implican tareas más difíciles que le provocan excitación y le exigen una mayor concentración que las tareas de "ábaco".

A pesar de las limitaciones de un estudio de caso único (aunque es complejo realizar un seguimiento durante tanto tiempo con una muestra mayor), hay que considerar que las tareas utilizadas a lo largo del experimento no aparecen de forma aislada y de alguna manera todas ellas definen o conforman un contexto de aprendizaje determinado. Además, el entorno de las tareas mediadas por ordenador tiene su propia lógica y es un ecosistema en el que aparecen otras recompensas y motivaciones (juegos, premios, charlas con otros participantes...) que proporcionan una experiencia más estimulante que la tarea aislada de sumar o restar. Además, aunque este breve informe nos muestra indicadores interesantes, en futuros análisis profundizaremos en los datos para extraer conclusiones más detalladas sobre la asimetría alfa frontal, la participación de diferentes áreas cerebrales en cada tarea, o la coherencia entre canales y redes.

Referencias

- Abhang, P. A., Gawali, B. W., y Mehrotra, S. C. (2016). Technical aspects of brain rhythms and speech parameters. En P. A. Abhang, B. W. Gawali, y S. C. Mehrotra (Eds.), *Introduction to EEG- and Speech-Based Emotion Recognition* (pp. 51-79). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804490-2.00003-8>
- Anzalone, C., Luedke, J. C., Green, J. J., y Decker, S. L. (2022). QEEG coherence patterns related to mathematics ability in children. *Applied Neuropsychology: Child*, 11(3), 328–338. doi.org/10.1080/21622965.2020.1830403
- Battista, C., Evans, T. M., Ngoon, T. J., Chen, T., Chen, L., Kochalka, J., y Menon, V. (2018). Mechanisms of interactive specialization and emergence of functional brain circuits supporting cognitive development in children. *NPJ Science of Learning*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.1038/s41539-017-0017-2>
- Bugden, S., Woldorff, M. G., y Brannon, E. M. (2019). Shared and distinct neural circuitry for nonsymbolic and symbolic double-digit addition. *Human Brain Mapping*, 40(4), 1328–1343. <https://doi.org/10.1002/hbm.24452>
- Cho, S., Ryali, S., Geary, D. C., y Menon, V. (2011). How does a child solve $7 + 8$? Decoding brain activity patterns associated with counting and retrieval strategies. *Developmental Science*, 14(5), 989–1001. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2011.01055.x>
- Dimitriadis, S. I., Laskaris, N. A., Tsirka, V., Vourkas, M., y Micheloyannis, S. (2010). What does delta band tell us about cognitive processes: a mental calculation study. *Neuroscience Letters*, 483(1), 11–15. doi:10.1016/j.neulet.2010.07.034
- Fernández, T., Harmony, T., Gersenowies, J., Silva-Pereyra, J., Fernández-Bouzas, A., Galán, L., y Díaz-Comas, L. (2002). Sources of EEG activity during a verbal working memory task in adults and children. En C. Reisin, M. R. Nuwer, M. Hallet, y C. Medina (Eds), *Advances in Clinical Neurophysiology* (Supplement to Clinical Neurophysiology, Vol. 54) (pp. 269-283). Elsevier Science.
- Grabner, R. H., y De Smedt, B. (2011). Neurophysiological evidence for the validity of verbal strategy reports in mental arithmetic. *Biological Psychology*, 87(1), 128–136. doi:10.1016/j.biopsycho.2011.02.0
- Harmony, T., Fernández, T., Silva, J., Bosch, J., Valdés, P., Fernández-Bouzas, A., Galán, L., Aubert, E., y Rodríguez, D. (1999). Do specific EEG frequencies indicate different processes during mental calculation? *Neuroscience Letters*, 266(1), 25–28. doi:10.1016/s0304-3940(99)00244-x

- Harmony T. (2013). The functional significance of delta oscillations in cognitive processing. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7, 83. doi:10.3389/fnint.2013.00083
- Heubner L, Cipora K, Soltanlou M, Schlenker M-L, Lipowska K, Göbel SM, Domahs F, Haman M, y Nuerk H-C (2018). A mental odd-even continuum account: Some numbers may be “more odd” than others and some numbers may be “more even” than others. *Frontiers of Psychology*, 9, 1081. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01081>
- Hinault, T., y Lemaire, P. (2016). What does EEG tell us about arithmetic strategies? A review. *International Journal of Psychophysiology*, 106, 115–126. doi:10.1016/j.ijpsycho.2016.05.006
- Klimesch W. (2012). α -band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends in Cognitive Science*, 16, 606–617. doi:10.1016/j.tics.2012.10.007
- Malik, A.S. y Amin, H.U. (2017). *Designing EEG Experiments for Studying the Brain: Design Code and Example Datasets*. Elsevier.
- Núñez-Peña, M. I. (2008). Effects of training on the arithmetic problem-size effect: an event-related potential study. *Experimental Brain Research*, 190, 105–110. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1501-y>
- Pesonen, M., Hämäläinen, H., y Krause, C. M. (2007). Brain oscillatory 4–30 hz responses during a visual n-back memory task with varying memory load. *Brain Research*, 1138, 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.12.076>
- Peters, L., y De Smedt, B. (2018). Arithmetic in the developing brain: A review of brain imaging studies. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30, 265–279. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.05.002>
- Rosenberg-Lee, M., Barth, M., y Menon, V. (2011). What difference does a year of schooling make? Maturation of brain response and connectivity between 2nd and 3rd grades during arithmetic problem solving. *NeuroImage*, 57(3), 796–808. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.05.013>
- Soltanlou, M., Artemenko, C., Ehli, A. C., Huber, S., Fallgatter, A. J., Dresler, T., y Nuerk, H. C. (2018). Reduction but no shift in brain activation after arithmetic learning in children: A simultaneous fNIRS-EEG study. *Scientific Reports*, 8(1), 1707. doi.org/10.1038/s41598-018-20007-x
- Spüler, M., Walter, C., Rosenstiel, W., Gerjets, P., Moeller, K., y Klein, E. (2016). EEG-based prediction of cognitive workload induced by arithmetic: a step towards online adaptation in numerical learning. *ZDM Mathematics Education*, 48, 267–278. <https://doi.org/10.1007/s11858-015-0754-8>
- Tatum, W.O., Husain, A.M., Benbadis, S.L., y Kaplan, P. (2008). *Handbook of EEG Interpretation*. Demos.
- Van Attevelde, N., van Kesteren, M., Braams, B., y Krabbendam, L. (2018). Neuroimaging of learning and development: improving ecological validity. *Frontline Learning Research*, 6(3), 186–203. doi:10.14786/flr.v6i3.366
- Van de Rijt, B. A. M., van Luit, J. E. H., y Pennings, A. H. (1999). The 541 construction of the Utrecht early mathematical competence scales. *Educational and Psychological Measurement*, 59(2), 289–309. <https://doi.org/10.1177/0013164499592006>
- Van Mier, H. I., Schleepen, T., y Van den Berg, F. (2019). Gender differences regarding the impact of math anxiety on arithmetic performance in second and fourth graders. *Frontiers in Psychology*, 9, 2690. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02690>
- Vourkas, M., Karakontstantaki, E., Simos, P. G., Tsirka, V., Antonakakis, M., Vamvoukas, M., Stam, C., Dimitriadis, S., y Micheloyannis, S. (2014). Simple and difficult mathematics in children: a minimum spanning tree EEG network analysis. *Neuroscience Letters*, 576(1), 28–33. doi.org/10.1016/j.neulet.2014.05.048
- Wu, S. S., Barth, M., Amin, H., Malcarne, V., y Menon, V. (2012). Math anxiety in second and third graders and its relation to mathematics achievement. *Frontiers in Psychology*, 3, 162. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00162>