

## Patrones de actividad cerebral antes y durante la realización de cálculos aritméticos Brain activity patterns before and during arithmetic calculations

N. F. Lozano-Vázquez <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Área Académica de Matemáticas y Física, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

### Resumen

La práctica de la aritmética es un elemento clave en la alfabetización matemática. Entender cómo se comporta el cerebro 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 realizar un análisis cualitativo de señales electroencefalográficas, en particular hacia un enfoque a la dinámica y activación de los canales a través de un sujeto quien se somete a una prueba matemática teniendo que realizar sustracciones aritméticas de manera continua durante un minuto. A través de herramientas tecnológicas se realizó un análisis de fluctuaciones sin tendencia a cada uno de los veinte canales medidos por electroencefalograma. Se obtuvo una vinculación directa con la corteza prefrontal por su relación en el almacenamiento de memoria de trabajo, el razonamiento y la atención, también se vió involucrada la región parietal por llevar a cabo funciones como el procesamiento numérico y la representación de cantidades.

**Palabras Clave:** EEG, aritmética, electroencefalografía, análisis de fluctuaciones  
**2000 MSC:** 92B05, 60J20, 05C90, 37N25.

### Abstract

The practice of arithmetic is a key element in mathematical literacy. Understanding how the brain behaves when faced with arithmetic tasks remains an open challenge for both neuroscience and mathematical education. The aim of this research is to perform a qualitative analysis of electroencephalographic signals, specifically focusing on the dynamics and activation of the channels through a subject undergoing a math test, continuously performing arithmetic subtractions for one minute. Using technological tools, a detrended fluctuation analysis was conducted on each of the twenty EEG channels measured. A direct connection with the prefrontal cortex was found due to its involvement in working memory storage, reasoning, and attention, while the parietal region was also involved, as it carries out functions such as numerical processing and quantity representation.

**Keywords:** EEG, arithmetic, electroencephalography, fluctuations analysis  
**2000 MSC:** 92B05, 60J20, 05C90, 37N25.

### 1. Introducción

”La electroencefalografía (EEG) es una técnica de exploración funcional del sistema nervioso central (SNC) mediante la cual se obtiene el registro de la actividad eléctrica cerebral en tiempo real” (Ramos Arguelles *et al.*, 2009).

Ésta técnica toma relevancia con el surgimiento de las neurociencias y la necesidad científica de comprender los procesos cerebrales que implican un accionar específico en circunstancias particulares. El estudio de los electroencefalogramas implica analizar cualitativamente los datos recibidos por medio del cerebro en estudio, a través de sumergir al sujeto en una

situación que implique modificar la propia dinámica cerebral a la cual acostumbra.

Cualquier tipo de información que el cerebro este procesando se encuentra relacionada con un área específica del mismo cerebro según la naturaleza de la actividad. Tanto actividades cotidianas como actividades que requieren de mayor complejidad, se rigen bajo el mismo principio, células que se comunican entre ellas a través de impulsos eléctricos, la mitad de éstas células son neuronas que se interconectan a través de sinapsis, cada vez que un conjunto de miles de neuronas actúan de forma sincrónica generan un campo eléctrico capaz de ser medido en la superficie de la cabeza Pérez (2019).

\*Autor para correspondencia: nlozano808@gmail.com

**Correo electrónico:** nlozano808@gmail.com (Noé Federico Lozano-Vázquez).

**Historial del manuscrito:** recibido el 26/09/2024, última versión-revisada recibida el 05/12/2024, aceptado el 13/12/2024, publicado el 26/04/2025. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial.13815>



El pensamiento matemático ha sido históricamente explorado mediante la introspección, según Hadamard (1954), las matemáticas se procesan principalmente en el cerebro a través de representaciones visuo-espaciales, una idea respaldada por Albert Einstein, quien afirmó: “Las palabras y el lenguaje, ya sea escrito o hablado, no parecen jugar ningún papel en mis procesos de pensamiento. Las entidades psicológicas que sirven como bloques de construcción para mi pensamiento son ciertos signos e imágenes, más o menos claros, que puedo producir y recombinar a voluntad”.

Aunque Bourbaki (1949), Hilbert y Ackermann (1999) y Whitehead y Russell (1910) argumentan que las matemáticas tienen su propio lenguaje, Hadamard (1954) y Poincaré *et al.* (2017) sugieren que el procesamiento matemático podría ser independiente de los procesos explícitos de pensamiento. La neurociencia cognitiva ha avanzado en este tema al identificar dos formatos representacionales: uno dependiente del lenguaje para cálculos exactos y otro independiente del lenguaje para aproximaciones Dehaene *et al.* (1999).

Los cálculos exactos activan principalmente el lóbulo frontal inferior izquierdo, mientras que las aproximaciones involucran los lóbulos parietales bilaterales. Otras áreas corticales implicadas incluyen los lóbulos prefrontales y el surco intraparietal, especialmente en tareas más complejas Burbaud *et al.* (1995); Chochon *et al.* (1999a); Menon *et al.* (2000).

El uso de imágenes cerebrales como fMRI y ERP permitió a Dehaene *et al.* (1999) demostrar que las diferencias en activación cerebral dependen del tipo de cálculo. Además, las representaciones independientes del lenguaje, como la línea numérica mental, facilitan las aproximaciones, mientras que los cálculos exactos dependen del lenguaje y del entrenamiento recibido. Estos resultados reafirman la complejidad del procesamiento matemático y su distribución en diferentes circuitos cerebrales, dependiendo de la tarea y su dificultad.

Con la presente investigación se busca relacionar los cambios significativos en los distintos canales cerebrales con diversas actividades cognitivas que implican el cálculo mental aritmético exacto. La tarea de realizar cálculos aritméticos se encuentra asociada al hemisferio izquierdo del cerebro, ahora bien, si el sujeto puesto a prueba está aislado de cualquier apoyo visual o auditivo, tendrá que recurrir a diversas herramientas en su cognición, memoria de trabajo y lenguaje, por consiguiente habrá áreas las cuales tendrán su debida asociación a una región del cerebro según la naturaleza de la actividad.

El enfoque principal se basa en el análisis del comportamiento cerebral a través de realizar cálculos mentales aritméticos, y según los resultados obtenidos poder identificar si es posible visualizar las distintas áreas que se involucran en dicha actividad a través de un EEG, el cual es de menor costo que un fMRI.

## 2. Antecedentes

Los avances experimentales en electrofisiología han tenido relativamente poco impacto sobre la práctica clínica de la electroencefalografía, el principal avance ha sido a través de desarrollos técnicos como un aumento progresivo en el número de canales grabados simultáneamente, y en el ámbito científico han surgido temas de divulgación sobre el comportamiento de la actividad cerebral en distintas situaciones. Quizás la razón de este estado de cosas es que las técnicas informáticas vienen con su propios supuestos incorporados, generalmente basados en enfoques matemáticos en lugar que el propio EEG (Barlow, 1993).

El análisis de la actividad cerebral asociada con el cálculo aritmético mediante EEG es un campo que ha generado un gran interés. Este tipo de análisis se enfoca en identificar las regiones cerebrales y los patrones de activación que intervienen en el procesamiento de operaciones matemáticas.

Las funciones de alto nivel son herramientas fundamentales en el campo de la programación y las matemáticas computacionales. Estas funciones permiten realizar operaciones complejas de manera eficiente y con un alto grado de abstracción. Entre las operaciones matemáticas más básicas, pero esenciales, se encuentran las sumas y restas, que son la base para el desarrollo de algoritmos más complejos Knuth (1997).

La capacidad de ejecutar estas operaciones con precisión es crucial, especialmente en contextos donde se requiere un alto grado de exactitud, como en cálculos científicos o en la ingeniería Burden y Faires (2010). Por ejemplo, en el ámbito del cálculo aritmético, las implementaciones de funciones de suma y resta deben considerar aspectos como la representación de números en la memoria y el manejo de errores de redondeo Chochon *et al.* (1999b).

Además, las operaciones de suma y resta no son solo fundamentales en el ámbito aritmético, sino que también tienen aplicaciones en el análisis de datos, la teoría de gráficos y muchos otros campos de estudio. A medida que las herramientas y lenguajes de programación evolucionan, la implementación de estas funciones sigue mejorando, permitiendo a los desarrolladores centrarse en la lógica de sus aplicaciones en lugar de en los detalles de la computación Smith (2020).

Las funciones de alto nivel, particularmente en la realización de operaciones matemáticas como la suma y la resta, son esenciales para el avance en múltiples disciplinas. La eficiencia y precisión que proporcionan son clave para el desarrollo de soluciones efectivas en problemas complejos.

## 3. Métodos

El estudio se realizó a través de una base de datos que comprende 35 participantes, de los cuales para esta investigación fue tomado en cuenta únicamente 1 sujeto, esto debido a que el procesamiento de los datos es extenso y requirió el desarrollo de herramientas computacionales propias para la lectura de

los mismos. La recabación de señales electroencefalográficas constaba de dos sesiones, la primera se realizó mientras el sujeto permanecía en reposo momentos antes de llevarse a cabo la prueba, y la segunda mientras el sujeto recibía órdenes de realizar una cantidad de sustracciones aritméticas durante un minuto continuo según sus capacidades cognitivas. Durante el registro del EEG, el participante permaneció sentado en una cámara oscura e insonorizada, cómodamente reclinado en un sillón. El sujeto resultó elegible para participar en el estudio al mostrar tener una agudeza visual normal o corregida a la normalidad, una visión cromática normal y no presentó manifestaciones clínicas de deterioro mental o cognitivo, discapacidades de aprendizaje verbales o no verbales. Los criterios de exclusión fueron el uso de medicación psicoactiva, adicción a las drogas o al alcohol y problemas psiquiátricos o neurológicos. Recuperado de Zyma *et al.* (2019).

Como el análisis fue solo en un participante, los factores de edad y género no pueden ser comparables y por lo tanto no contribuyen a la relevancia de la investigación, el participante fue expuesto a la tarea aritmética instantes después de haber registrado su actividad cerebral en reposo, el participante es de género femenino y cuenta con 21 años de edad.

Los datos al ser descargables y de uso público se encontraban en formato EDF (European Data Format), un formato complejo de leer o extraer el contenido para su manipulación. Es por ello que se realizó un código en lenguaje de Python que realizara dos funciones:

- Servir como visualizador de canales partiendo de un solo archivo EDF, en este caso cada EEG de cada sujeto contenía 20 canales de señales recabadas por electrodos situados en la cabeza del voluntario según el sistema internacional 10/20. Visible en la Figura 1.
- Extraer el contenido de los 20 canales y exportar cada una de las señales a un archivo distinto con extensión TXT.

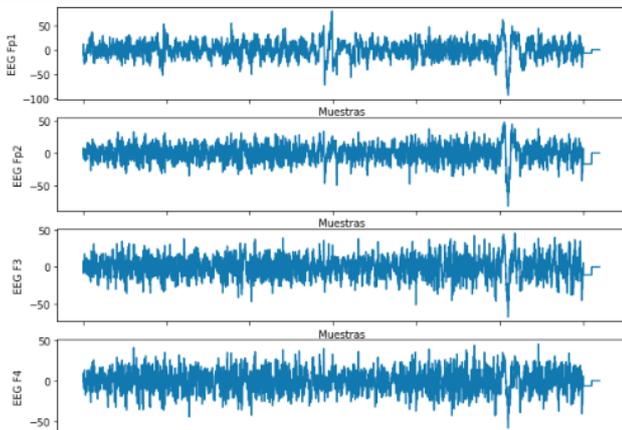


Figura 1: Visualizador de canales a través de archivos de formato EDF con uso de Python

Para la lectura de los datos descomprimidos y convertidos a formato de texto TXT se realizó una "Interfaz de Análisis de

Señales EEG", donde se logró ver el espectro de las fluctuaciones del voltaje en las señales cerebrales a través del tiempo; dicha interfaz fue generada con el uso del lenguaje de programación "Python", es capaz de graficar cualquier serie de tiempo en formato TXT y a una sola columna, así como cargar datos en formato de tabla cuya extensión sea CSV.

La Figura 2 es la representación gráfica de la señal cerebral situada en la corteza frontal izquierda correspondiente al electrodo F3, la señal fue recibida mientras el sujeto se encontraba en reposo momentos antes de realizar la prueba aritmética.

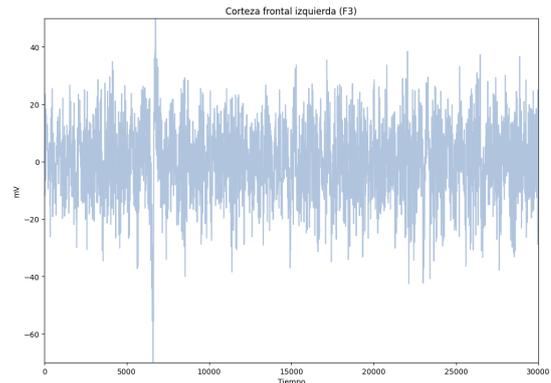


Figura 2: Señal EEG en la corteza frontal izquierda (F3) del participante antes de hacer la prueba aritmética.

La Figura 3 es la señal cerebral situada en corteza frontal izquierda, correspondiente al electrodo F3, la recopilación de la señal se llevó a cabo cuando el sujeto se encontraba realizando las sustracciones aritméticas.

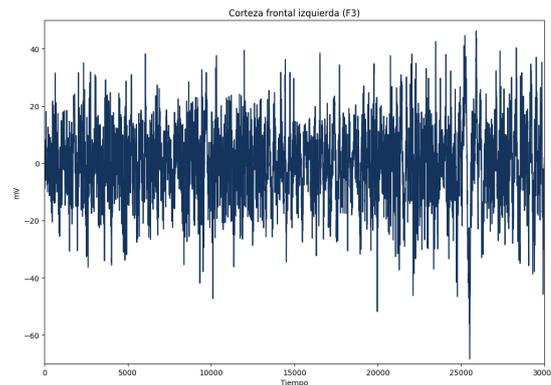


Figura 3: Señal EEG en la corteza frontal izquierda (F3) del participante mientras se encuentra realizando el cálculo aritmético.

Cada paso en el diagrama descrito por la Figura 4 refleja la relación entre las tareas y los recursos empleados, organizados de manera jerárquica y secuencial. Esto permite una comprensión clara del procedimiento desde la recolección de datos hasta su análisis final.

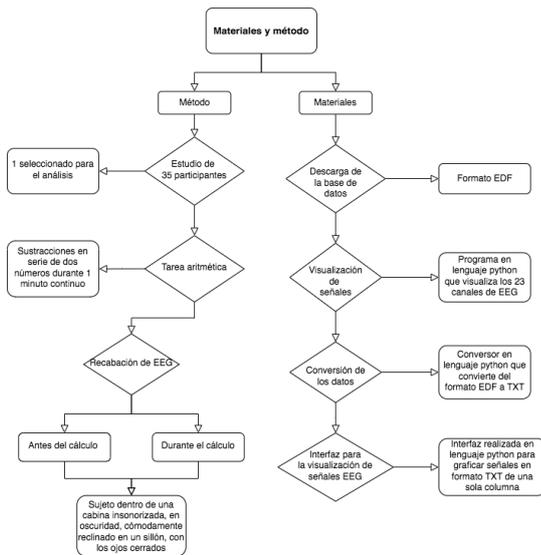


Figura 4: Diagrama de flujo que muestra los materiales y métodos requeridos en la investigación.

Se hizo un análisis de fluctuaciones sin tendencia (DFA) a través de el software "Analyzer Signal" recuperado de Paredes-Hernández *et al.* (2021). El software te permite ingresar una señal en formato TXT y realizar distintas herramientas de análisis de datos, en este caso se utilizó únicamente el generador de DFA.

La Figura 5 muestra un gráfico donde se imprimen dos líneas, la línea de color azul oscuro representa la fluctuación de la señal referente a cuando el sujeto se encuentra realizando la prueba aritmética, y la línea de color azul claro representa una fluctuación en la señal recabada de él sujeto momentos antes de la prueba. Ambas señales pertenecen a la misma región del cerebro, la corteza frontal izquierda que utiliza el canal F3 para recabar la información en el electroencefalograma. Las líneas punteadas corresponden a las pendientes ajustadas a los datos de cada señal. Ésta gráfica fue generada a partir de un código propio de graficación en Python.

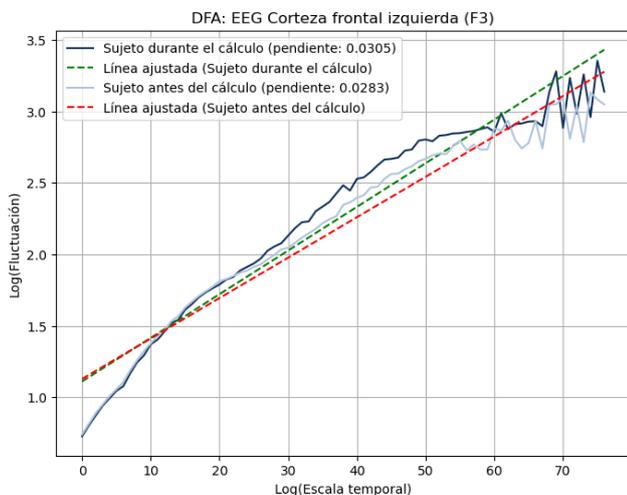


Figura 5: Comparación de señales EEG en la corteza frontal izquierda (F3) mediante DFA.

#### 4. Resultados

Tabla 1: Resultados de la Prueba T para cada DFA de los canales registrados mediante EEG.

DFA		
Canales	Valor T	Resultado
A2-A1	2.60E-42	<b>Significativo</b>
C3	5,74E-01	No significativo
C4	2,85E-01	No significativo
Cz	1,74E-04	<b>Significativo</b>
F3	2.31E-07	<b>Significativo</b>
F4	3,45E-01	No significativo
F7	8,17E-02	No significativo
F8	1.91E-06	<b>Significativo</b>
Fp1	8.95E-24	<b>Significativo</b>
Fp2	4.80E-09	<b>Significativo</b>
Fz	6.56E-01	No significativo
O1	1.20E-03	<b>Significativo</b>
O2	4.15E-01	No significativo
P3	2.21E-04	<b>Significativo</b>
P4	6.01E-03	<b>Significativo</b>
Pz	1.11E-01	No significativo
T3	1.70E-11	<b>Significativo</b>
T4	1.43E-11	<b>Significativo</b>
T5	1.19E-01	No significativo
T6	4.01E-12	<b>Significativo</b>

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos a través de DFA a 20 canales de dos distintas señales, la primera señal es recabada cuando el sujeto se encuentra realizando sustracciones aritméticas, la segunda señal es recabada momentos antes de realizar la prueba aritmética.

A través del DFA se obtuvo una correlación a largo alcance de cada canal y de cada señal, para el canal se obtuvieron dos análisis de fluctuaciones sin tendencia, uno para el sujeto realizando el cálculo y otro para el sujeto antes de realizar el cálculo. Ambos análisis fueron utilizados para ser sometidos a una Prueba T, pareada con distribución de dos colas, el resultado de esta prueba es el coeficiente nombrado como "Valor T".

Cuando el Valor T es **menor a 0.05** el resultado es estadísticamente "**Significativo**", de lo contrario si el resultado es **mayor a 0.05** es estadísticamente "**No significativo**".

A través de la Tabla 1 se muestra que canales del electroencefalograma tuvieron variaciones significativas al comparar la dinámica del cerebro en dos situaciones distintas, la primera donde el sujeto permanece en reposo, y la segunda donde la actividad que realiza el sujeto requiere de prestar atención, manejo de procesos que requieren exactitud, memoria de trabajo, y manipulación simbólica de los números, así como las representaciones verbales de las cantidades.

En la Figura 6 se puede observar un diagrama esquemático del sistema internacional 10-20 para la colocación de los electrodos. Las áreas tintadas de color "rojo" son aquellos canales donde la variación de las fluctuaciones en la señal tuvieron una

diferencia significativa, es decir, son estadísticamente desiguales, lo cual muestra que el sujeto está realizando dos actividades diferentes y por ende su cerebro se comporta de forma distinta, así como descartando la aleatoriedad de los datos.

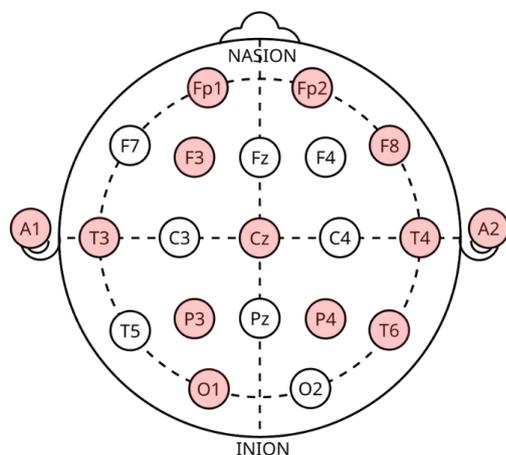


Figura 6: Representación visual de las áreas con mayor activación cerebral según los canales correspondientes a los electrodos del sistema 10/20.

## 5. Discusión

Las diferencias estadísticas halladas comparando ambas señales a través de una Prueba T, para todos los canales, demuestra que en hemisferio izquierdo existe una mayor activación cerebral, ya que se mostraron más variaciones significativas de ese lado del cerebro.

La corteza prefrontal cuyos canales son (Fp1, Fp2, F3, F8) mostró modificaciones en el comportamiento de las señales por tener una vinculación directa con el almacenamiento de memoria de trabajo y su importancia en estudios de funciones cognitivas como la toma de decisiones, la atención y abstracción Díaz Galván y Ostrosky (2012).

El lóbulo parietal con canales (P3, P4) se ve involucrado ya que es una región clave para el procesamiento numérico, la representación de cantidades y la manipulación de información espacial y numérica. Cuando las personas realizan tareas aritméticas, ya sean simples o más complejas, el surco intraparietal tiene una clara activación. El hemisferio izquierdo del lóbulo parietal suele estar más involucrado en el procesamiento numérico y el cálculo exacto, mientras que el hemisferio derecho se asocia más con hacer estimaciones o cálculos aproximados Salguero-Alcañiz y Alameda-Bailén (2015).

Los lóbulos temporales (T3, T4, T6) incluyen a la corteza auditiva, que codifica, descodifica e interpreta la información de los sonidos que percibimos Kandel *et al.* (2000). Es esencial la activación de esta región del cerebro para hacer una conversión entre el lenguaje hablado y la comprensión de la magnitud numérica a operar.

El lóbulo occipital (O1) está relacionado con las representaciones mentales ya que se activan las cortezas visuales pri-

marias en esta área cerebral Tamayo Martínez (2014). El participante se encuentra dentro de una cámara oscura y aislado de recursos gráficos donde pueda visualizar los números a resar, en consecuencia, utiliza su imaginación para visualizar los dígitos numéricos, y así aportar recursos a la memoria con el objetivo de no olvidar las cifras con las cuales se llevará a cabo el ejercicio.

## 6. Conclusiones

Mediante un análisis de los datos con fundamento en herramientas matemáticas y el uso de lenguajes de programación numérica es preciso destacar que un sujeto que utiliza su cognición en procesos aritméticos tiende a tener una dinámica cerebral más activa en el hemisferio izquierdo donde se llevan a cabo los procesos de precisión asociados a operaciones exactas que requieren de especial atención. A pesar de haber áreas más especializadas en actividades que requieren procesos de cálculo numérico, diversas áreas a lo largo de todo el cerebro se ven implicadas en realizar la acción, la diferencia recae en lo significativa que es la fluctuación eléctrica en cada canal medido a través de un electroencefalograma.

Conocer el procesamiento cerebral enfocado en procedimientos numéricos resulta ser un tema de gran apertura, ya que es estrictamente complejo aislar un procedimiento matemático. A través de la dinámica recientemente vista en el participante es notorio que involucra herramientas asociadas a distintas áreas cerebrales, por lo que la unión de las mismas y su operación en simultáneo comprenden la resolución del ejercicio.

## Agradecimientos

El autor agradece a la Dra. Erika Elizabeth Rodríguez Torres y al Cuerpo Académico de sistemas dinámicos por la revisión del manuscrito.

## Referencias

- Barlow, J. S. (1993). *The electroencephalogram: its patterns and origins*. MIT press.
- Bourbaki, N. (1949). *Foundations of mathematics for the working mathematician*, volumen 14. Cambridge University Press.
- Burbaud, P., Degreze, P., Lafon, P., Franconi, J.-M., Bouligand, B., Bioulac, B., Caille, J., y Allard, M. (1995). Lateralization of prefrontal activation during internal mental calculation: a functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Neurophysiology*, 74(5):2194–2200.
- Burden, R. L. y Faires, J. D. (2010). Numerical analysis.
- Chochon, F., Cohen, L., Van De Moortele, P., y Dehaene, S. (1999a). Differential contributions of the left and right inferior parietal lobules to number processing. *Journal of cognitive neuroscience*, 11(6):617–630.
- Chochon, F., Cohen, L., Van de Moortele, P. F., y Dehaene, S. (1999b). *Differential contributions of the left and right inferior parietal lobules to number processing*. Journal of cognitive neuroscience.
- Dehaene, S., Spelke, E., Pineda, P., Stanescu, R., y Tsivkin, S. (1999). Sources of mathematical thinking: Behavioral and brain-imaging evidence. *Science*, 284(5416):970–974.
- Díaz Galván, K. X. y Ostrosky, F. (2012). Desempeño neuropsicológico prefrontal en sujetos violentos de la población general. *Acta de investigación psicológica*, 2(1):555–567.
- Hadamard, J. (1954). *An essay on the psychology of invention in the mathematical field*. Courier Corporation.
- Hilbert, D. y Ackermann, W. (1999). *Principles of mathematical logic*, volumen 69. American Mathematical Soc.

- Kandel, E. R., Schwartz, J. H., y Jessell, T. M. (2000). *Principles of neural science*. McGraw-Hill New York, 4 edición.
- Knuth, D. E. (1997). *The Art of Computer Programming*, volumen 1. Addison-Wesley.
- Menon, V., Rivera, S., White, C., Glover, G., y Reiss, A. (2000). Dissociating prefrontal and parietal cortex activation during arithmetic processing. *Neuroimage*, 12(4):357–365.
- Paredes-Hernández, U., Pliego-Pastrana, P., Vázquez-Mendoza, E., Morgado-Valle, C., Beltran-Parrazal, L., Criollo-Perez, A., y Rodríguez-Torres, E. E. (2021). Fractal and multifractal characterization of in vitro respiratory recordings of the pre-bötzinger complex. *Brain Multiphysics*, 2:100026.
- Poincaré, H., Frappier, M., y Stump, D. J. (2017). *Science and hypothesis*. Bloomsbury Publishing.
- Pérez, A. T. (2019). Señales de electroencefalograma: Análisis y distinción de canales focales y no focales. Tesis de máster, Universitat Oberta de Catalunya.
- Ramos Arguelles, F., Morales, G., Egozcue, S., Pablo, R., y Alonso, M. (2009). Técnicas básicas de electroencefalografía: principios y aplicaciones clínicas. *Anuales del Sistema Sanitario de Navarra*, 32:69 – 82.
- Salguero-Alcañiz, M. y Alameda-Bailén, J. (2015). Sistema de procesamiento numérico y cálculo: evidencias desde la neuropsicología cognitiva. *Neurología*, 30(3):169–175.
- Smith, J. (2020). *Programming Paradigms in Computer Science*. Tech Press.
- Tamayo Martínez, N. (2014). Imaginería mental: neurofisiología e implicaciones en psiquiatría. *Revista Colombiana de Psiquiatría*, 43:40 – 46.
- Whitehead, A. N. y Russell, B. (1910). *Principia Mathematica*. Cambridge.
- Zyma, I., Tukaev, S., Seleznov, I., Kiyono, K., Popov, A., Chernykh, M., y Shpenkov, O. (2019). Electroencefalograms during mental arithmetic task performance. *Data*, 4(1):14.