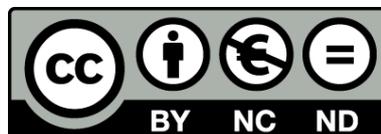




UNIVERSITAT^{DE}
BARCELONA

La capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial: procesos cognitivos y bases neurales. Estudio de las variaciones en tres etapas del desarrollo y efectos de la neuromodulación frontoparietal sobre el procesamiento e integración de magnitudes espacio-numéricas en adultos

Sara García Sanz



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- NoComercial – SenseObraDerivada 4.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - NoComercial – SinObraDerivada 4.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0. Spain License.**



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

TESIS DOCTORAL

La capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial: procesos cognitivos y bases neurales. Estudio de las variaciones en tres etapas del desarrollo y efectos de la neuromodulación frontoparietal sobre el procesamiento e integración de magnitudes espacio-numéricas en adultos.

Sara García Sanz

Directores
Dr. Josep M Serra Grabulosa
Dr. Diego Redolar Ripoll



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

La capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial: procesos cognitivos y bases neurales. Estudio de las variaciones en tres etapas del desarrollo y efectos de la neuromodulación frontoparietal sobre el procesamiento e integración de magnitudes espacio-numéricas en adultos.

Memoria presentada para acceder al grado de Doctor

Universidad de Barcelona.

Programa de doctorado Cervell, Cognició i Conducta

Autor

Sara García Sanz

Directores

Dr. Josep M Serra Grabulosa

Dr. Diego Redolar Ripoll

Tutor

Dr. Joan López Moliner

Septiembre 2022

A quien me dio la vida.

A quienes me acompañan en el camino.

Dedicado a la memoria de mi hermano Joaquín

Agradecimientos

Esta investigación se ha llevado a cabo sin financiación, ya que las convocatorias rechazaron el proyecto durante la pandemia por tratarse de una investigación básica y no aplicada. En este sentido hay que hacer un especial agradecimiento a Josep Maria Serra Grabulosa y a Diego Redolar Ripoll por haber hecho posible que este proyecto siguiera adelante. A Josep Maria y la Universidad de Barcelona por proporcionar los laboratorios donde se han realizado los experimentos, por facilitar el reclutamiento de participantes voluntarios, por aportar las licencias para el uso de las evaluaciones cognitivas de los participantes y por el apoyo logístico durante la parte experimental de la investigación. Asimismo un agradecimiento muy especial a Diego y la Universitat Oberta de Catalunya por proporcionar los aparatos de estimulación, así como los insumos para su aplicación (gel, electrodos, etc.), y también por haberme capacitado en el uso de estas técnicas, y por haberme concedido tantas oportunidades... Asimismo, debo agradecer a la Universidad de La Sabana (Colombia), donde trabajo, por haber permitido la dedicación de parte de mi jornada laboral a la realización de este proyecto de investigación, y por haber colaborado con la financiación para participar en los congresos internacionales donde se han socializado los resultados.

Un agradecimiento muy especial a Roi Cohen Kadosh, experto en estimulación cerebral y en cognición numérica quien, sin estar implicado académicamente ni tener ningún compromiso con esta investigación, alentó y orientó este proceso desde los primeros bocetos del diseño experimental, así como en las sucesivas fases de definición del proyecto, análisis de resultados, etc., con sugerencias y retroalimentaciones realmente valiosas. Un gran agradecimiento a Quim Radua por su apoyo estadístico en el metaanálisis.

Quiero también agradecer a Daniel Hedmont por haberme acompañado y sostenido en los momentos difíciles de este recorrido. Y a Kemel, Yesenia y Nico por su cercanía y apoyo, por su trabajo constante y a prueba de dificultades. Y, en definitiva, por ser el “mejor equipo” de trabajo.

A mi padre, que nos enseñó a ser autodidactas con las “pilas” de libros y enciclopedias que nos ponía sobre la mesa cuando le preguntábamos algo de los deberes. Gracias por tu inspiración, y con la esperanza de oírte decir: “hija mía, qué grande eres”.

A mi madre, que me ha enseñado a mirar la vida con pasión y con realismo, y siempre me ha alentado a poner las “últimas piedras”.

A toda mi familia por estar siempre ahí: en los momentos difíciles y en los fáciles. Siempre de forma incondicional.

A la Ona Domínguez Martín de la Torre, por estar siempre disponible para cualquier cosa que pudiera necesitar. A la Merche del *punt d'informació*, y a todo el equipo de la UB que, con su trabajo bien hecho, hacen posible el trabajo y el progreso de los demás.

Finalmente, un agradecimiento muy especial a todos los participantes en el experimento, cuyos nombres debo omitir por Protección de Datos, pero cada uno de ellos ha sido parte importante en esta investigación, pues todos asistieron a las cuatro sesiones experimentales sin recibir nada a cambio.

¡Gracias por vuestro apoyo anónimo a la ciencia y al conocimiento!

“El progreso depende de nuestro cerebro. La parte más importante, la que es neocortical, tiene que utilizarse para ayudar a los demás y no solo para hacer descubrimientos”

Rita Levi Montalcini. Neurocientífica

Índice

Índice de tablas	i
Índice de figuras	iii
Listado de abreviaturas	vii
Resumen	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Cognición numérica	2
1.1.1. Procesamiento numérico	6
1.1.1.1. Sistemas cognitivos de procesamiento numérico	6
1.1.1.2. Bases neurales del procesamiento numérico	10
1.1.1.3. Importancia del procesamiento numérico para el desarrollo del pensamiento matemático	17
1.1.2. Procesamiento espacial	20
1.1.2.1. Sistemas cognitivos de procesamiento espacial (estimación de áreas)	20
1.1.2.2. Bases neurales del procesamiento espacial	25
1.1.2.3. Importancia del procesamiento espacial para el desarrollo del pensamiento matemático	28
1.1.3. Procesamiento de magnitudes: interacciones entre espacio, tiempo y número	30
1.1.3.1. Del sentido numérico al sentido de magnitud	30
1.1.3.2. Bases neurales del procesamiento de magnitudes. Regiones comunes y diferentes para cada tipo de procesamiento.	32
1.1.3.3. Interferencias entre el procesamiento espacial, temporal y numérico	37
1.1.3.4. Paradigmas cognitivos utilizados para analizar el procesamiento de magnitudes: las tareas de comparación numérica	40
1.2. Técnicas de estimulación cerebral no invasiva (NIBS)	51
1.2.1. Estimulación magnética transcraneal	52
1.2.1.1. Descripción de la técnica	52
1.2.1.2. Protocolos de estimulación	53
1.2.1.3. Mecanismo de acción	56

1.2.2. Estimulación eléctrica transcraneal	58
1.2.2.1. Descripción de la técnica	58
1.2.2.2. Protocolos de estimulación	59
1.2.2.3. Mecanismo de acción	63
1.2.3. Uso de las NIBS para estudios cognitivos	65
1.2.4. Uso de las NIBS en cognición numérica	68
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	71
2.1. Estudio 1: Revisión sistemática y metaanálisis acerca del uso de las NIBS en cognición numérica	72
2.2. Estudio 2: Análisis cognitivo-conductual de la capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial.	72
2.3. Estudio 3. Análisis de los efectos de la modulación de la excitabilidad cortical de las regiones frontoparietales sobre la capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial.	73
3. METODOLOGÍA	75
3.1. Estudio 1	75
3.1.1. Tipo de estudio: metaanálisis y revisión sistemática	75
3.1.2. Fuentes de información y algoritmos de búsqueda	75
3.1.3. Criterios de inclusión y exclusión de estudios	76
3.1.4. Extracción de la información y análisis	77
3.1.5. Análisis estadístico	77
3.2. Estudio 2	80
3.2.1. Tipo de estudio: estudio no experimental transversal	80
3.2.2. Participantes	80
3.2.3. Aspectos éticos	82
3.2.4. Evaluación	82
3.2.5. Análisis estadístico	87
3.3. Estudio 3	90

3.3.1. Tipo de estudio: experimento aleatorizado simple ciego con control	90
3.3.2. Participantes	90
3.3.3. Aspectos éticos	91
3.3.4. Procedimiento	92
3.3.5. Protocolo de estimulación	94
3.3.6. Análisis estadístico	98
4. RESULTADOS	101
4.1. Estudio 1: Revisión sistemática y metaanálisis acerca del uso de las NIBS en cognición numérica	101
4.1.1. Estudios incluidos	101
4.1.2. Resultados referentes a la estimulación magnética	105
4.1.2.1. Protocolos de estimulación	113
4.1.2.2. Intensidad	114
4.1.2.3. Métodos de localización	115
4.1.2.4. Diseño y control de las investigaciones	116
4.1.2.5. Efectos de la estimulación	116
4.1.3. Resultados referentes a la estimulación eléctrica	117
4.1.3.1. Protocolos de estimulación	126
4.1.3.2. Polaridad y montaje	126
4.1.3.3. Diseño y control de las investigaciones	129
4.1.3.4. Efectos de la estimulación	131
4.1.3.5. Resultados del metaanálisis: efectos de la estimulación eléctrica sobre la habilidad de cálculo	132
4.2. Estudio 2: Estudio cognitivo-conductual transversal acerca de la capacidad para procesar e integrar información cuantitativa numérica y la espacial	138
4.2.1. Rendimiento en las tareas de comparación dentro y entre los grupos de edad	138
4.2.2. Rendimiento en las tareas de comparación según la magnitud (numérica, espacial regular o espacial irregular) dentro y entre los grupos de edad	143
4.2.3. Rendimiento en las tareas de comparación según el tipo de tarea (uni-formato o mixta) dentro y entre los grupos de edad	148

4.3. Estudio 3: Ensayo aleatorizado de los efectos de la modulación de la excitabilidad cortical de las regiones frontoparietales sobre la capacidad para procesar e integrar información cuantitativa numérica y la espacial	152
4.3.1. Efectos de la estimulación en el rendimiento en las tareas de comparación de magnitudes	152
4.3.1.1. Tiempos de reacción	152
4.3.1.2. Porcentaje de aciertos	154
4.3.2. Efectos de la estimulación en el rendimiento de las tareas según la magnitud (numérica, espacial regular, espacial irregular)	157
4.3.2.1. Tiempos de reacción	157
4.3.2.2. Porcentaje de aciertos	160
4.3.3. Efecto de la estimulación en el rendimiento de las tareas según el tipo de tarea (uni-formato vs mixtas)	162
4.3.3.1. Tiempos de reacción	162
4.3.3.2. Porcentaje de aciertos	165
5. DISCUSIÓN Y LIMITACIONES DE CADA ESTUDIO	167
5.1. Estudio 1: El uso de las NIBS en estudios de cognición numérica	167
5.2. Estudio 2: La capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial a lo largo del desarrollo	172
5.3. Estudio 3: Efectos de la neuromodulación frontal y parietal sobre el procesamiento y la integración numérico-espacial	185
6. DISCUSIÓN GENERAL	192
7. CONCLUSIONES	201
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	203
9. APÉNDICES	251

Índice de tablas

Tabla 1. Datos bibliográficos y principales hallazgos de los metaanálisis acerca de las bases neurales del procesamiento numérico, y el cálculo..	16
Tabla 2. Características sociodemográficas de la muestra del estudio transversal	81
Tabla 3. Caracterización de la muestra del estudio de neuromodulación.	91
Tabla 4. Datos bibliométricos y sociodemográficos de los estudios incluidos en la revisión sistemática y metaanálisis.	104
Tabla 5. Síntesis de los estudios de TMS incluidos en la revisión sistemática.	107
Tabla 6. Correspondencia entre las intensidades relativas y absolutas utilizadas en la estimulación magnética.	115
Tabla 7. Síntesis de los estudios de estimulación eléctrica incluidos en el revisión sistemática.	118
Tabla 8. Diferentes montajes utilizados en los estudios de estimulación eléctrica y disposición de los electrodos.	128
Tabla 9. Experimentos incluidos en el metaanálisis y valor estadístico de la comparación del efecto de la estimulación vs sham.	133
Tabla 10. Comparaciones por parejas de las tasas de aciertos (%) de los tres grupos de edad en el conjunto de tareas de comparación.	139
Tabla 11. Comparaciones por parejas de las tasas de aciertos (%) en cada una de las tareas de comparación, para el conjunto de la muestra.	141
Tabla 12. Comparaciones por parejas de las tasas de aciertos (%) en las diferentes magnitudes, para el conjunto de la muestra.	144
Tabla 13. Descriptivos del rendimiento (en % de aciertos) de los tres grupos de edad en cada una de las magnitudes.	147
Tabla 14. Comparaciones múltiples de los % de aciertos entre los tres grupos de edad, en cada una de las magnitudes.	148
Tabla 15. Descriptivos del rendimiento (en % de aciertos) de los tres grupos de edad en cada uno de los tipos de tareas.	151
Tabla 16. Comparaciones múltiples de las tasas de aciertos (%) entre los tres grupos de edad, en cada uno de los tipos de tareas.	151
Tabla 17. Comparaciones por parejas de los tiempos de respuesta según la condición de estimulación (prefrontal, parietal y sham) para el conjunto de tareas de comparación.	153

Tabla 18. Comparaciones por parejas de las tasas de aciertos en cada una de las siete tareas de comparación, para el conjunto de condiciones de estimulación.....	156
Tabla 19. Comparaciones por parejas de los tiempos de respuesta según la magnitud (numérica, espacial regular, y espacial irregular) para el conjunto de las condiciones de estimulación.....	158
Tabla 20. Comparaciones por parejas de los tiempos de respuesta según la estimulación (prefrontal, parietal y sham), para el conjunto de magnitudes.	159
Tabla 21. Comparaciones por parejas de las tasas de aciertos (%) según la magnitud (numérica, espacial regular y espacial irregular) para el conjunto de las condiciones de estimulación.....	161
Tabla 22. Comparaciones por parejas de los tiempos de respuesta según la condición de estimulación (prefrontal, parietal y sham) para el conjunto de tipos de tareas (uni-formato y mixtas).	164
Tabla 23. Descriptivos del rendimiento (en % de aciertos) en las tareas uni-formato y las mixtas, en el conjunto de condiciones de estimulación.....	165

Índice de figuras

Figura 1. Perspectiva interdisciplinar de la neurociencia educativa.....	1
Figura 2. Evolución del número de estudios publicados anualmente acerca del desarrollo de la cognición numérica.....	4
Figura 3. Principales factores cognitivos que inciden en el desarrollo de la competencia matemática.....	5
Figura 4. Diagrama esquemático del modelo del Triple Código de S. Dehaene.....	7
Figura 5. Representaciones del número en dos sistemas culturales-lingüísticos (español y mandarín), según el modelo del Triple Código.....	8
Figura 6. Bases neurales del procesamiento numérico según el modelo del Triple Código.....	11
Figura 7. Regiones activas durante el procesamiento numérico y el cálculo.....	12
Figura 8. Regiones implicadas en el procesamiento numérico simbólico y el cálculo..	13
Figura 9. Bases neurales del procesamiento numérico de acuerdo con las modificaciones propuestas por Faye al Modelo del Triple código.....	15
Figura 10. Ejemplo de los estímulos utilizados en los experimentos de Yousif y colaboradores.....	24
Figura 11. Regiones activadas de forma convergente al realizar tareas de rotación mental.....	27
Figura 12. Representación de la relación entre la numerosidad y otras magnitudes no-numéricas.....	32
Figura 13. Regiones comunes al procesamiento de magnitudes no-numéricas, y numéricas.....	34
Figura 14. Regiones implicadas en el procesamiento numérico simbólico, el procesamiento espacial y la aritmética.....	35
Figura 15. Convergencias entre el procesamiento numérico simbólico, la rotación mental y el cálculo.....	36
Figura 16. Interferencias entre el procesamiento de las magnitudes: espaciales, temporales y numéricas.....	37
Figura 17. Tareas de comparación numérica simbólica y no simbólica.....	41
Figura 18. Comparaciones numéricas en modalidad auditiva.....	41
Figura 19. Dependencia de la discriminación numérica con respecto a la <i>ratio</i>	43
Figura 20. Tareas mixtas de comparación numérica.....	45

Figura 21. Paradigma utilizado en la comparación de áreas individuales.....	45
Figura 22. Tareas de comparación de áreas irregulares con formas separadas o con formas unidas.....	46
Figura 23. Tareas de comparación de áreas acumuladas.....	47
Figura 24. Paradigmas utilizados para estudiar las asociaciones entre el procesamiento numérico y el procesamiento espacial.....	48
Figura 25. Montaje de las dos formas de estimulación cerebral no invasiva más comunes	52
Figura 26. Protocolos de estimulación magnética transcraneal (TMS).....	54
Figura 27. Pulsos aplicados en el protocolo de estimulación Theta burst.....	56
Figura 28. Protocolos de estimulación eléctrica transcraneal..	60
Figura 29. Montaje de los electrodos en la tDCS clásicay la tDCS multifocal.....	61
Figura 30. Modelo de campo eléctrico generado por la estimulación transcraneal de corriente directa: comparación entre la tDCS clásica y la tDCS multifocal	62
Figura 31. Dirección de la corriente eléctrica en la estimulación tDCS y procesos generados en las neuronas corticales bajo el ánodo y el cátodo.....	63
Figura 32. Acción de la estimulación por corriente directa sobre los potenciales de membrana.	65
Figura 33. Procedimiento empleado en cada ensayo de las tareas de comparación de magnitudes.....	84
Figura 34. Tareas de comparación de magnitudes	85
Figura 35. Tareas agrupadas según la magnitud: numérica, espacial regular, espacial irregular.	88
Figura 36. Tareas agrupadas según el tipo de procesamiento: simple (tareas uni-formato) o de integración (tareas mixtas).....	88
Figura 37. Tarea de comparación numérica simbólica.....	93
Figura 38. Disposición del aparato de estimulación y los electrodos en uno de los participantes.....	94
Figura 39. Montaje de los electrodos en la estimulación frontal y modelo del campo magnético generado.....	96
Figura 40. Montaje de los electrodos en la estimulación parietal y modelo del campo eléctrico generado.....	97

Figura 41. Diagrama de flujo PRISMA del proceso de selección de artículos para la revisión sistemática acerca del uso de la TMS para el estudio de la cognición numérica.	102
Figura 42. Diagrama de flujo PRISMA del proceso de selección de artículos para la revisión sistemática acerca del uso de la estimulación eléctrica para el estudio de la cognición numérica.....	103
Figura 43. Diagrama de efectos (forest plot) correspondiente a los experimentos de tDCS bilateral.	135
Figura 44. Diagramas de efectos (forest plot) de los estudios de tDCS anódica.....	136
Figura 45. Porcentajes de aciertos en cada grupo de edad, para el conjunto de tareas.	139
Figura 46. Porcentajes de acierto en cada una de las tareas de comparación, para el conjunto de la muestra.....	140
Figura 47. Porcentajes de acierto de cada tarea en cada grupo de edad.	142
Figura 48. Porcentajes de aciertos de cada tipo de tarea en cada grupo de edad.	143
Figura 49. Porcentajes de aciertos en cada magnitud para el conjunto de la muestra.	145
Figura 50. Porcentajes de aciertos de cada magnitud en cada uno de los tres grupos de edad.....	146
Figura 51. Porcentajes de aciertos de las tareas uni-formato y mixtas en el conjunto de la muestra..	149
Figura 52. Porcentajes de aciertos de cada tipo de tarea en cada uno de los tres grupos de edad.....	150
Figura 53. Tiempos de reacción en el conjunto de tareas de comparación de magnitudes, en las condiciones de estimulación: prefrontal, parietal y <i>sham</i>	154
Figura 54. Porcentajes de aciertos para cada tarea en las tres condiciones de estimulación.	155
Figura 55. Tiempos de reacción en las tareas de comparación numéricas, de áreas regulares y de áreas irregulares en las tres condiciones de estimulación.	160
Figura 56. Porcentajes de aciertos en las tareas de comparación numéricas, de áreas regulares y de áreas irregulares en las tres condiciones de estimulación.	162
Figura 57. Tiempos de reacción en las tareas uni-formato y mixtas, en el conjunto de las condiciones de estimulación.....	163
Figura 58. Tiempos de reacción en las tareas uni-formato y las mixtas, en cada una de las condiciones de estimulación.	164

Figura 59. Porcentajes de aciertos de las tareas uni-formato y mixtas en cada una de las condiciones de estimulación.....	166
Figura 60. Representación gráfica de la resolución espacial, temporal y funcional de las diferentes técnicas empleadas para el estudio de las bases neurales de los procesos cognitivos..	168
Figura 61. Modelo del Doble Sistema para el procesamiento de magnitudes: un sistema dedicado a las cantidades continuas, y otro a las discretas.....	177
Figura 62. Secuencia dinámica de la maduración cortical a lo largo del desarrollo, utilizando como indicador el volumen de sustancia gris.....	183
Figura 63. Modelo Ecológico del desarrollo de la capacidad para procesar e integrar magnitudes.....	195

Listado de abreviaturas

AG	Circunvolución angular
ANS	Sistema numérico aproximado
tACS	Estimulación eléctrica transcraneal con corriente alterna
ATOM	Teoría de la Magnitud
CA	Área acumulada de un conjunto de objetos
tDCS	Estimulación eléctrica transcraneal con corriente directa
DLPFC	Corteza prefrontal dorsolateral
EA	Área elemental de un objeto
EEG	Electroencefalograma
FuG	Circunvolución fusiforme
HD-tDCS	Estimulación eléctrica transcraneal por corriente directa multifocal o de alta resolución
HIPS	Porción horizontal del surco intraparietal
IPS	Surco intraparietal
IPL	Lóbulo parietal inferior
IFG	Circunvolución frontal inferior
IRMf	Imagen resonancia magnética funcional
IRMe	Imagen resonancia magnética estructural
MFG	Circunvolución frontal medial
MPS	Sistema general de procesamiento de magnitudes
NIBS	Estimulación cerebral no invasiva
NSUE	Efectos no significativos no reportados
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
PSPL	Lóbulo parietal posterior superior
PPC	Corteza parietal posterior
tRNS	Estimulación eléctrica transcraneal con ruido aleatorio
REML	Estimador de máxima verosimilitud restringida
SFG	Circunvolución frontal superior
SMG	Circunvolución supra marginal
SoM	Sentido de magnitud
SPL	Lóbulo parietal superior
STEM	Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas

TBS	Estimulación transcraneal banda theta
TMS	Estimulación magnética transcraneal
spTMS	Estimulación magnética transcraneal de pulso simple
pTMS	Estimulación magnética transcraneal de pulso doble
tTMS	Estimulación magnética transcraneal de pulso triple
rTMS	Estimulación magnética transcraneal repetitiva
TR	Tiempos de respuesta, tiempos de reacción
VMPFC	Corteza prefrontal ventromedial
VIPS	Porción ventral del surco intraparietal

RESUMEN

El desarrollo de la cognición numérica durante la infancia es el andamiaje sobre el que se construye el futuro desarrollo de las habilidades matemáticas de mayor alcance, como la aritmética o el álgebra. Dentro de la cognición numérica (capacidad para procesar y manejar la información cuantitativa) son importantes el procesamiento numérico básico (capacidad para discriminar cantidades numéricas) y el procesamiento espacial básico (capacidad para distinguir tamaños, longitudes, etc.). La adquisición temprana de ambas habilidades es un buen predictor del futuro desempeño matemático.

Sin embargo, dentro del campo de estudio de la cognición numérica, existe un amplio debate acerca de los sistemas neurocognitivos que subyacen a estas habilidades básicas. Concretamente se discute si los números se procesan utilizando un sistema específicamente numérico o un sistema general de procesamiento de magnitudes compartido con otras magnitudes continuas como el área, la luminosidad, la longitud, etc. A nivel de bases neurales, se sabe que tanto el procesamiento numérico como el espacial dependen de la integridad del surco intraparietal bilateral, junto con otras regiones frontoparietales. Son muchos los estudios que analizan cómo el procesamiento de las magnitudes espaciales interfiere en el procesamiento numérico, y viceversa; pero apenas se ha abordado la capacidad específica para convertir e integrar la información cuantitativa espacial y la numérica.

Esta tesis tiene como objetivo analizar el procesamiento y la integración de magnitudes espacio-numéricas mediante una doble perspectiva: cognitivo-conductual y de bases neurales. Para ello se han realizado tres estudios consecutivos: un metaanálisis acerca del uso de las técnicas estimulación cerebral no invasiva (NIBS, del inglés *Non-Invasive Brain Stimulation*) en la cognición numérica; un estudio cognitivo-conductual transversal acerca de la capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial a lo largo del desarrollo; y un experimento de neuromodulación de la excitabilidad cortical de las regiones frontoparietales sobre la capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial, por efecto de la estimulación eléctrica transcraneal.

Los resultados del metaanálisis prueban que las NIBS aplicadas sobre la corteza prefrontal y parietal tienen efectos neuromodulatorios, los cuales se traducen en cambios medibles en la cognición numérica. No obstante, la evidencia actual acerca del posible

efecto mejorador de la estimulación eléctrica transcraneal sobre las habilidades del cálculo no es concluyente. Por su parte, el estudio cognitivo-conductual muestra que las habilidades de procesamiento numérico y de procesamiento espacial ya están diferenciadas en niños de 7 años, como lo evidencian los marcadores de desempeño en las tareas de comparación de magnitudes; y que esta diferenciación sigue presente en niños de 12 años, y se perfecciona en la edad adulta. Asimismo, la integración intencional de magnitudes espacio-numéricas, dependiente de las instrucciones de la tarea, parecería una habilidad tardía que se desarrolla durante la adolescencia, como lo evidencia el idéntico desempeño en niños de 7 y 12 años, y el salto cualitativo que se da en los adultos. Además, nuestro estudio permite concluir que la estimación de áreas con formas regulares (geométricas) o con figuras irregulares (amorfas) parecen implicar sistemas cognitivos diferentes, tanto en niños como en adultos, como se evidencia por el diferente rendimiento en las tareas de comparación de áreas según la forma de las figuras, aun cuando éstas tengan idéntica superficie. Finalmente, el experimento de estimulación muestra que la neuromodulación de la corteza prefrontal dorsolateral (DLPFC, del inglés *Dorsolateral Prefrontal Cortex*) derecha mediante estimulación eléctrica transcraneal anódica produce una mejora moderada de la cognición numérica consistente en un aumento generalizado de la velocidad de respuesta en tareas de procesamiento e integración numérico-espaciales.

La combinación de los resultados de nuestros estudios, junto con los modelos teóricos preexistentes acerca del desarrollo del sistema general de procesamiento de magnitudes, unido al estado del arte acerca de las bases neurales del procesamiento numérico y el procesamiento espacial, y los datos relativos al neurodesarrollo, nos permiten avanzar una posible propuesta de un modelo explicativo del desarrollo de la capacidad para procesar e integrar las magnitudes, el cual denominamos *Modelo ecológico de desarrollo del sistema de procesamiento e integración de magnitudes*.

PALABRAS CLAVE

Cognición numérica, procesamiento espacial, sentido numérico, estimulación eléctrica transcraneal, estimulación magnética transcraneal, neuromodulación

ABSTRACT

The development of numerical cognition during childhood is the scaffolding on which the future development of more far-reaching mathematical skills, such as arithmetic or algebra, is built. Numerical cognition (ability to process and handle quantitative information), includes both: basic numerical processing (ability to discriminate numerical quantities) and basic spatial processing (ability to distinguish sizes, lengths, etc.). It has been proved that the early acquisition of both skills is a good predictor of future mathematical performance.

However, within the field of numerical cognition, there is an intense debate about the neurocognitive systems underlying these basic skills. Specifically, it is debated whether numbers are processed using a specifically numerical system or a general magnitude processing system shared with other continuous quantities such as area, lightness, length, etc. At the neural basis level, both numerical and spatial processing are known to depend on the integrity of the bilateral intraparietal sulcus, along with other frontoparietal regions. Many studies have analyzed how the processing of spatial magnitudes interferes with numerical processing, and *vice versa*; but the specific ability to convert and integrate spatial and numerical quantitative information has hardly been addressed.

The aim of this thesis is to analyze the processing and integration of spatial-numerical magnitudes from a dual perspective: cognitive-behavioral and neural. Three consecutive studies have been carried out: (1) a meta-analysis on the use of non-invasive brain stimulation techniques (NIBS) in numerical cognition; (2) a cross-sectional cognitive-behavioral study on the ability to process and integrate numerical and spatial quantitative information throughout development; and (3) a neuromodulation experiment of the cortical excitability of frontoparietal regions on the ability to process and integrate numerical and spatial quantitative information, by means of transcranial electrical stimulation.

The results of the meta-analysis prove that NIBS applied to the prefrontal and parietal cortices have neuromodulatory effects, which translate into measurable changes in numerical cognition. However, the current evidence on the possible enhancing effect of transcranial electrical stimulation on numeracy skills is inconclusive. Cognitive-behavioral research results shows that numerical processing and spatial processing skills are already differentiated in 7-year-olds, as evidenced by markers of performance in

magnitude comparison tasks; and that this differentiation is still present in 12-year-olds and is refined in adulthood. Likewise, the intentional integration of spatial-numerical magnitudes, dependent on the instructions of the task, seems to be a late skill that develops during adolescence, as evidenced by the identical performance in 7- and 12-year-olds, and the qualitative leap that occurs in adults. Furthermore, our study allows to conclude that the estimation of areas with regular (geometric) shapes or with irregular (amorphous) figures seems to involve different cognitive systems in both children and adults, as evidenced by the different performance in the area comparison tasks according to the shape of the figures, even when they have identical surfaces. Finally, the stimulation experiment shows that neuromodulation of the right DLPFC by anodal transcranial electrical stimulation produces a moderate improvement in numerical cognition consisting of a generalized increase in response speed in numerical-spatial processing and integration tasks.

The combination of the results of our studies, together with the pre-existing theoretical models about the development of the general magnitude processing system, together with the state of the art about the neural bases of numerical processing and spatial processing, and neurodevelopmental data, allow us to advance a possible proposal of an explanatory model of the development of the capacity to process and integrate magnitudes, which we call the *Ecological model of the development of the magnitude processing and integration system*.

KEYWORDS

Numerical cognition, spatial processing, number sense, transcranial electrical stimulation, neuromodulation.

1. Introducción

El desarrollo del pensamiento matemático es uno de los temas cruciales en el ámbito educativo actualmente. Desde la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) se está impulsando un área de la educación denominada STEM (abreviatura en inglés de *Science, Technology, Engineering, Maths*) que se refiere al desarrollo de las habilidades relacionadas con la ciencia, la tecnología, las matemáticas y la ingeniería (OCDE, 2015). Las sociedades altamente tecnologizadas requieren de sistemas educativos que ofrezcan profesionales fuertemente preparados en este área (Xie et al., 2015). Sin embargo, los resultados de las pruebas PISA muestran que las competencias menos desarrolladas por los estudiantes tanto españoles como latinoamericanos son las competencias relacionadas con el pensamiento matemático (OECD, 2019).

Lo anterior muestra la conveniencia de abordar la potenciación del pensamiento matemático desde nuevas estrategias. Una de ellas es el enfoque de la Neuroeducación propuesto por Tokuhamma-Espinosa (2010), que implica la integración interdisciplinar de la perspectivas neurocientífica, cognitiva y educativa (Figura 1). En este sentido, un estudio que contribuya desde la neurociencia y la cognición a esclarecer las bases del pensamiento matemático podría suponer un aporte significativo a la educación STEM.

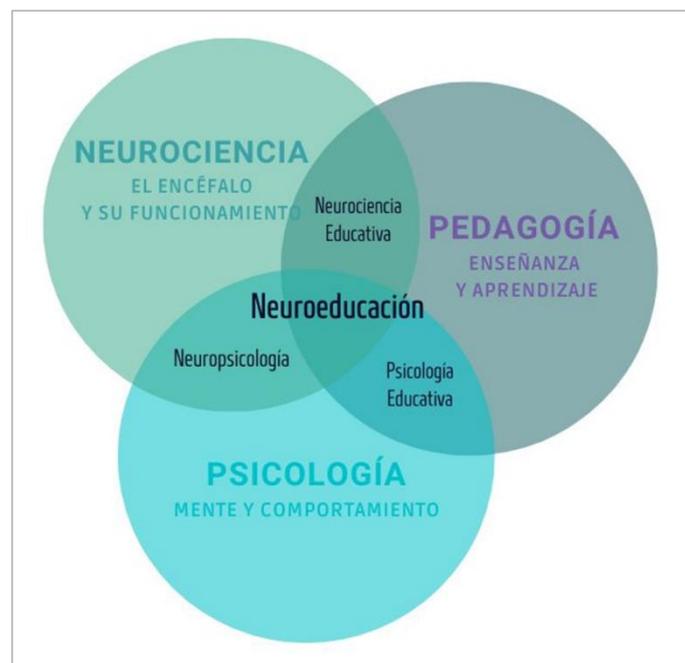


Figura 1. Perspectiva interdisciplinar de la neurociencia educativa. Adaptado de Tokuhamma-Espinosa (2010).

En relación con esto, los estudios acerca del desarrollo cognitivo muestran que el pensamiento matemático no sólo depende de las habilidades de dominio general, como las funciones ejecutivas (la atención, la inhibición, el flujo de información y la memoria de trabajo), sino que depende también y principalmente del desarrollo de habilidades de dominio específico incluidas dentro de la cognición numérica (Chen y Li, 2014; Merkley y Ansari, 2016). De hecho, hay evidencias de que aspectos básicos de la cognición numérica, como la capacidad para comparar magnitudes simbólicas (ej. “3” y “5”) y magnitudes no simbólicas (ej. *** y *****) en edades tempranas, es el andamiaje sobre el que se construye el futuro desarrollo de competencias matemáticas de mayor alcance, como la cuantificación, la aritmética o el álgebra (Schneider et al., 2017).

1.1. Cognición numérica

El término cognición numérica se refiere a los mecanismos neurales y cognitivos que subyacen a un conjunto de habilidades relacionadas con el manejo de la información cuantitativa. J.A. Lefevre lo caracteriza como una actividad mental, con claras manifestaciones conductuales relacionadas con el procesamiento numérico tales como, por ejemplo, el conteo verbal o el conteo con los dedos (LeFevre, 2016).

La cognición numérica incluye el estudio de habilidades como estimar el número de elementos de un conjunto, entender y representar los símbolos numéricos, aprender aritmética; así como el análisis de los factores que determinan la adquisición de los conceptos numéricos durante el desarrollo, y los trastornos relacionados con el aprendizaje de las matemáticas (Knops, 2019).

Se puede decir, por tanto, que la cognición numérica es un amplio campo, dentro de la neurociencia cognitiva, que estudia cómo los individuos perciben y procesan la información cuantitativa o numérica, y cómo comprenden y utilizan las nociones matemáticas.

El estudio de la cognición numérica se inició a partir de la década de los 1950, con la revolución cognitiva, pero no ha sido reconocido como campo específico de conocimiento hasta mucho más tarde. Por ejemplo, la palabra clave cognición numérica no se encuentra como tal en los buscadores académicos hasta 2014. En 1995 surgió la

revista *Mathematical Cognition*, y en 2015 el *Journal of Numerical Cognition*, lo cual ha supuesto un impacto grande para el desarrollo de esta disciplina. Actualmente la *Mathematical Cognition and Learning Society* (<https://www.the-mcls.org/>) aúna los esfuerzos internacionales en el estudio de las bases cognitivas y neurales de las representaciones mentales de las cantidades y su relación con los conceptos matemáticos.

En este momento, existen numerosos grupos de investigación que trabajan en el área de la cognición numérica, tanto desde una perspectiva filogenética como ontogenética. Desde un punto de vista evolutivo, la capacidad de cuantificar la información del entorno es fundamental para la adaptación y la supervivencia, ya que permite elegir entre una u otra opción dependiendo del número de elementos o calcular el tiempo entre dos sucesos. Hay evidencias de que la capacidad para procesar cantidades está presente no sólo en primates no humanos (Nieder y Miller, 2004), sino también en otros mamíferos como el perro (Aulet et al., 2019) y el gato (Thompson et al., 1970). También está presente en vertebrados como las aves (Ditz y Nieder, 2015; Wagener et al., 2018), los anfibios (Edwards et al., 2002, 2007) y los peces (Agrillo et al., 2008, 2017; Messina et al., 2020, 2022). Incluso estudios más recientes muestran cierta competencia matemática (entendida como la capacidad de representar, discriminar y procesar información de cantidades numéricas) en invertebrados como las abejas (Giurfa, 2019; MaBouDi et al., 2020), otros insectos (Pahl et al., 2013; Skorupski et al., 2017) y los moluscos (Yang y Chiao, 2016). Estos estudios muestran que la cognición numérica es un campo en auge dentro de la investigación filogenética.

Por otro lado, existen también numerosos estudios de corte ontogenético, los cuales analizan el desarrollo de la cognición numérica en humanos desde el nacimiento. Por ejemplo, V. Izard et al. (2009) mostraron que los niños recién nacidos, ya son capaces de discriminar a nivel perceptual si un número de objetos en la escena visual coincide con un número de sonidos. También hay evidencias de que bebés de meses, que han sido habituados a un número de objetos son capaces de distinguir y reaccionar cuando la cantidad de objetos disminuye drásticamente (Kersey y Cantlon, 2017; Ranzini et al., 2009). Por su parte, S. Dehaene (1997) explica cómo emergen, desde temprana edad, las funciones cognitivas que soportan la aparición posterior de los conceptos matemáticos en los niños. A partir de los primeros estudios que evidencian una percepción de la numerosidad en niños (Starkey y Cooper, 1980; Strauss y Curtis, 1981) y los estudios pioneros de K. Wynn (1992) sobre aritmética básica durante la primera infancia, el

número de investigaciones acerca del desarrollo de la cognición numérica ha aumentado exponencialmente, de igual modo que las investigaciones acerca de los factores que inciden en el desarrollo del pensamiento matemático. Este interés creciente por la ontogenia de la cognición numérica se refleja en la Figura 2.

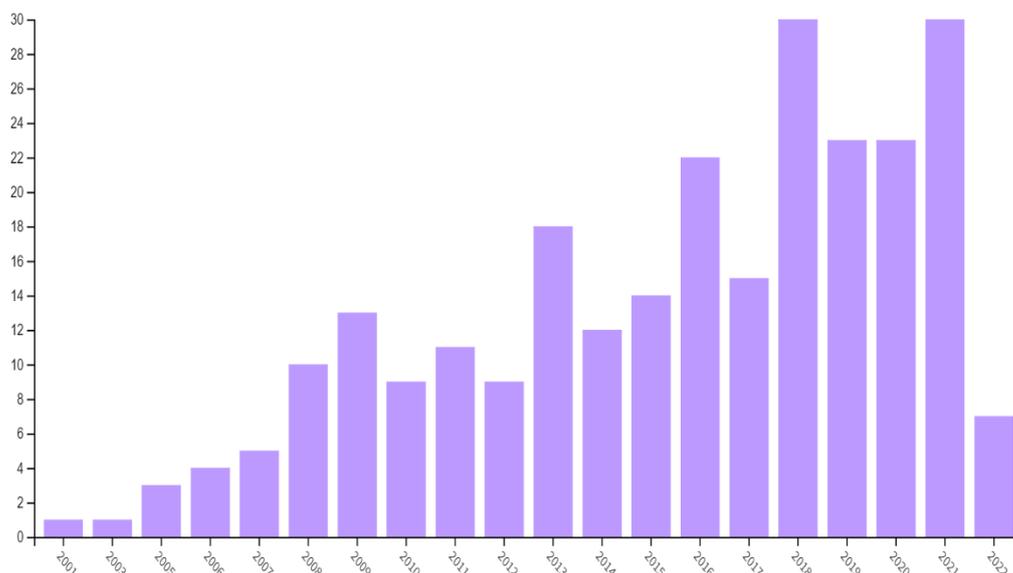


Figura 2. Evolución del número de estudios publicados anualmente acerca del desarrollo de la cognición numérica. Fuente: elaboración propia a partir de la búsqueda en la base de datos Web of Science (www.isiknowledge.com)

Actualmente, la investigación en cognición numérica se ha extendido de forma global, con grupos de investigación activos en los cinco continentes. Y se han diversificado y extendido las temáticas de estudio.

Uno de los fines principales de la investigación en cognición numérica es la aplicabilidad a la educación matemática. En el ámbito anglosajón se utilizan los términos *literacy* y *numeracy* para referirse, respectivamente, a la alfabetización y a la competencia matemática. Así como en el campo de la lecto-escritura se ha desarrollado mucho el estudio de los factores que inciden en ella, también en el ámbito de la competencia matemática se ha constituido un cuerpo bastante sólido de conocimiento acerca de los factores que inciden en su adquisición. P. Aunio y P. Rasanen (2016) propusieron un modelo operativo para el desarrollo del pensamiento matemático en niños escolares basado en cuatro grandes núcleos de habilidades: el sentido numérico simbólico y no-simbólico, la comprensión de las relaciones matemáticas, el conteo y el cálculo. El desarrollo de estas habilidades depende de varios factores. La Figura 3 muestra

esquemáticamente estos factores y los principales constructos teóricos explicativos del desarrollo de la competencia matemática.

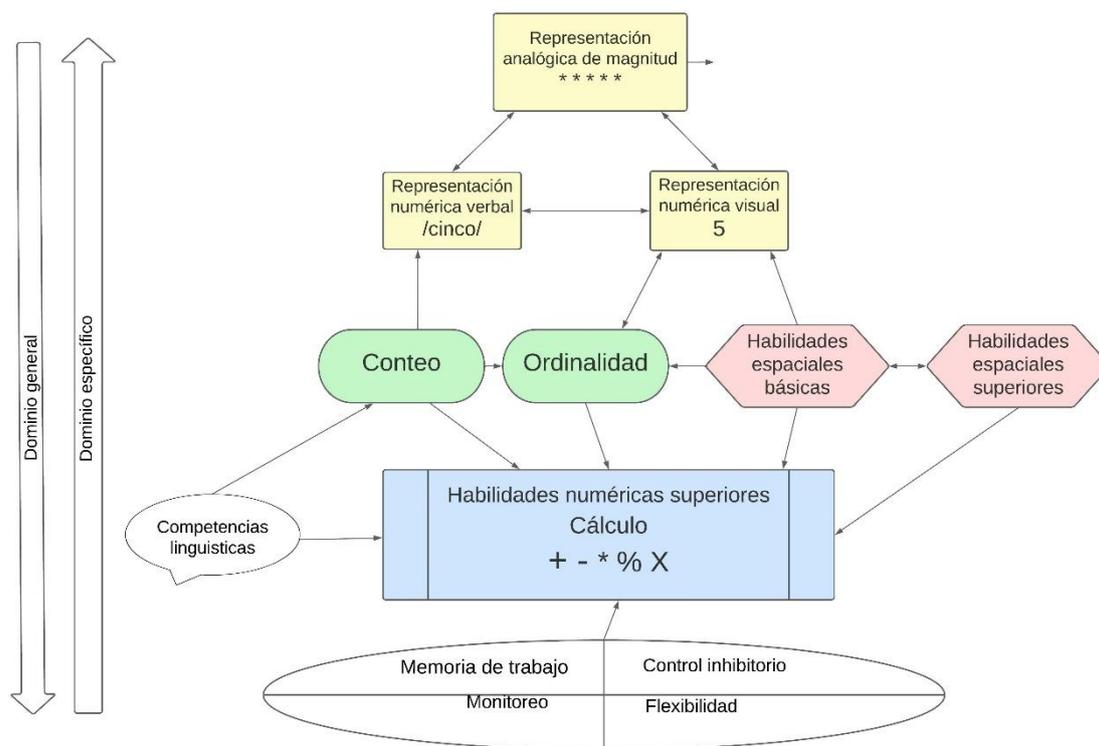


Figura 3. Principales factores cognitivos que inciden en el desarrollo de la competencia matemática. Fuente: elaboración propia a partir de Vogel y De Smedt (2021).

Como se puede observar en la figura, dentro de las habilidades cognitivas son importantes aquellas del dominio específico de la cognición numérica. A este respecto, T.S. Hyde et al. (2011), y E.S. Spelke (2011) han subrayado la existencia de un conjunto de núcleos de conocimiento innato que serían la base de los futuros aprendizajes matemáticos. Entre éstos se encuentran el procesamiento espacial y el procesamiento numérico, que como veremos a continuación, están presentes desde fases tempranas del ciclo vital, y hay evidencias de que su desarrollo está relacionado con la adquisición de la competencia matemática (Atit et al., 2021; Devlin et al., 2022; Gunderson et al., 2012).

Por lo tanto, en esta tesis, nos centraremos específicamente en el procesamiento de magnitudes, una habilidad innata que nos permite cuantificar el entorno, y que se relaciona con el desarrollo de las habilidades matemáticas. Concretamente abordaremos el procesamiento numérico, el procesamiento espacial, y la interacción entre ambos.

1.1.1. Procesamiento numérico

1.1.1.1. Sistemas cognitivos de procesamiento numérico

Dentro del pensamiento numérico se distingue entre el procesamiento numérico y el cálculo. El procesamiento numérico hace referencia a cómo representamos la información numérica, y cómo la manejamos en relación con la información cuantitativa que extraemos del entorno. Mientras que el cálculo tiene que ver con la realización de operaciones matemáticas. Se trata de dos procesos cognitivos muy relacionados. Tanto S. Dehaene (1992) como M. McCloskey (1992) argumentan que la representación numérica y el procesamiento numérico son cruciales para realizar operaciones. Cada uno de estos autores ha propuesto un modelo de procesamiento numérico; sin embargo, el modelo que más ha influido en la neurociencia cognitiva posterior, es el modelo del Triple Código de S. Dehaene (Dehaene, 1992; Dehaene et al., 2003; Dehaene y Cohen, 1995).

Se trata de un modelo cognitivo neurofuncional¹, que presupone la existencia de tres códigos para representar los números (Figura 4): un código visual arábigo, un código verbal auditivo y un código analógico de magnitud. De tal forma que el código visual permite reconocer el símbolo numérico, por ejemplo “3”; el código verbal auditivo permite reconocer la palabra “tres” y el código analógico de magnitud es el que identifica tres elementos en una escena, por ejemplo “***”.

¹ Se considera un modelo neurofuncional porque relaciona las funciones cognitivas con sus bases neurales. Es decir, considera que las funciones cognitivas son independientes cuando implican o dependen de estructuras corticales diferentes.

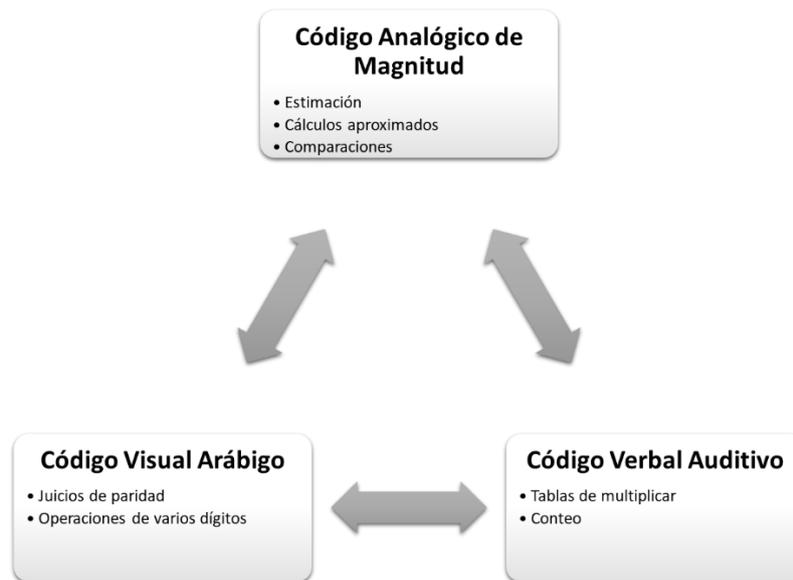


Figura 4. Diagrama esquemático del modelo del Triple Código. Fuente: Elaboración propia a partir de Dehaene y Cohen (1995).

Este modelo cognitivo se basa en tres postulados:

Postulado 1: La información numérica se puede manipular o representar según tres tipos de códigos, cada uno de ellos con unos correlatos neurales específicos: (a) un código analógico de cantidad asociado con la actividad del surco intraparietal (IPS, del inglés *Intraparietal Sulcus*) de ambos hemisferios. Los números se representan como distribuciones de actividad sobre una línea mental numérica (analógica). (b) Un código de representación verbal que implica áreas perisilvianas del hemisferio izquierdo (la circunvolución angular (AG, del inglés *Angular Gyrus*) y la porción superior del lóbulo parietal (SPL, del inglés *Superior Parietal Lobe*), en la que los números se representan como palabras. Y (c) un código de representación visual especializado en el reconocimiento de los símbolos numéricos (números arábigos) asociado a la circunvolución fusiforme (FuG, del inglés *Fusiform Gyrus*) de ambos hemisferios.

Postulado 2: El segundo postulado del modelo supone la posibilidad de traducir directamente de un código a otro mediante rutas asemánticas (transcodificación).

Postulado 3: El tercer postulado indica que la elección de uno u otro código depende del tipo de operación mental que se requiera en cada caso. Así, por ejemplo, el código visual se usa principalmente para operaciones de varios dígitos; el código verbal se usa para el conteo o para la recuperación de hechos matemáticos (ej. tablas de multiplicar); mientras

que el código analógico se utiliza para las comparaciones (Dehaene et al., 2003; Dehaene y Cohen, 1995).

Los códigos visual arábigo y verbal auditivo son códigos simbólicos y son específicos de los seres humanos alfabetizados en una cultura dada. Mientras que el código analógico de magnitud supone una representación abstracta de la cantidad y es no-simbólico; está presente en niños y adultos no alfabetizados, así como en otras especies no humanas (Feigenson et al., 2004; Nieder, 2021; Pica et al., 2004).

La información acerca de los números y cantidades, así como sus nombres, puede traducirse o transcodificarse de un formato representacional a otro; siendo el sistema analógico el que tiene la información semántica asociada a la cantidad representada por los otros dos sistemas. La Figura 5 muestra con un ejemplo las representaciones del número “cinco” en los diferentes códigos, comparando los sistemas simbólicos de dos culturas diferentes, y mostrando cómo el código analógico (no-simbólico) es el que incluye la información semántica acerca de la cantidad numérica.

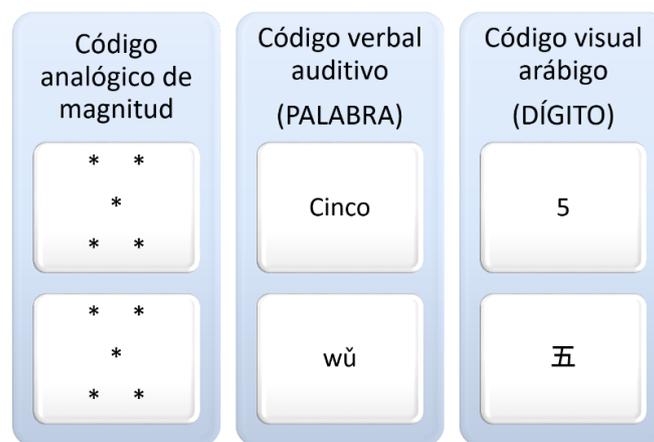


Figura 5. Representaciones del número en dos sistemas culturales-lingüísticos (español y mandarín), según el modelo del Triple Código (Dehaene y Cohen, 1995). La información semántica acerca de la cantidad es una información independiente de la cultura, y se almacena en el código analógico. Fuente: Elaboración propia.

El sistema analógico no-simbólico también es reconocido en la literatura como sentido numérico, para referirse a la capacidad de discriminar el número de elementos de un conjunto (Burr et al., 2018; Dehaene, 1997). Con independencia de que se acepte o no el modelo cognitivo del Triple Código, el sentido numérico es reconocido por la comunidad

científica como una habilidad innata y preverbal que nos permite distinguir cantidades (Siemann y Petermann, 2018b). Como ya se ha mencionado, esta capacidad está presente en seres humanos desde temprana edad (Xu y Spelke, 2000), en personas sin instrucción formal (Nys et al., 2013) y a lo largo del reino animal en invertebrados y en vertebrados no humanos (Nieder, 2021).

El sentido numérico también se ha definido como el sistema neurobiológico que permite aproximar y manipular numerosidades sin hacer uso del lenguaje o de los símbolos, entendiendo por numerosidad el número exacto o aproximado de objetos o de eventos (Wilkey y Ansari, 2020). El [Apéndice 1](#) incluye un glosario en el que se definen estos y otros términos que, si bien están muy relacionados, no son sinónimos. El sentido numérico es, por tanto, una capacidad que no depende de una modalidad sensorial en específico (Burr et al., 2018), sino que podemos discriminar, por ejemplo, el número de sonidos en una composición (ej. golpear la puerta tres veces), o el número de objetos en una escena visual (ej. fila del supermercado que tiene menos personas).

Por otro lado, las evidencias apuntan a que el sentido numérico estaría soportado por dos mecanismos cognitivos diferentes (Siemann y Petermann, 2018a): un sistema exacto para números pequeños (Piazza, 2010; Henik et al., 2012) y un sistema numérico aproximado (ANS, del inglés *Approximate Number System*) para números más grandes (Feigenson et al., 2004).

El reconocimiento exacto y automático de pequeñas cantidades de hasta tres o cuatro elementos se denomina subitización (Henik et al., 2012) y estaría basado en el sistema visual de seguimiento de objetos (Piazza, 2010).

Mientras que la estimación aproximada de cantidades más grandes se realiza por el ANS (Feigenson et al., 2004). Este sistema presenta dos características conductuales particulares, que son: el efecto distancia y el efecto tamaño (Serra-Grabulosa et al., 2010). El efecto distancia se refiere a que es más fácil discriminar cantidades cuanto mayor sea la distancia entre ellas. Por ejemplo, es más fácil discriminar entre 1 y 9, que entre 8 y 9. Por otro lado, el efecto tamaño se refiere al hallazgo de que, para igual distancia numérica, la discriminación entre dos números empeora conforme aumentan sus valores numéricos. Es decir, es más fácil distinguir entre 3 y 4 elementos, que entre 88 y 89. En conclusión, para poder discriminar dos cantidades, la distancia numérica entre ellas debe aumentar de

forma proporcional a su tamaño absoluto (Cantlon y Brannon, 2006; Nieder, 2020). Esta relación se conoce como ley de Weber-Fechner, y será explicada en detalle más adelante.

La subitización y el ANS se consideran mecanismos complementarios dentro de un único sentido numérico, al permitir, respectivamente la discriminación de números pequeños (de forma exacta) o de números grandes (de forma aproximada). En conjunto son la base que hace posible la comprensión de los principios matemáticos de cardinalidad y ordinalidad (Rapin, 2016). Además, el sentido numérico se considera crucial para el desarrollo de la aritmética, y sirve como marcador temprano para el diagnóstico de posibles dificultades del pensamiento matemático (Gray y Reeve, 2014).

Sin embargo, actualmente se está cuestionando la existencia del sentido numérico desde diversas instancias (por ejemplo, Núñez, 2017; Wilkey y Ansari, 2020). Se debate acerca de si el procesamiento numérico se realiza por un sistema específicamente numérico (el ANS), el cual detecta específicamente la numerosidad (número de elementos de un conjunto) o por un sistema general de procesamiento de magnitudes (MPS, del inglés *Magnitude Processing System*) que tiene en cuenta otras magnitudes continuas como el tamaño, la densidad o la longitud (Leibovich et al., 2017a; Leibovich y Henik, 2014)².

Éstas y otras críticas al sentido numérico serán desarrolladas en detalle en el epígrafe 1.1.3. en el que se aborda el procesamiento de magnitudes y la interacción entre el procesamiento de espacio, tiempo y número.

1.1.1.2. Bases neurales del procesamiento numérico

Anatómicamente, el IPS parece jugar un rol crucial en el sentido numérico (Piazza et al., 2004; Piazza y Izard, 2009), además de otras regiones frontales y parietales. De hecho, las alteraciones del IPS ocasionan un déficit en las capacidades de procesamiento numérico y cálculo, como se ha observado en la discalculia (Mazzocco et al., 2011; Von Aster y Shalev, 2007). Además, los estudios de neuroimagen han puesto de manifiesto que, para la realización de tareas matemáticas complejas como el álgebra o la topografía, se emplean exactamente las mismas regiones que para el procesamiento numérico básico (Amalric y Dehaene, 2018).

² También es de uso frecuente la expresión *Sentido de Magnitud* (SoM) para referirse a este procesamiento de conjunto de magnitudes, en oposición al *Sentido Numérico*.

El modelo del Triple Código, ya citado, identifica como regiones cruciales para el procesamiento numérico el IPS, la AG, el SPL y la FuG. La Figura 6 muestra la implicación del IPS de ambos hemisferios en el procesamiento numérico analógico, así como la implicación bilateral de la FuG en el código arábigo y la de la AG izquierdo en el código verbal (Dehaene, 1992; Dehaene et al., 2003; Dehaene y Cohen, 1995).

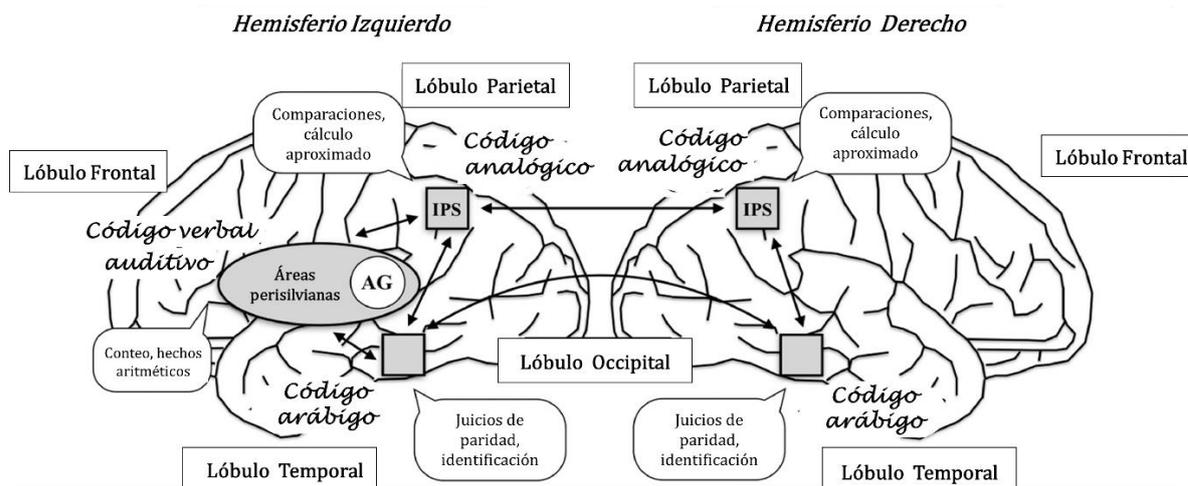


Figura 6. Bases neurales del procesamiento numérico según el modelo del Triple Código. Adaptado de Dehaene y Cohen (1995).

Durante las tres últimas décadas, se han llevado a cabo multitud de estudios de neuroimagen acerca del procesamiento numérico y el cálculo. M. Arsalidou y M.J. Taylor (2011) hicieron un metaanálisis de estudios de neuroimagen acerca de la cognición numérica, incluyendo 53 estudios de imagen por resonancia magnética funcional (IRMf) acerca del procesamiento numérico y el cálculo, entre 1990 y 2009. Para el procesamiento numérico, el metaanálisis señala la implicación del lóbulo parietal superior e inferior de ambos hemisferios, así como la circunvolución frontal medial (MFG, del inglés *Medial Frontal Gyrus*) bilateral. Mientras que, para el cálculo, las regiones implicadas incluyen, además de las utilizadas para el procesamiento numérico, otras regiones prefrontales como la corteza prefrontal dorsolateral (DLPFC, del inglés *dorsolateral prefrontal cortex*) y la frontopolar (Figura 7). Además, el estudio destaca una mayor implicación de estas regiones prefrontales a medida que aumenta la dificultad de la tarea (Arsalidou y Taylor, 2011).

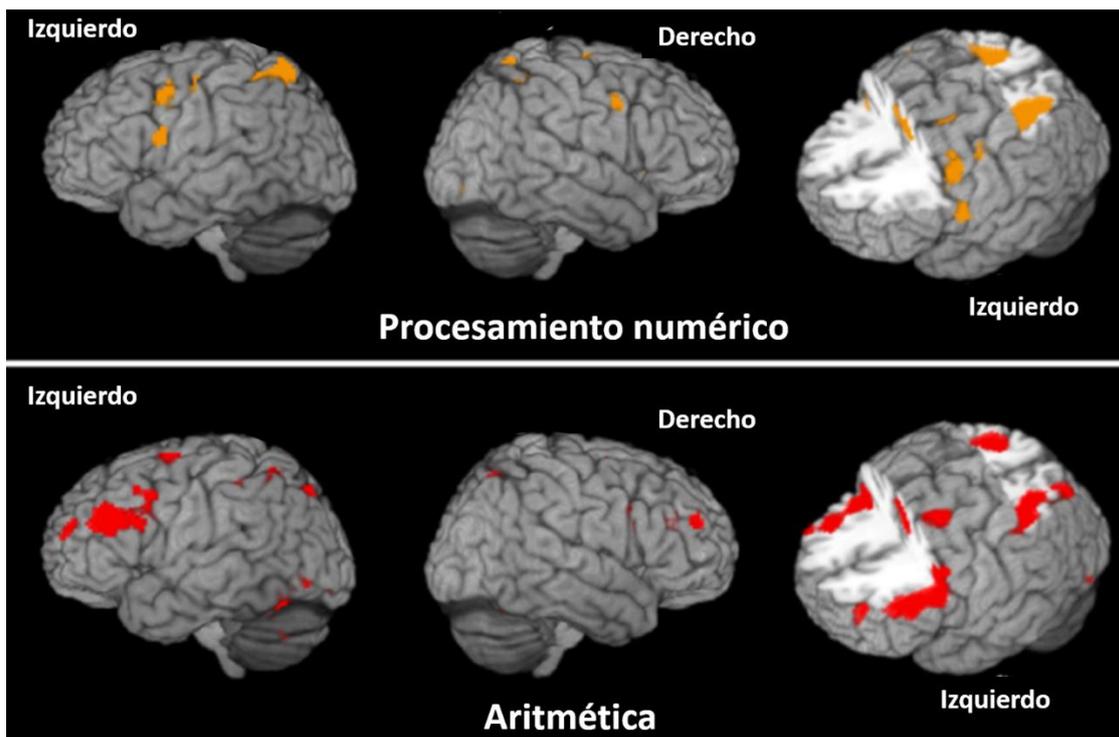


Figura 7. *Regiones activas durante el procesamiento numérico (arriba, en color naranja) y el cálculo (abajo, en color rojo). Las zonas marcadas en color indican las áreas cuya activación se reporta de forma convergente en los distintos estudios. Adaptado de Arsalidou y Taylor (2011).*

Estudios posteriores, realizados con población infantil, muestran ligeras diferencias: en niños se da una dominancia hemisférica para tareas numéricas en el hemisferio derecho, implicando el surco parietal inferior, el claustró y la ínsula, y una dominancia izquierda para tareas más complejas que implican cálculo (Arsalidou et al., 2018).

Por otro lado, el metaanálisis desarrollado por M. Sokolowski, et al. (2017a) acerca de las bases neurales del procesamiento numérico simbólico y no-simbólico, pone de relieve de forma clara la implicación de la corteza prefrontal en el procesamiento básico de magnitudes; y no sólo en el cálculo, como se pensaba anteriormente. De hecho, el metaanálisis, que incluye 57 estudios, identifica regiones comunes y distintas al procesamiento numérico simbólico y el no simbólico tanto en la corteza parietal como en la prefrontal. Las regiones identificadas como convergentes para ambos tipos de procesamiento numérico son el lóbulo parietal inferior (IPL, del inglés *Inferior Parietal Lobe*) bilateral, el precúneo bilateral, el SPL izquierdo y la circunvolución frontal superior (SFG, del inglés *Superior Frontal Gyrus*) derecha. Por el contrario, las zonas específicas del procesamiento numérico simbólico son la circunvolución supramarginal (SMG, del

inglés *Supramarginal Gyrus*) derecho, el IPL derecho, y la AG izquierda; mientras que el procesamiento numérico no-simbólico implica una red frontoparietal lateralizada derecha incluyendo el SPL, el IPL, el precúneo, la ínsula, la SFG y la circunvolución occipital medio.

Por su parte, un metaanálisis más reciente llevado a cabo por Z. Hawes et al. (2019b) muestra las regiones implicadas en el procesamiento numérico simbólico y en el cálculo (Figura 8). Como se puede apreciar, para el procesamiento numérico simbólico están implicados principalmente el IPS bilateral, así como el SPL izquierdo y el IPL derecho, además de la ínsula y el SFG. Mientras que para el cálculo se ven implicadas, además de las regiones parietales, otras del lóbulo frontal como la circunvolución frontal inferior (IFG, del inglés *Inferior Frontal Gyrus*) bilateral, la MFG bilateral y la ínsula bilateral.

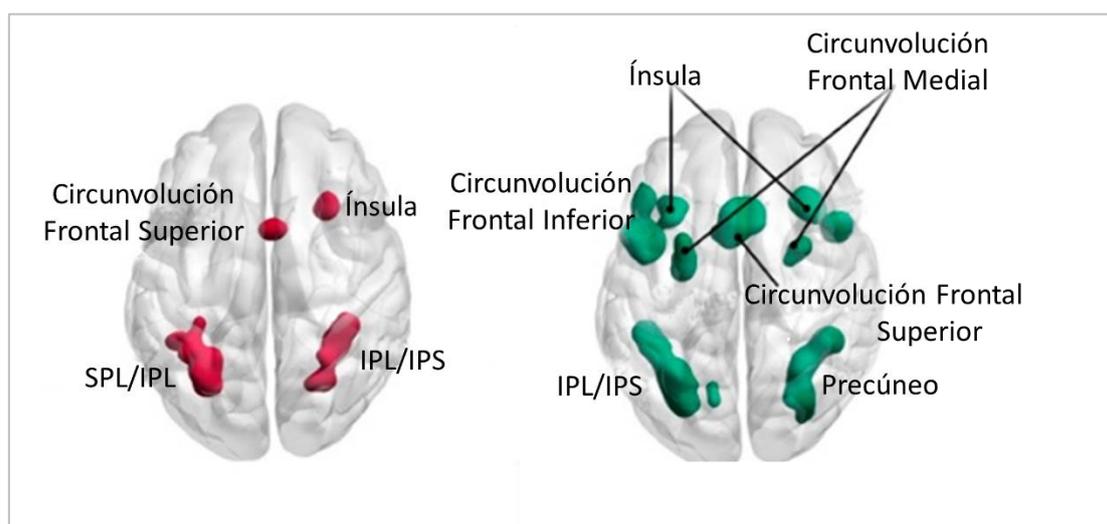


Figura 8. Regiones implicadas en el procesamiento numérico simbólico (color rojo) y el cálculo (color verde), a partir del análisis de activación convergente. D: derecha, I: izquierda. Adaptado de Hawes (2019b).

Finalmente, el metaanálisis llevado a cabo por A. Faye et al. (2019) examina las bases neurocognitivas de la cognición numérica a partir de 28 estudios de neuroimagen, 12 estudios estimulación magnética transcraneal y 12 estudios de pacientes con daño cerebral. Este estudio se enfoca en las predicciones derivadas del Modelo del Triple Código, especialmente en el código analógico de magnitud (el ANS), e incluye estudios relacionados con el procesamiento numérico simbólico y no-simbólico, y con el cálculo.

El análisis correspondiente a los estudios de IRMf muestra que el IPS bilateral y la AG izquierda están implicados tanto en el procesamiento numérico (simbólico y no-simbólico) como en el cálculo; al igual que otras regiones secundarias como el SMG bilateral, la IFG bilateral, la DLPFC izquierda y la MFG (Faye et al., 2019).

Por su parte, los estudios de estimulación magnética transcraneal permiten identificar las regiones cuya inactivación resulta crítica para el procesamiento numérico y el cálculo. El análisis de estos estudios mostró de forma clara que el procesamiento numérico (simbólico y no simbólico) se ve afectado por la estimulación del IPS bilateral, la DLPFC derecha y la corteza frontal inferior derecha (Faye et al., 2019). Lo cual apunta a una implicación crucial de estas áreas en el procesamiento numérico.

En general, los resultados encontrados por Faye et al. (2019) concuerdan con el modelo del Triple Código, ya que confirman la implicación del IPS bilateral en todas las tareas, tanto de procesamiento numérico (simbólico y no-simbólico) como de cálculo. Sin embargo, los hallazgos de neuroimagen permiten agregar un nuevo rol para el AG izquierdo, a saber, la traducción de las cantidades no simbólicas (código analógico) en dígitos arábigos (código visual). Mientras que, con base a estudios de pacientes con daño cerebral, se sugiere que, aunque ambos IPS poseen una representación analógica e independiente del formato de las cantidades numéricas, el IPS izquierdo podría mostrar una preferencia por formatos simbólicos y el IPS derecho por formatos no simbólicos. La Figura 9 muestra las regiones implicadas en el procesamiento numérico, con las adiciones propuestas por A. Faye et al. (2019) al modelo del Triple Código (Dehaene y Cohen, 1995).

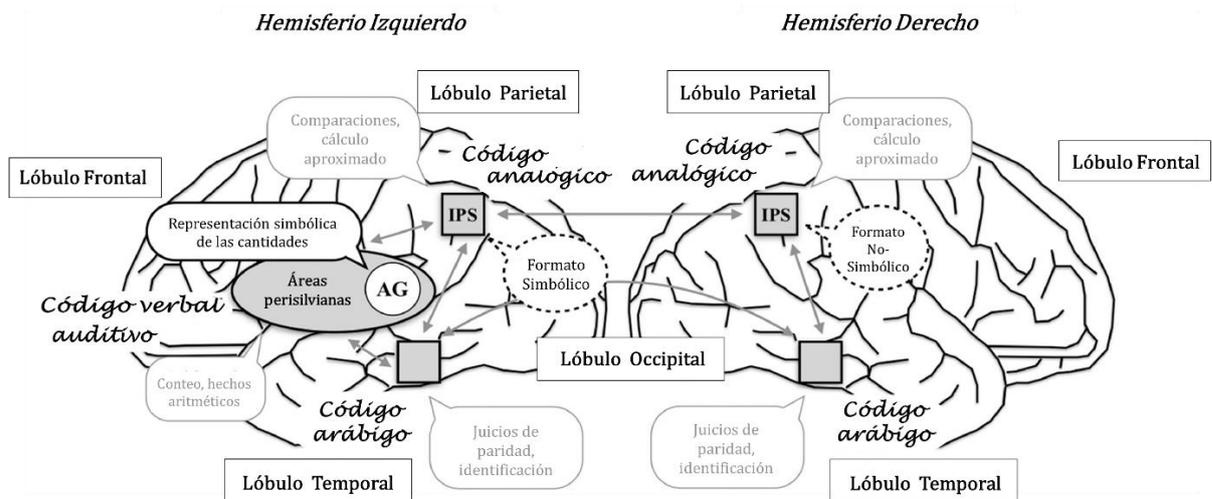


Figura 9. Bases neurales del procesamiento numérico de acuerdo con las modificaciones propuestas para el Modelo del Triple código. Adaptada de Faye (2019).

Desde otra perspectiva, los estudios de conectividad funcional convergen en la identificación de una amplia red frontoparietal, que implica también a regiones del lóbulo temporal medial, como la formación del hipocampo (Menon, 2016; Moeller et al., 2015). Mientras que los estudios de conectividad estructural señalan fibras de asociación anteroposteriores (como los fascículos longitudinales superior e inferior, y el sistema de la cápsula externa), tractos de fibras de proyección, así como fibras transcallosas comisurales que conectan los IPS de ambos hemisferios (Cantlon et al., 2011; Emerson y Cantlon, 2012; Kucian et al., 2014; Park et al., 2013, 2014).

A continuación, la Tabla 1 sintetiza las evidencias acerca de las bases neurales del procesamiento numérico, a partir de las revisiones sistemáticas y metaanálisis recientemente comentados.

Tabla 1. Datos bibliográficos y principales hallazgos de los metaanálisis acerca de las bases neurales del procesamiento numérico, y el cálculo. Fuente: Elaboración propia.

Metaanálisis	N	Procesamiento numérico	Cálculo	Procesamiento espacial	Convergencia espacial y numérico	Convergencia cálculo y numérico
Arsalidou, 2011	53	SPL, IFL, MFG	DLPFC, Frontopolar			
Arsalidou, 2018	32	IPL derecho, claustró, ínsula derecha	SFG izquierdo, MFG derecho, circunvolución cingulado derecho, insula derecha, precúneo bilateral, IPL bilateral, surco parietal inferior bilateral, AG bilateral			
Hawes, 2019b	83	<u>Simbólico</u> : SPL izquierdo, IPL derecho, SFG derecho, insula derecha <u>No-simbólico</u> : red frontoparietal lateralizada derecha: SPL, IPL, precúneo, ínsula, circunvolución frontal superior y circunvolución occipital medio <u>Ambos</u> : IPL bilateral, precúneo bilateral, SPL izquierdo, SFG derecho.	IPL izquierdo, precúneo derecho, IFG izquierdo, SFG derecho, insula bilateral, MFG bilateral	IPS bilateral	IPL bilateral, SPL izquierdo, precúneo	
Sokolowski, 2017b	57	<u>Simbólico</u> : SMG derecho, el IPL derecho, y el AG izquierdo <u>No-simbólico</u> : red frontoparietal lateralizada derecha: SPL, IPL, precúneo, ínsula, circunvolución frontal superior y circunvolución occipital medio <u>Ambos</u> : IPL bilateral, precúneo bilateral, SPL izquierdo, SFG derecho.		SPL izquierdo, IPL bilateral, IFG derecho, MFG derecha, SFG bilateral, circunvolución o precentral izquierdo, FuG izquierda, insula bilateral		
Sokolowski, 2017a	93	IPL bilateral, SPL bilateral, precúneo bilateral, MFG derecho, IFG derecho, circunvolución occipital medio bilateral, circunvolución occipital inferior izquierdo, insula bilateral, circunvolución temporal superior izquierdo.			IPL bilateral, SPL izquierdo, insula bilateral, IFG derecho, MFG derecha, SFG izquierdo, FuG izquierda	
Faye, 2019	52	<u>No-simbólico</u> : IPS bilateral, Corteza frontal inferior bilateral, SMG derecho, IFG derecho, DLPFC derecho. <u>Ambos</u> : IPS bilateral, AG izquierdo, SMG derecho, corteza frontal inferior izquierda, IFG izquierdo	IPS bilateral, AG izquierdo, SMG derecho, corteza frontal inferior bilateral, IFG izquierdo, bilateral, circunvolución temporal medial izquierdo, DLPFC derecho.			IPS bilateral, AG izquierdo, SMG derecho, IFG bilateral, DLPFC izquierdo, circunvolución temporal medial

NOTA: la N se refiere al número de artículos incluidos en cada metaanálisis. IPL: lóbulo parietal inferior, SPL: lóbulo parietal superior, IPS: surco intraparietal, AG: circunvolución angular, SMG: circunvolución supramarginal, SFG: circunvolución frontal superior, MFG: circunvolución frontal medial, IFG: circunvolución frontal inferior.

Es importante tener en cuenta que no todas las regiones convergentes identificadas en los metaanálisis están efectivamente relacionadas con la cognición numérica, sino que su implicación puede estar relacionada con otros procesos. Por ejemplo, la activación en las MFG y SFG, y la circunvolución precentral pueden achacarse al procesamiento visual y oculomotor, ya que la mayoría de las tareas utilizadas en los estudios son tareas visuales. Por otro lado, la implicación de la FuG podría deberse a la codificación de propiedades como el color, la forma o la textura de los estímulos usados; mientras que la implicación de la ínsula se sugiere que estaría vinculada a la situación experimental más que a la tareas cognitivas en sí mismas (Sokolowski et al., 2017b).

En general, podemos concluir que la implicación del lóbulo parietal en el procesamiento numérico está sólidamente fundada en multitud de estudios (Cappelletti et al., 2010; Dormal et al., 2012b; Eger et al., 2003; Fias et al., 2003; Göbel et al., 2004; Holloway et al., 2010; Cohen Kadosh et al., 2007). No obstante, cada vez son más las investigaciones que se han centrado en el estudio de la implicación de la corteza prefrontal en diferentes aspectos del procesamiento numérico (Arsalidou y Taylor, 2011; Castaldi et al., 2020; Sokolowski, et al., 2017a, 2017b). Entre otras regiones frontales, estos estudios ponen de manifiesto la importancia de la DLPFC y la corteza prefrontal ventromedial (VMPFC, del inglés *Ventromedial Prefrontal Cortex*), la circunvolución precentral y la IFG. Esta implicación de las regiones prefrontales es coherente con el hecho evidenciado de que la cognición numérica depende de interacciones intra y entre múltiples sistemas cerebrales vinculados con el control cognitivo (Obeso et al., 2013).

1.1.1.3. Importancia del procesamiento numérico para el desarrollo del pensamiento matemático

Existe un cuerpo de conocimiento sólido acerca de que el desarrollo de la cognición numérica se apoya en el perfeccionamiento del procesamiento numérico básico. Hay evidencias tanto conductuales como neuropsicológicas de que el desarrollo del procesamiento numérico durante los primeros años de vida es la base para el fortalecimiento de las habilidades matemáticas más complejas (Cantlon et al., 2009; Devlin et al., 2022; Schneider et al., 2017).

En este sentido, diferentes estudios conductuales han mostrado que el perfeccionamiento del sentido numérico durante los primeros años es la base para el futuro desarrollo de

habilidades matemáticas (Butterworth, 2005; De Smedt et al., 2009; Halberda et al., 2008; Lefevre et al., 2010; Mundy y Gilmore, 2009; Xenidou-Dervou et al., 2017).

Por otro lado, son numerosas las evidencias neurobiológicas que sustentan la importancia del procesamiento numérico temprano para el desarrollo de la cognición numérica (De Smedt et al., 2013; Geary y Moore, 2016; Kaufmann et al., 2015; Lyons y Ansari, 2015; Price y Wilkey, 2017).

Asimismo, existen evidencias de que los niños y adultos con discalculia presentan una menor precisión en el procesamiento numérico básico (Holloway y Ansari, 2009; Piazza et al., 2010; Von Aster y Shalev, 2007).

Estos estudios muestran con claridad convergente desde las diversas disciplinas que el procesamiento numérico básico es crucial para el desarrollo de la competencia matemática. Además, esta propuesta cuenta con el posible fundamento teórico en la hipótesis del reciclaje neuronal, la cual postula que las regiones y circuitos básicos del encéfalo implicadas en funciones cognitivas innatas, son reutilizadas y modificadas, gracias a procesos dependientes de la cultura para funciones cognitivas complejas específicamente humanas. Esto aplicaría tanto para los procesos de alfabetización como al desarrollo de la competencia matemática (Amalric y Dehaene, 2018; Ansari, 2008; Dehaene y Cohen, 2007).

No obstante, en los últimos años han surgido críticas respecto a la relación entre el sentido numérico y el desarrollo de las habilidades matemáticas. Al respecto, E.D. Wilkey y D. Ansari (2020) señalan las siguientes objeciones: (1) existen críticas respecto a la existencia de un sentido específicamente numérico; (2) Los sustratos neuronales del sentido numérico están más distribuidos de lo que se afirmaba tradicionalmente, lo cual complica la evidencia neurobiológica que vincula el sentido numérico con las habilidades numéricas; (3) Las medidas conductuales más comunes del sentido numérico se basan en tareas de comparación en las cuales intervienen otras demandas cognitivas, lo cual podría generar cierta confusión; Y por último, (4) el sentido numérico analógico y los sistemas numéricos simbólicos (dígitos arábigos, palabras numéricas, etc.) se basan en mecanismos neurales distintos y parecen seguir trayectorias de desarrollo independientes (Wilkey y Ansari, 2020). En el fondo la crítica de E.D. Wilkey y D. Ansari pone en tela de juicio el nexo entre el procesamiento numérico no simbólico y las habilidades numéricas simbólicas, tales como el conteo y la aritmética. Y abre la puerta a otras

consideraciones como, por ejemplo, que el precursor del pensamiento matemático no sea directamente el sentido numérico (entendido como procesamiento numérico no-simbólico) sino el procesamiento numérico simbólico o bien la capacidad de mapeo que convierte e integra las numerosidades simbólicas y las no-simbólicas. Se entiende por mapeo la capacidad para establecer la correspondencia entre una numerosidad no simbólica (por ejemplo, ***) y el número simbólico (3, tres).

De hecho, las investigaciones de M.E. Libertus et al. (2016) sugieren que la habilidad para mapear entre cantidades simbólicas y no simbólicas durante la infancia, podría ser un buen predictor del futuro desempeño matemático. Es más, estudios posteriores han mostrado que el ANS por sí solo no es un buen predictor, sino que la influencia del ANS en el desempeño matemático podría estar mediada por la capacidad de mapeo (Jang y Cho, 2018).

La tendencia actual es prestar cada vez más atención al mapeo entre diversos formatos numéricos como una habilidad esencial (Chesney y Matthews, 2018; Hurst et al., 2017; Jang y Cho, 2018; Jiménez Lira et al., 2017; Kim et al., 2018; Libertus et al., 2014, 2016; Malone et al., 2019; Odic et al., 2015; Schwartz et al., 2021; Wang et al., 2021; Yeo et al., 2019). Se trata de estudios conductuales que abordan el mapeo entre diversos formatos numéricos y su influencia en el desarrollo de la competencia matemática.

1.1.2. *Procesamiento espacial*

1.1.2.1. Sistemas cognitivos de procesamiento espacial (estimación de áreas)

La representación de las cantidades es una habilidad muy importante desde un punto de vista adaptativo. Por ejemplo, para determinar dónde hay una mayor fuente de alimento, son necesarios el procesamiento numérico (ej. número de presas) y el procesamiento espacial (tamaño de las presas). Se distingue, por tanto, entre el procesamiento de las cantidades discretas (número de elementos de un conjunto) y el procesamiento de las cantidades continuas (distancia, tamaño, longitud, etc.) (Henik et al., 2012; Leibovich y Henik, 2014; Savelkouls y Cordes, 2020). Como ya hemos visto, hay evidencias de que tanto el ser humano como otros animales representan las cantidades discretas –es decir, los números– (Halberda y Feigenson, 2008; Nieder, 2021); pero también existen evidencias de la representación de las cantidades continuas –también denominadas *extensión espacial*– como el área, el volumen, la longitud o la densidad, en seres humanos (Brannon et al., 2006; Marchant et al., 2013; Odic, 2018) y en primates no humanos (por ejemplo, Boysen et al., 2001).

En esta tesis, a efectos prácticos, utilizamos la expresión “procesamiento espacial” para referirnos al “procesamiento de la extensión espacial”, es decir, al procesamiento de las cantidades continuas espaciales³.

La cantidad numérica y la extensión espacial son dos dimensiones cuantitativas que están muy fuertemente relacionadas en el ambiente. Los trabajos pioneros de J. Piaget acerca de la ‘conservación del número’ mostraban que los niños preescolares tienden a sobreestimar los conjuntos de elementos extensos como si fueran más numerosos (Piaget y Szeminska, 1941). A partir de ahí, se han desarrollado muchos estudios que apoyan la hipótesis de que la representación del número y la representación de la extensión espacial están estrechamente relacionadas en el encéfalo humano (por ejemplo, Hubbard et al., 2005; Lourenco y Longo, 2011).

La mayoría de las investigaciones que estudian las habilidades cuantitativas de los seres humanos, se han centrado en nuestra capacidad para representar los números discretos.

³ Es importante señalar que esta tesis no se enmarca dentro de la cognición espacial (disciplina que estudia, por ejemplo, cómo nos orientamos en el espacio) sino que se refiere a un aspecto concreto de la cognición numérica que tiene que ver con la representación y la manipulación de la cantidad espacial.

Sin embargo, son muchos menos los estudios dedicados específicamente al procesamiento de la extensión espacial (Savelkouls y Cordes, 2020).

En cualquier caso, los sistemas cognitivos empleados para el procesamiento de cantidades continuas y discretas son un tema discutido en la actualidad. Los defensores de la teoría del Sentido de Magnitud (SoM, del inglés *Sense Of Magnitude*) adoptan un enfoque neopiagetiano para la representación numérica, que sugiere que la capacidad para detectar la numerosidad depende completamente de la capacidad para detectar las cantidades continuas (Gebuis y Reynvoet, 2012a, 2012b; Leibovich et al., 2017b). La premisa de este argumento es que las cantidades continuas como el área de un elemento (EA, del inglés *Elemental Area*) y el área acumulada (área total de todos los elementos en un conjunto) (CA, del inglés *Cumulative Area*) se derivan y dependen de las cualidades perceptivas del estímulo. Por lo tanto, son mucho más fáciles de detectar que el número, que, por el contrario, es una cantidad abstracta no ligada directamente a ninguna modalidad sensorial. Estos autores proponen que el procesamiento numérico depende de sistemas cognitivos de orden superior, mientras que el procesamiento espacial (como la detección del área) sería mucho más fácil, ya que se vincularía al nivel perceptivo.

De hecho, hay estudios que revelan que el ser humano es sensible a los cambios en el área acumulada de un conjunto de elementos, y también hay evidencias de que estos cambios en la estimación de la CA, afectan al rendimiento en tareas de discriminación numérica (Barth, 2008; Cordes y Brannon, 2008; Dewind y Brannon, 2012; Gebuis y Reynvoet, 2012b; Hurewitz et al., 2006; Tomlinson et al., 2020).

Respecto a la discriminación de áreas individuales (EA), existen estudios que analizan la precisión en el procesamiento de áreas (por ejemplo, un círculo o una forma amorfa) en bebés, niños y adultos; y lo comparan con la precisión en el procesamiento numérico. En conjunto, estos estudios concluyen que el procesamiento de la extensión espacial de áreas individuales es similar o incluso más preciso que el procesamiento numérico (Anderson y Cuneo, 1978; Brannon et al., 2006; Leibovich y Henik, 2014; Lourenco y Bonny, 2017). Sin embargo, S. Savelkouls y S. Cordes (2020) encontraron resultados contrarios; en adultos la discriminación en tareas espaciales resultaba más difícil que en las tareas numéricas.

Esta diversidad de resultados ha llevado a que se propongan distintos modelos explicativos para el procesamiento espacial, los cuales son mutuamente excluyentes. Los

tres principales modelos cognitivos acerca de la estimación de áreas, son el modelo de la percepción directa (Savelkouls y Cordes, 2020), el modelo de computación (Barth, 2008) y el modelo del área aditiva heurística (Yousif et al., 2020; Yousif y Keil, 2019)⁴.

Modelo de la percepción directa

Este modelo se basa en la hipótesis, consistente con la propuesta del SoM, de que el área de un conjunto de elementos es detectada directamente a nivel perceptual. Es decir, percibimos exactamente el área que es cubierta por una superficie, del mismo modo que detectamos el color o la luminosidad de los objetos. Según este modelo, el procesamiento de la extensión espacial es una abstracción directa que no requiere procesos cognitivos ulteriores, tales como sumar el área de los distintos elementos. Por lo tanto, la detección del área acumulada no requiere reconocer individualmente los elementos que componen el conjunto, de tal manera que el número de elementos del conjunto no sería relevante para el procesamiento del área acumulativa. Se trata, por tanto, de un proceso cognitivo simple (Savelkouls y Cordes, 2020).

Según este modelo, la discriminación de áreas individuales (EA) y del área acumulada en un conjunto de elementos (CA) serían procesos con una precisión similar, ya que en ambos casos son percibidos directamente, y no se requerirían demandas cognitivas especiales para el procesamiento de varias áreas.

La hipótesis de la percepción directa está apoyada por estudios que muestran que la discriminación de CA en niños, es similar para conjuntos pequeños (2 a 3 elementos) que para conjuntos grandes (10 a 15 elementos); lo que sugiere que la agudeza de CA no se ve afectada por el tamaño del conjunto (Cordes y Brannon, 2008). También está presente, como postulado de fondo, en estudios de corte neopiagetiano, los cuales argumentan la mayor dificultad del procesamiento numérico respecto al espacial en las fases iniciales del desarrollo, basándose en que la extensión espacial se percibe directamente al menos en las etapas tempranas (Gebuis y Reynvoet, 2012a, 2012b; Leibovich, et al., 2017; Mix, et al., 2002).

⁴ Tanto Savelkouls (2020) como Yousif (2019) señalan la escasez de publicaciones en relación con el procesamiento de áreas, en comparación con los abundantes estudios acerca del procesamiento numérico. Por lo tanto, las síntesis contenidas en este epígrafe no reflejan un cuerpo de conocimiento consolidado, y como tal presente de forma repetida en la literatura (síntesis que no existe); sino que responden a la síntesis propia realizada por la autora de esta tesis.

Modelo de computación

El modelo de computación propuesto por H. Barth (2008) se basa en la hipótesis de que las áreas incluidas en un conjunto se representan individualmente (EA) y luego se suman las representaciones mentales de cada una de ellas. De esta manera la CA sería la suma de las representaciones de las EA.

Basándose en investigaciones previas que sugieren que la suma mental no es un proceso completamente silencioso (Cordes et al., 2007; McCrink et al., 2007), se esperaría que cada proceso de suma aporte ruido a la representación. Por lo tanto, la precisión en la representación del CA debería disminuir a medida que aumenta el número de elementos del conjunto. Además, debido a que cada elemento adicional requiere un nuevo procesamiento, se tardará más tiempo en procesar los conjuntos que tienen muchos elementos que aquellos que contienen pocos.

Estas hipótesis se ven confirmadas por estudios que muestran que los bebés son significativamente más precisos en la discriminación del área de un solo elemento, que en la detección del área acumulada de un conjunto de elementos (Brannon et al., 2004, 2006; Cordes y Brannon, 2008). Por su parte, S. Savelkouls y S. Cordes (2020) mostraron que los adultos resolvían con más precisión y rapidez las tareas de comparación de áreas singulares, que las tareas de áreas acumuladas con pocos elementos (4 a 7), y estos a su vez se resolvían mejor y más rápido que los de muchos elementos (12 a 15); confirmando el coste adicional del procesamiento de muchas áreas y aportando evidencias al modelo de computación.

Además, H. Barth (2008) comparó los modelos cuantitativos acerca de los juicios sobre CA en una muestra de adultos, y determinó que la hipótesis sumativa (modelo de computación) era la que mejor se ajustaba a los datos obtenidos.

Modelo del área heurística

Este modelo supone que la estimación del área total de un conjunto de elementos no guarda relación con el área acumulada real (física), sino que se basa en la suma de la longitud y el ancho de los elementos del conjunto. Es decir, las estimaciones de áreas no se basan en el área real, sino en una aproximación del área, denominada *Área Aditiva*

Heurística, la cual consiste en la suma de los largos y los anchos de todos los elementos (Yousif et al., 2020; Yousif y Keil, 2019).

Según este modelo, la estimación de áreas individuales se realizaría por sistemas cognitivos diferentes a los empleados en la estimación de conjuntos de áreas. El primer caso podría deberse a procesos de percepción directa, mientras que en el segundo caso intervendrían procesos heurísticos de estimación del área, los cuales no se basan en el área percibida.

Esta propuesta se fundamenta en una serie de experimentos realizados por el grupo de investigación en Yale (Bennette et al., 2021; Yousif et al., 2020; Yousif y Keil, 2019) en los que comprobaron que la percepción del área de un conjunto de elementos se basa en una ilusión perceptiva. Es decir, los juicios psicofísicos acerca del área percibida no se relacionan con el área real sino con una aproximación heurística del área.

En estos experimentos utilizaban tareas de comparación de áreas como la que se muestra en la Figura 10, en la que se pedía a los participantes indicar en cuál de los dos lados el área total de la superficie ocupada por los círculos era mayor.

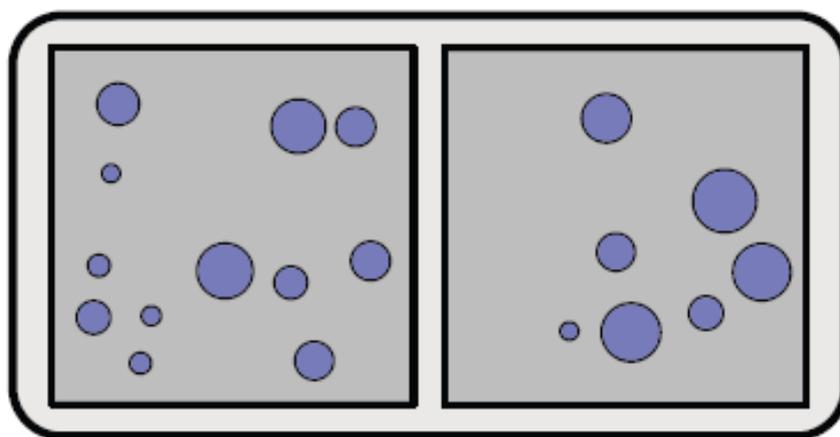


Figura 10. *Ejemplo de los estímulos utilizados en los experimentos de Yousif y colaboradores. Adaptado de Yousif (2019).*

En la figura del ejemplo parecería que es mayor el área acumulada de la izquierda; sin embargo, el área real (en número de píxeles o en milímetros cuadrados) es exactamente igual en ambos dos lados. Según los investigadores, esta ilusión perceptiva es sistemática,

y se basa en una aproximación heurística simple, que consiste en sumar las dimensiones lineales de los objetos (Yousif y Keil, 2019). En el ejemplo de la figura se sumarían los diámetros de cada círculo, resultando que en el lado de la izquierda la cantidad es mayor que en el conjunto de la derecha. O si se tratara de cuadrados, el modelo propone que para un cuadrado de 4x4, la estimación heurística del área sería 8 (suma de los dos lados) en lugar del área real 16 (producto de los lados). Los autores proponen que el sistema perceptivo visual realiza el cálculo más simple que consiste en sumar las dimensiones lineales (Yousif et al., 2019, 2020).

Las evidencias iniciales que respaldan este modelo se refieren a estudios con adultos (Yousif y Keil, 2019) y a estudios de modelos computacionales los cuales muestran que el modelo que mejor se ajusta a los datos es el que basa las estimaciones de área en el área aditiva heurística (Yousif et al., 2020).

En un reciente estudio con niños de 4 a 7 años, encontraron que la estimación de áreas acumuladas también se ajusta al modelo del área aditiva heurística cuando se usan los paradigmas tradicionales de estimación de áreas. Sin embargo, en un experimento adicional con un paradigma nuevo que controla el número de objetos y usa ratios pequeñas, observaron cierta variabilidad en las estrategias empleadas por los niños, así como limitaciones en cuanto a la comprensión del concepto de área acumulada, lo cual lleva a no considerar consistente el uso de la heurística aditiva en la estimación de áreas en niños (Yousif et al., 2022).

1.1.2.2. Bases neurales del procesamiento espacial

Así como en el procesamiento numérico distinguíamos entre los procesos básicos (sentido numérico) y otros procesos de orden superior como el cálculo, en el procesamiento espacial se puede distinguir entre las habilidades básicas (por ejemplo: estimación de tamaños) y las habilidades espaciales de orden superior como la rotación mental.

Los estudios de neuroimagen sugieren que tanto el procesamiento numérico como el procesamiento de la extensión espacial comparten sustrato neural dentro de la corteza parietal (Borghesani et al., 2019; Cohen Kadosh et al., 2005; Dormal y Pesenti, 2009; Fias et al., 2003; Fink et al., 2000; Pinel et al., 2004). Por ejemplo, P. Pinel et al. (2004) utilizaron la IRMf para investigar las regiones cerebrales implicadas en la comparación

de estímulos basándose en el número, el tamaño o el brillo de los mismos. Encontraron un solapamiento significativo de la activación en la corteza parietal provocado por las comparaciones numéricas y de tamaño, lo cual refleja la recíproca interferencia conductual observada en los paradigmas de *Stroop* numérico. Además, otros estudios de estimulación magnética transcraneal mostraron que la inactivación del IPS derecho generaba una disrupción del procesamiento numérico y también del procesamiento espacial (longitud) (Dormal et al., 2012).

A escala electrofisiológica, los trabajos con macacos han permitido identificar dentro del IPS, neuronas que responden selectivamente a la numerosidad (procesamiento numérico), otras que responden selectivamente a la longitud (procesamiento espacial), y otras que responden a ambas magnitudes (Tudusciuc y Nieder, 2007).

Por otro lado, el metaanálisis realizado por M. Sokolowski et al., (2017b), que incluye 93 estudios de IRMf, compara las regiones activadas por el procesamiento numérico simbólico, el procesamiento numérico no simbólico, el procesamiento espacial (área, longitud y altura), así como el procesamiento de otras magnitudes no-numéricas como el brillo, el peso y la duración. El estudio muestra que las regiones implicadas en el procesamiento espacial y en el procesamiento de magnitudes no numéricas, se encuentran en SPL izquierdo, IPL bilateral, IFG derecho, SFG bilateral, así como en la circunvolución precentral izquierda, FuG izquierda y la ínsula bilateral (Sokolowskiet al., 2017b).

Por su parte, Z. Hawes (2019b) analizó 28 estudios de IRMf acerca del procesamiento espacial de orden superior, en concreto la rotación mental, encontrando que las principales áreas que se activaban de manera convergente eran: precúneo derecho, SPL izquierdo, IPL izquierdo, MFG bilateral (Figura 11).

En cuanto a las variaciones a lo largo del desarrollo, L. Kaufmann et al. (2008) analizaron las regiones reclutadas para el procesamiento numérico no-simbólico y el procesamiento espacial en niños y adultos mediante IRMf. Los resultados en adultos mostraban un solapamiento para el procesamiento numérico y el espacial en regiones del SPL, mientras que en niños el patrón de activación mostraba una mayor convergencia en el SMG y en la porción lateral anterior del IPS.

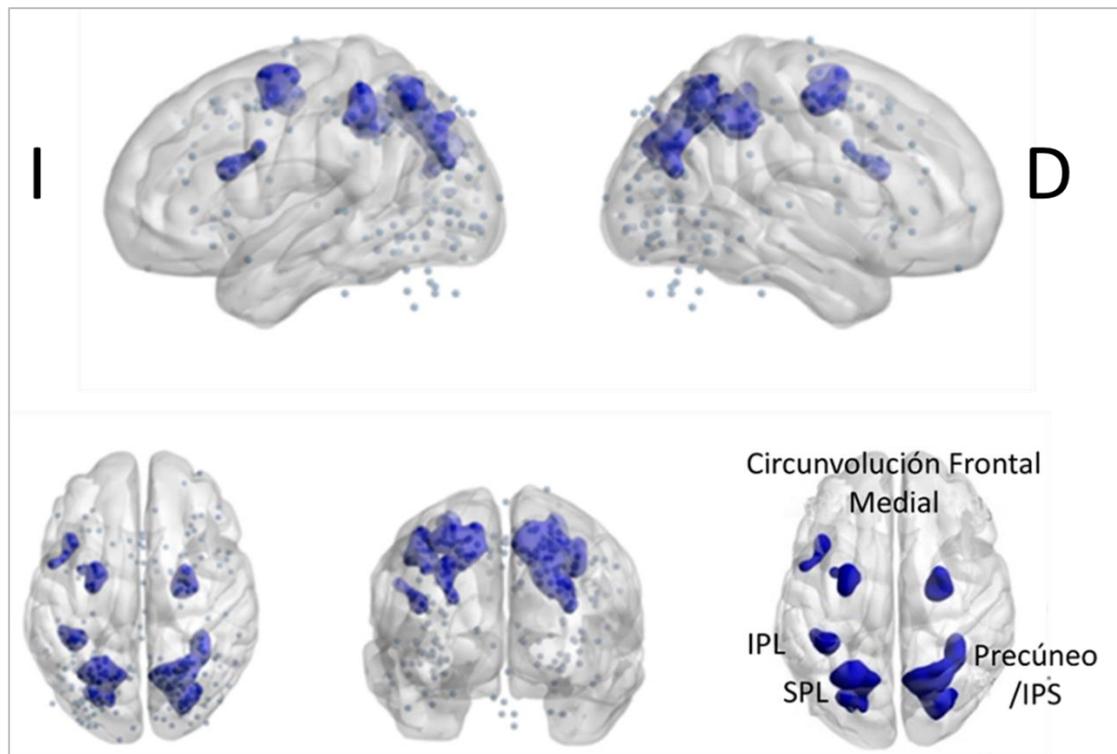


Figura 11. *Regiones activadas de forma convergente al realizar tareas de rotación mental. D: derecho, I: izquierdo. Adaptada de Hawes (2019b).*

Esta implicación de la corteza parietal tanto en el procesos espaciales básicos, como en los de orden superior es coherente con la partición funcional tradicional del procesamiento visual que propone la existencia de dos corrientes: una corriente ventral dedicada a los objetos (“ruta del qué”) y una corriente dorsal dedicada al espacio (“ruta del dónde”), ésta última relacionada principalmente con la corteza parietal posterior (Mishkin et al., 1983).

Sin embargo, también hay evidencias del rol de la corteza parietal (especialmente el IPS) en el procesamiento de magnitudes mediado por otras modalidades sensoriales como la audición (Buetti y Walsh, 2009).

1.1.2.3. Importancia del procesamiento espacial para el desarrollo del pensamiento matemático

No solo el procesamiento numérico, sino también el procesamiento espacial se desarrolla de forma temprana y está relacionado con la adquisición de la competencia matemática (Odic et al., 2013; Oudgenoeg-Paz y Mulder, 2021).

En las últimas décadas se ha investigado mucho acerca de la relación entre las habilidades espaciales y la competencia matemática (por ejemplo, Gunderson et al., 2012; Mix y Cheng, 2012), y se ha puesto de relieve la importancia de estas habilidades para el desarrollo de las STEM (Uttal et al., 2013; Verdine et al., 2017).

Sin embargo, muchos de los estudios acerca de la relación entre las habilidades espaciales y el logro matemático, muestran sólo la correlación entre estas dos variables de forma consistente a lo largo de los niveles educativos. Por ejemplo, la capacidad de rotación mental correlaciona con el razonamiento matemático en estudiantes de educación primaria (Geer et al., 2019), de educación secundaria (Delgado y Prieto, 2004), y en estudiantes universitarios (Casey et al., 1995). Aunque también hay estudios que reportan que las habilidades espaciales son predictoras del futuro desempeño matemático, incluso más allá de otros factores de dominio general como la competencia lingüística o el funcionamiento ejecutivo (Verdine et al., 2017).

En un reciente metaanálisis, K. Atit et al. (2021) rastrearon 45 investigaciones en relación con las habilidades espaciales y la competencia matemática. Utilizando modelos estadísticos de meta regresión encontraron una asociación positiva moderada entre las habilidades espaciales y la competencia matemática, sin interacción significativa del género o del nivel educativo. Adicionalmente, los resultados del metaanálisis mostraban que el razonamiento fluido y las habilidades verbales podrían mediar la relación entre las habilidades espaciales y las matemáticas, manteniéndose constante también el nexo directo entre ellas.

Por otro lado, Z. Hawes et al. (2019a) en un metaanálisis sobre la incidencia del procesamiento espacial, el procesamiento numérico y las funciones ejecutivas en el desempeño matemático, encontraron que los tres tipos de habilidades estaban relacionadas con la competencia matemática. Sin embargo, sólo el procesamiento espacial y el procesamiento numérico eran predictores del futuro desempeño matemático.

Se debe tener en cuenta que la mayoría de estos estudios relacionan el procesamiento espacial de orden superior, como la rotación mental o la visión espacial, con el desempeño matemático. Por el contrario, existen muy pocos estudios que relacionen el procesamiento espacial básico con el desempeño matemático.

En este sentido, es interesante un estudio llevado a cabo por S.F. Lourenco y J.W. Bonny (2017), con niños de 5 y 6 años, en el que analizaron el procesamiento numérico no simbólico y el procesamiento espacial básico, éste último mediante tareas de estimación de áreas acumuladas. En esta investigación comprobaron que los dos tipos de procesamiento básico (numérico y espacial) compartían marcadores conductuales como la dependencia respecto a la *ratio*, y además ambos eran predictores del desempeño matemático (Lourenco y Bonny, 2017).

En la misma línea, K. Skagerlund y U. Träff (2016) en un metaanálisis, estudiaron la contribución del procesamiento numérico, el espacial y el temporal, a las habilidades matemáticas. Encontraron que el procesamiento general de magnitudes (espacio, tiempo y número) predice la competencia matemática más allá de las funciones ejecutivas. También Odic et al. (2016) encontraron que el procesamiento del tiempo predice el desempeño matemático, al igual que el procesamiento numérico.

Se concluye, por tanto, la importancia del procesamiento espacial básico y de orden superior, para el desarrollo de la competencia matemática, así como el procesamiento de otras magnitudes no numéricas. Y se resalta la necesidad de estudios que aborden la capacidad para integrar la información cuantitativa proveniente de diversos formatos o magnitudes, así como su evolución a lo largo del desarrollo.

1.1.3. Procesamiento de magnitudes: interacciones entre espacio, tiempo y número

1.1.3.1. Del sentido numérico al sentido de magnitud

El espacio, el tiempo y el número son propiedades fundamentales del entorno, que los seres humanos y los animales utilizamos para adaptar y regular la conducta de acuerdo con el mundo exterior. El procesamiento numérico, el espacial y el temporal parecen estar tan intrínsecamente relacionados que ha tomado cuerpo la idea de que los tres estén soportados por un único mecanismo funcional. V. Walsh, en 2003, propuso la Teoría de la Magnitud (ATOM, *A Theory of Magnitude*) como un marco conceptual en el que reinterpretar los procesos corticales relacionados con estas tres dimensiones. Este modelo propone la existencia de un sistema generalizado de procesamiento de magnitudes que procesaría la cantidad numérica, la espacial y la temporal por medio de un sistema métrico común controlado por áreas de la corteza parietal (Walsh, 2003; Buetti y Walsh, 2009). Las evidencias que apoyan este modelo son de naturaleza neurofuncional, evolutiva y conductual (Crollen et al., 2013).

A nivel conductual se han reportado varias similitudes entre la discriminación de numerosidades, longitudes y tiempos, lo cual apuntaría hacia un procesamiento común. En primer lugar, la discriminación de las tres magnitudes (espacio, tiempo y número) sigue la ley de Weber-Fechner (ver epígrafe 1.1.3.4) (Crollen et al., 2013). En segundo lugar, los marcadores conductuales típicos de la discriminación numérica (el efecto tamaño y el efecto distancia, ya mencionados) también están presentes en la discriminación espacial y la temporal. Se han observado, por ejemplo, en tareas de discriminación de longitudes lineales (Dormal y Pesenti, 2007; Fias et al., 2003), de duración de secuencias (Droit-Volet et al., 2004), de tamaño físico de objetos geométricos (Fulbright et al., 2003), así como en la discriminación del tamaño físico de símbolos numéricos (Cohen Kadosh et al., 2005; Kaufmann et al., 2005; Pinel et al., 2004). Además de estas similitudes a nivel conductual, también se han identificado efectos de congruencia entre las dimensiones puramente perceptivas, y efectos de asociación entre lo percibido y los códigos de respuesta (ver glosario) (Serra-Grabulosa, 2014; Toomarian y Hubbard, 2018).

Por su parte, los estudios evolutivos muestran que la discriminación de las magnitudes mejora a lo largo del desarrollo de una manera similar entre las distintas magnitudes

(Feigenson, 2007). Por ejemplo, los niños de 6 meses tienen un desempeño análogo para la discriminación del espacio, del tiempo y del número. En concreto, son capaces de distinguir cantidades numéricas cuya diferencia es del doble a la mitad (es decir, *ratio* 1:2), y lo mismo ocurre para la duración o el tamaño de los estímulos (Brannon et al., 2006; VanMarle y Wynn, 2006; Xu y Spelke, 2000). Mientras que los niños de 9-10 meses mejoran en la precisión y logran distinguir estímulos cuya *ratio* sea de 2:3 en cualquiera de las tres magnitudes: numerosidades, áreas o tamaños (Brannon et al., 2007; Lipton y Spelke, 2003). Desde una perspectiva filogenética también se evidencian idénticos desempeños en el procesamiento de tareas de diferentes magnitudes. Por ejemplo, el desempeño en tareas de discriminación numérica es similar a la discriminación temporal, en aves y en roedores (Brannon y Roitman, 2003; Church y Meek, 1984). También los umbrales para ambas magnitudes son similares en los primates (Beran, 2007; Hauser et al., 2000), lo cual indica la posibilidad de que se compartan mecanismos neurocognitivos.

Desde una perspectiva neurofuncional, son muchas las evidencias de la convergencia del procesamiento de estas tres magnitudes en el lóbulo parietal, concretamente en el IPS. La implicación de estas áreas ha sido identificada por estudios de neuroimagen (por ejemplo Bueti y Walsh, 2009; Dormal et al., 2012; Dormal y Pesenti, 2009; Cohen Kadosh et al., 2005), por estudios de estimulación magnética transcraneal (Hayashi et al., 2013), estimulación eléctrica transcraneal (Dormal et al., 2016; Javadi et al., 2014) y en estudios electrofisiológicos en monos (Leon y Shadlen, 2003; Roitman et al., 2007; Tudusciuc y Nieder, 2007). En concreto, M. Riemer et al. (2016) sugieren que la corteza parietal posterior derecha podría albergar el procesamiento general de magnitudes.

En la misma línea de estos datos conductuales, neurobiológicos y evolutivos, está la evidencia de que el procesamiento numérico se ve influido por otras características cuantitativas no-numéricas de los estímulos. Así, T. Leibovich et al. (2017b), y T. Leibovich y A. Henik, (2014), a partir del análisis de la influencia de magnitudes continuas como el área acumulada, el área envolvente, y el perímetro total, en los juicios acerca de la numerosidad, plantearon que el procesamiento numérico en lugar de realizarse por un sistema específicamente numérico (el ANS) se realizaría por un sistema general de procesamiento de magnitudes (MPS), que no sólo tiene en cuenta la numerosidad (número de elementos en un conjunto) sino la dimensión cuantitativa de otras magnitudes continuas como el tamaño o la longitud.

El argumento se basa en que no puede existir un sentido que perciba directamente la numerosidad, ya que esta propiedad (el número de elementos de un conjunto) correlaciona con otras propiedades continuas como la densidad o el área acumulada, y por tanto no puede constituir una característica independiente (Henik et al., 2012, 2017; Leibovich et al., 2017a). En la Figura 12 se muestra cómo al aumentar el número de elementos en un conjunto, se modifican correlativamente el área acumulada y la densidad.

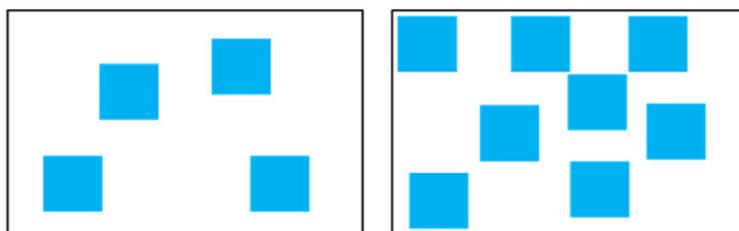


Figura 12. Representación de la relación entre la numerosidad y otras magnitudes no-numéricas. El incremento en el número de elementos (de la imagen izquierda a la derecha) implica un aumento correlativo en el área acumulada y en la densidad. Adaptado de Leibovich (2013).

Por lo tanto, es plausible que los juicios numéricos no se basen realmente en el número de elementos, sino que surjan como una ponderación de la información cuantitativa no-numérica disponible (Gebuis et al., 2016; Leibovich y Henik, 2013). De esta manera, ya no se trataría de un *Sentido Numérico* (sentido que detecta específicamente número de elementos) sino de un *Sentido de Magnitud* (que detecta la cantidad integrando varias dimensiones cuantitativas).

1.1.3.2. Bases neurales del procesamiento de magnitudes. Regiones comunes y diferentes para cada tipo de procesamiento.

Respecto al debate acerca de si los números son procesados usando un sistema específicamente numérico (como el ANS) o usando un sistema general de procesamiento de magnitudes (como el MPS), los estudios que han abordado el solapamiento neural de las regiones implicadas en el procesamiento numérico y no-numérico de magnitudes, muestran tres hallazgos principales: (a) Existen regiones comunes y no comunes para ambos tipos de procesamiento; (b) el IPS de ambos hemisferios parecería el sustrato para

el procesamiento de magnitudes; (c) el IPS derecho está más implicado en el procesamiento general de magnitudes, mientras que el IPS izquierdo está implicado en el procesamiento específicamente numérico (Kaufmann et al., 2008a; Riemer et al., 2016; Sokolowski, et al., 2017a).

En el metaanálisis de M. Sokolowski et al. (2017b) se revisan más de 90 trabajos de neuroimagen para generar un mapa de patrones de activación en relación con el procesamiento numérico simbólico, el procesamiento numérico no simbólico y el procesamiento de otras magnitudes no numéricas como el tamaño (área, longitud y altura), el brillo, el peso o la duración (tiempo). Los análisis de conjunción revelaron una activación superpuesta de magnitudes simbólicas, no-simbólicas y no numéricas en los lóbulos frontal y parietal. Los análisis de contraste revelaron una activación específica en el SPL izquierdo para magnitudes numéricas simbólicas. Por el contrario, pequeñas regiones en el precúneo bilateral se activaron específicamente para magnitudes numéricas no-simbólicas. No se activaron regiones en los lóbulos parietales para magnitudes no numéricas que no se activaran también para magnitudes numéricas. La disociación funcional más marcada encontrada en este trabajo para la corteza frontal fue la de las SFG, MFG e IFG.

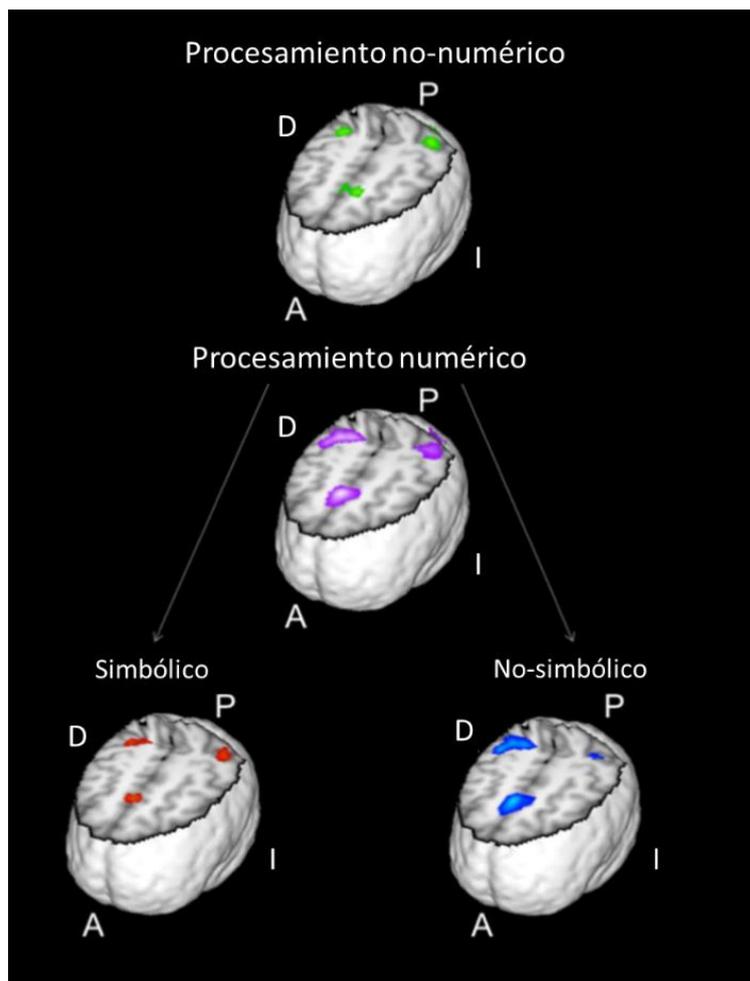


Figura 13. Regiones comunes al procesamiento de magnitudes no-numéricas (color verde), y numéricas (color morado), tanto simbólicas (color rojo) como no-simbólicas (color azul). A: anterior, P: posterior, D: derecha, I: izquierda. Adaptada de Sokolowski (2017b).

Como se puede observar en la Figura 13, las regiones comunes al procesamiento de magnitudes numéricas, y no-numéricas son: IPL bilateral, SPL izquierdo, ínsula bilateral, IFG derecho, SFG izquierdo, FuG izquierda. Por el contrario, la circunvolución precentral izquierdo se activa de forma específica en el procesamiento de magnitudes no numéricas (espacio-temporales), mientras que el SPL izquierdo se activa de forma específica por el procesamiento numérico.

Otro metaanálisis reciente de estudios de neuroimagen (Hawes et al., 2019b), se ha centrado en tres dominios cognitivos: el procesamiento numérico simbólico, el cálculo y el procesamiento espacial superior (rotación mental). Los resultados ponen de manifiesto la convergencia de una red frontoparietal en dichos dominios (Figura 14). Como

conclusión fundamental del trabajo, el IPS parece ser de crítica importancia en los tres dominios (Figura 15), mientras que la MFG, que podría incluir tanto una parte dorsolateral como una parte ventrolateral de la corteza prefrontal, podría ser relevante para el procesamiento aritmético y la rotación mental.

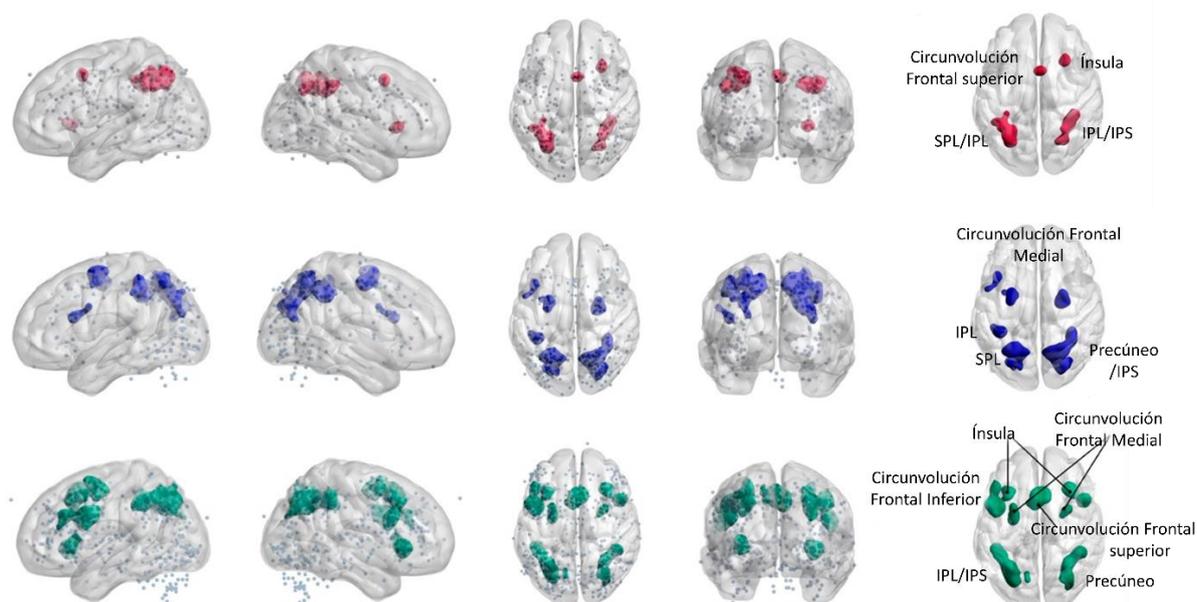


Figura 14. Regiones implicadas en el procesamiento numérico simbólico (color rojo), el procesamiento espacial (color azul) y la aritmética (color verde). Las regiones marcadas muestran las áreas de activación convergente. Adaptado de Hawes (2019b).

Según este análisis, el procesamiento numérico y el espacial, al menos en lo concerniente a las habilidades espaciales superiores como la rotación espacial, están asociados con el IPS bilateral (Figura 15).

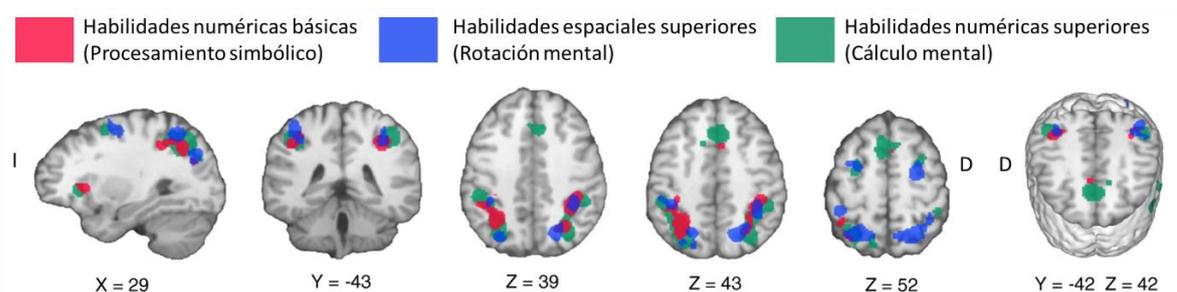


Figura 15. Imagen que muestra las convergencias entre el procesamiento numérico simbólico, la rotación mental y el cálculo, fundamentalmente en torno al IPS bilateral. D: derecha, I: Izquierda. Adaptado de Hawes y Ansari (2020).

Es importante tener en cuenta que el metaanálisis de M. Sokolowski et al. (2017b) se refiere al procesamiento básico de magnitudes, y por tanto compara las regiones comunes y diferentes del procesamiento numérico básico (por ejemplo: comparar número de elementos) y del procesamiento espacial básico (por ejemplo: comparar la longitud). Mientras que el metaanálisis de Z. Hawes et al. (2019b) tiene en cuenta el procesamiento superior de magnitudes, e incluye por tanto habilidades numéricas superiores (como el cálculo) y habilidades espaciales superiores (como la rotación mental). Considerados conjuntamente, aportan evidencia convincente (basada en más de 130 estudios de neuroimagen) de que el procesamiento numérico y el espacial están asociados con regiones superpuestas de la corteza parietal, es decir, dentro y alrededor del IPS.

Sin embargo, este solapamiento de los recursos neurales implicados en el procesamiento del número y del espacio, no implica necesariamente que las representaciones mentales de estas magnitudes estén basadas en un único código, como han puesto de relieve los estudios de IRMF de alta resolución realizados por V. Borghesani et al. (2019).

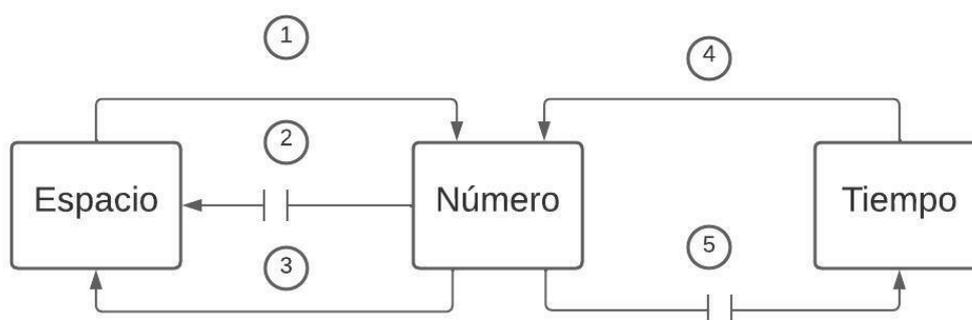
Por otro lado, S. Hamamouche y S. Cordes (2019) hicieron una revisión de literatura acerca de las evidencias a favor y en contra de ATOM, en la que concluyen que el sistema general de procesamiento de magnitudes podría dar cuenta de la representación de la cantidad en la infancia, pero no en fases más avanzadas del desarrollo, donde se diversificaría el procesamiento de cada una de las magnitudes de forma más o menos independiente, implicando distintas poblaciones neuronales dentro del IPS.

1.1.3.3. Interferencias entre el procesamiento espacial, temporal y numérico

Desde un punto de vista teórico, se ha puesto en duda la posibilidad misma de procesar independientemente las distintas magnitudes, ya que estas se dan entremezcladas en el mundo físico (Guillaume et al., 2020; Núñez, 2017).

Y desde un punto de vista experimental, hay evidencias que prueban la interferencia mutua entre el procesamiento de las distintas magnitudes (Figura 16).

Por un lado, los juicios de discriminación numérica se ven influidos por la extensión espacial de los estímulos. Así, por ejemplo, M. Guillaume et al. (2013) observaron un sesgo en los juicios numéricos debidos a la superficie total de los estímulos, mientras que A. Henik et al. (2017) probaron que el tamaño individual de los estímulos afectaba a los juicios acerca del número de elementos. Otras magnitudes que afectan al procesamiento numérico son la densidad de objetos (Dakin et al., 2011), y la extensión del espacio vacío entre objetos (Norris et al., 2018). Se pueden encontrar síntesis acerca de cómo las magnitudes continuas afectan la discriminación numérica en: Leibovich y Ansari (2017); y en Norris et al. (2018). Estas evidencias han llevado al diseño de nuevas estrategias para estudiar la precisión del sentido numérico en las que se contrabalanceen las magnitudes no numéricas de los estímulos (por ejemplo: Guillaume et al., 2020).



- ① Interferencia de la información espacial en el procesamiento numérico (Guillaume, Henik, Norris, Leibovich, Dakin)
- ② No interferencia de la información numérica en el procesamiento espacial (Dormal)
- ③ Interferencia de la información numérica en el procesamiento espacial (Savelkoul, Tomlinson)
- ④ Interferencia de la información temporal en el procesamiento numérico (Xuan, Oliveri, Dormal)
- ⑤ No interferencia de la información numérica en el procesamiento temporal (Dormal)

Figura 16. *Interferencias entre el procesamiento de las magnitudes: espaciales, temporales y numéricas. Estudios que soportan cada interacción. Fuente: Elaboración propia.*

Por otro lado, los juicios de discriminación del tiempo (duración) están influidos por atributos no temporales de los estímulos como el tamaño, el brillo o la numerosidad. Así, por ejemplo, para los estímulos de mayor tamaño tendemos a pensar que tuvieron una duración mayor (Xuan et al., 2007). También hay una influencia de los números simbólicos sobre los juicios de duración, de forma que el simple hecho de observar un dígito (ej. “7”) sesga los juicios temporales acerca de la duración del estímulo, en función de la magnitud del número (Oliveri et al., 2008). Es decir, la cantidad numérica afecta a los procesos de discriminación temporal. Estas evidencias llevan a pensar que exista un procesamiento automático de las magnitudes, de forma que se generan interferencias entre unas y otras. Curiosamente, V. Dormal et al., (2006) usando un paradigma de Stroop modificado, observaron que el número de estímulos interfería con el procesamiento temporal (juicios de duración); sin embargo, la duración de los estímulos no interfería con el procesamiento numérico (juicios de numerosidad).

En otro estudio análogo, V. Dormal y M. Pesenti (2007) analizaron las interferencias entre el procesamiento espacial y el numérico, encontrando que la longitud de los estímulos incidía fuertemente en los juicios de numerosidad. Mientras que el procesamiento espacial (juicios de longitud) no se veía afectado por el número.

Sin embargo, en un estudio reciente de S. Savelkoul y S. Cordes (2020) se encontraron evidencias de que los juicios espaciales en adultos sí se ven afectados por la numerosidad. En un experimento en el que presentaban conjuntos de puntos y se pedía que estimaran el área acumulada, los participantes tenían menos precisión y fueron más lentos en los ensayos incongruentes (en los que el conjunto más numeroso de puntos tenía el área acumulada más pequeña). Lo cual sugiere que la numerosidad influye en el procesamiento espacial. Al mismo tiempo, los resultados muestran que la numerosidad es una propiedad tan saliente como las cantidades continuas, cuestionando la afirmación de que las cantidades continuas son más fáciles de representar que las discontinuas.

El estudio de N.K. Tomlinson et al. (2020) refuerza esta idea. En él, analizaron la precisión en tareas de discriminación numérica y tareas de estimación de áreas en niños de 5 años y en adultos. En ambos casos la precisión de las tareas de numerosidad fue superior a las tareas de comparación de áreas, lo cual indica la mayor saliencia de la numerosidad respecto a las magnitudes no-numéricas. También encontraron que, en las

tareas de procesamiento espacial, los adultos eran más capaces de ignorar la información numérica irrelevante presente en los estímulos; mientras que los niños se veían más sesgados por la información numérica al hacer juicios sobre el área total. Estos resultados proporcionarían evidencia de la saliencia de la dimensión numérica incluso antes de haber iniciado la educación formal.

Todos estos estudios muestran de forma convincente la interacción entre el procesamiento numérico y el procesamiento de otras magnitudes. Sin embargo, las divergencias entre los hallazgos no permiten concluir si existe una detección automática de la cantidad numérica (sentido numérico, o ANS) o si lo que detectamos primariamente son las magnitudes no numéricas continuas como el espacio y el tiempo (MPS).

En relación con estas divergencias, hay dos estudios recientes que ponen de relieve las limitaciones de orden metodológico y teórico de los estudios que apoyan cada una de las dos opciones.

Por un lado, M. Fornaciai et al. (2019) demuestran la incidencia de las instrucciones de la tarea en los resultados acerca de la interacción entre la dimensión espacial y la temporal. Utilizaron las mismas tareas de discriminación numérica y de discriminación espacial (áreas) en dos condiciones diferentes con instrucciones particulares, encontrando resultados opuestos según las instrucciones dadas.

Por otro lado, L.S. Aulet y S.F. Lourenco (2021) alertan de la importancia de controlar las posibles variables de confusión en los estímulos visuales. En concreto, reanalizaron los datos de N.K. Tomlinson et al. (2020) controlando la variable área acumulada, y encontraron resultados opuestos a los de los autores.

En conclusión, la interacción entre el procesamiento numérico y el procesamiento espacial está probada por multitud de estudios (una buena síntesis, aunque antigua, se encuentra en el libro *Space, Time and Number in the Brain*, de S. Dehaene y E. Brannon, 2011), aunque la dirección e implicaciones de esta interacción es un tema aún en debate.

Sin embargo, es importante resaltar que toda esta evidencia se refiere a la interferencia mutua entre el procesamiento de magnitudes, pero no a la integración entre distintas magnitudes. Es decir, analizan el efecto que tiene sobre el procesamiento numérico la congruencia o incongruencia de las magnitudes continuas (tamaño, longitud, etc.); y viceversa, la interferencia de la dimensión numérica sobre el procesamiento de la

extensión espacial. Pero no analizan específicamente la capacidad para integrar la información cuantitativa espacial y la numérica. En este sentido, sería relevante plantearnos:

¿Qué ocurriría si cambiamos el paradigma de interferencia por un paradigma de integración? ¿Y si utilizamos tareas cuya ejecución requiera precisamente la integración de la información cuantitativa numérica y la espacial? ¿Cómo sería la evolución de esta capacidad a lo largo del desarrollo?

1.1.3.4. Paradigmas cognitivos utilizados para analizar el procesamiento de magnitudes: las tareas de comparación numérica

Tareas de comparación numérica

Uno de los métodos más utilizados para el estudio cognitivo-conductual del procesamiento numérico son las tareas de comparación (Guillaume y Van Rinsveld, 2018). En éstas, el sujeto debe indicar cuál de dos cantidades numéricas presentadas resulta mayor. La tarea se implementa con numerosidades en formato no simbólico (ej. *** o *****) y también con numerosidades en formato simbólico, bien sea de números arábigos (ej. “3” o “5”) o con palabras (ej. “tres” o “cinco”). La Figura 17 muestra dos ejemplos de estímulos de tareas de comparación numérica simbólica y dos ejemplos de estímulos en comparaciones no simbólicas utilizados en estudios con niños. La realización de la tarea implica la utilización de un sistema cognitivo (presumiblemente el ANS, anteriormente citado) que representa y manipula la información numérica, mientras realiza la comparación (Guillaume y Van Rinsveld, 2018).

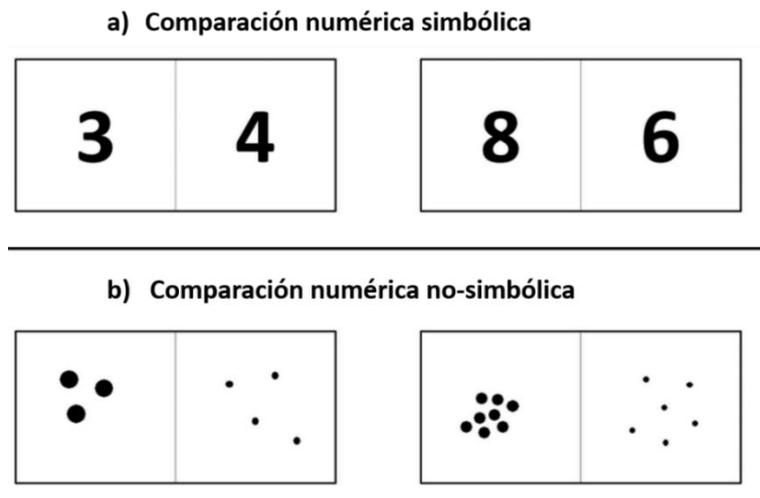


Figura 17. Tareas de comparación numérica simbólica (a) y no simbólica (b). Fuente: Adaptado de Lyons (2018).

Estas tareas se pueden aplicar en modalidad visual, como en la Figura 17, o también con estímulos auditivos (por ejemplo: Marinova et al., 2018), en el que los sujetos deben comparar el número de tonos escuchados o la palabra numérica oída, con la cantidad presentada en la pantalla (Figura 18).

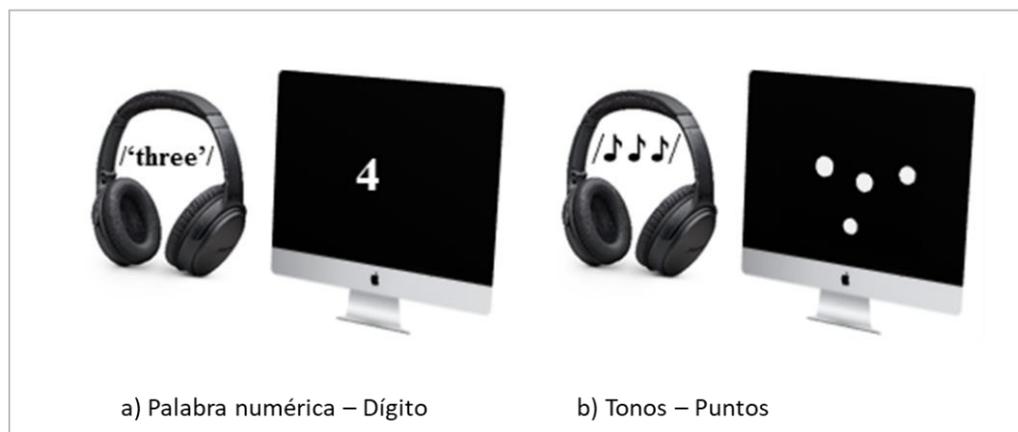


Figura 18. Comparaciones numéricas en modalidad auditiva: a) Comparación simbólica entre dígitos y palabras numéricas; b) comparación no-simbólica entre el número de tonos y el número de puntos. Adaptado de Marinova (2018).

En cualquiera de las modalidades empleadas, una propiedad especial de este sistema es la variabilidad escalar de las aproximaciones numéricas: tanto la precisión, como los tiempos de reacción en este tipo de tareas siguen la ley de Weber-Feschner (Dehaene,

2003; Gallistel y I, 2000; Platt y Johnson, 1971). Es decir, muestran el efecto tamaño y el efecto distancia. El efecto tamaño se refiere a que la discriminación se vuelve sistemáticamente menos precisa en proporción al aumento de la cantidad numérica. Mientras que el efecto distancia tiene que ver con que el rendimiento de la discriminación mejora sistemáticamente cuanto más diferentes (o distantes) son dos valores numéricos.

Estos dos efectos se relacionan matemáticamente mediante la ley de Weber, la cual afirma que la diferencia mínima perceptible entre dos estímulos, ΔI , dividido entre el valor absoluto, I , es igual a una constante, es decir, $\Delta I/I = c$ (Weber, 1905). De tal manera que para que dos cantidades sean discriminables, la distancia entre ellas tiene que aumentar en proporción a su valor absoluto, lo cual también se puede explicar diciendo que la discriminación numérica es dependiente de la proporción (Figura 19). La proporción (o *ratio*) entre dos números se define como el cociente entre el número menor y el mayor; por ejemplo, la *ratio* 0,5 se refiere a aquellas parejas de números cuya proporción es del doble a la mitad, como 3-6, 4-8, etc. La ley de Weber indica que la capacidad de discriminación disminuye a medida que aumenta la *ratio*, es decir las ratios mayores son mucho más difíciles de distinguir que las ratios pequeñas.

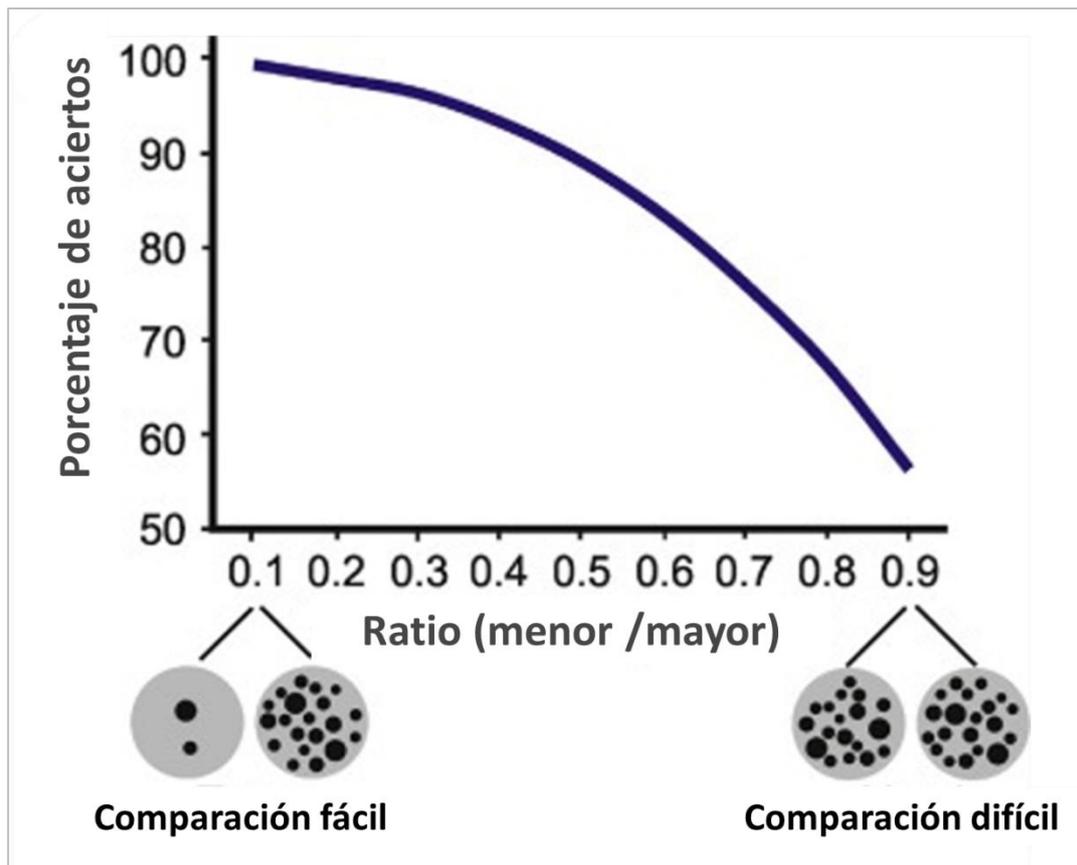


Figura 19. Dependencia de la discriminación numérica con respecto a la ratio. En tareas de comparación numérica, se observa que la precisión en la discriminación (% de aciertos) disminuye a medida que aumenta la proporción (ratio) entre dos cantidades. Adaptado de Nieder (2020).

En la parte izquierda de la Figura 19 se muestran dos cantidades numéricas cuya *ratio* es 0,1, se trata de una *ratio* muy fácil de comparar, que conlleva un 100% de aciertos. Sin embargo, en la parte derecha están representadas dos cantidades cuya *ratio* es 0,9. En este caso, se trata de una discriminación mucho más difícil, lo cual se refleja en una tasa de aciertos inferior al 60%.

La ley de Weber-Fechner⁵ se considera un marcador conductual de la capacidad de discriminación numérica. De tal manera que el valor de la constante fracción de Weber, se puede utilizar como un indicador de la agudeza del ANS. E. Piazza et al. (2004) fueron los pioneros en la evaluación de la agudeza del ANS mediante tareas de comparación, utilizando el valor de la fracción de Weber (w). Además, se ha visto que la w es un

⁵ Actualmente se conoce como ley de Weber-Fechner por las modificaciones propuestas por éste último a la ley de Weber, las cuales implican la consideración de que la sensación subjetiva de las magnitudes es proporcional al logaritmo de la magnitud objetiva.

parámetro relativamente estable cuyo valor depende del momento del ciclo vital. Es decir, a medida que avanza el desarrollo cognitivo se logran w menores (Halberda et al., 2012). Hay estudios longitudinales que muestran una tendencia a la reducción de la w a lo largo de la infancia y la adolescencia, hasta que se estabiliza en la edad adulta (Halberda et al., 2012; Piazza et al., 2013; Pica et al., 2004). También hay evidencias de que los niños con discalculia presentan valores anómalos de w en tareas de comparación simbólicas (Mazzocco et al., 2011).

A este parámetro se le ha dado mucha importancia ya que los estudios muestran que el valor de w en edades tempranas es un predictor del futuro desempeño matemático. De hecho, tanto la w de comparaciones simbólicas como la de no-simbólicas, ambas son predictoras de la competencia matemática, aunque el sentido numérico simbólico resulta ser un mejor predictor (Sasanguie et al., 2014; Schneider et al., 2017). Sin embargo el uso de este parámetro también está sujeto a controversia (ver el metaanálisis Guillaume y Van Rinsveld, 2018).

Dentro de los paradigmas utilizados para las tareas de comparación numérica no simbólicas, en los últimos años han surgido algunas propuestas informáticas para generar los estímulos controlando las posibles covariables continuas que podrían generar sesgos, por ejemplo el programa GeNEsIS (Zanon et al., 2021) y el programa NASCO (Guillaume et al., 2020).

Por otro lado, es importante tener en cuenta que la mayoría de las tareas de comparación utilizadas en los experimentos sobre cognición numérica son tareas de comparación en el mismo formato, es decir, se comparan dos numerosidades simbólicas o dos numerosidades no simbólicas. A pesar de la importancia del mapeo, existen, sin embargo, muy pocos estudios que utilicen tareas de comparación numérica mixta, en los que se comparen magnitudes simbólicas y no simbólicas. Un ejemplo de estos últimos es el paradigma utilizado por I.M. Lyons et al. (2012), representado en la Figura 20. También existe una versión en papel y lápiz, *Numeracy Screener* desarrollado por N. Nosworthy et al. (2013).

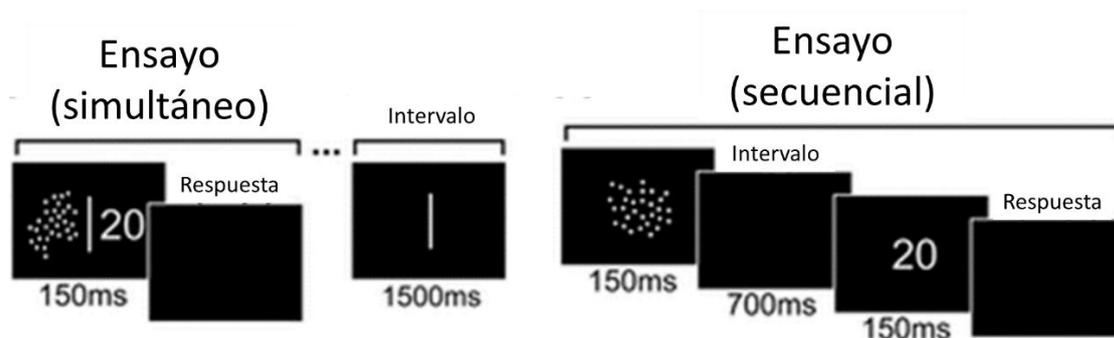


Figura 20. *Tareas mixtas de comparación numérica. A la izquierda comparación mixta simultánea y a la derecha comparación mixta secuencial. Adaptado de Lyons (2012).*

Tareas de comparación de áreas

Por otro lado, dentro del estudio del procesamiento espacial, también se han utilizado paradigmas similares a las tareas de comparación numéricas. Por ejemplo, T. Leibovich y A. Henik, (2014) utilizaron tareas de comparación de áreas continuas (EA), en las que se pide a los participantes indicar qué área -superficie- es más extensa (Figura 21).

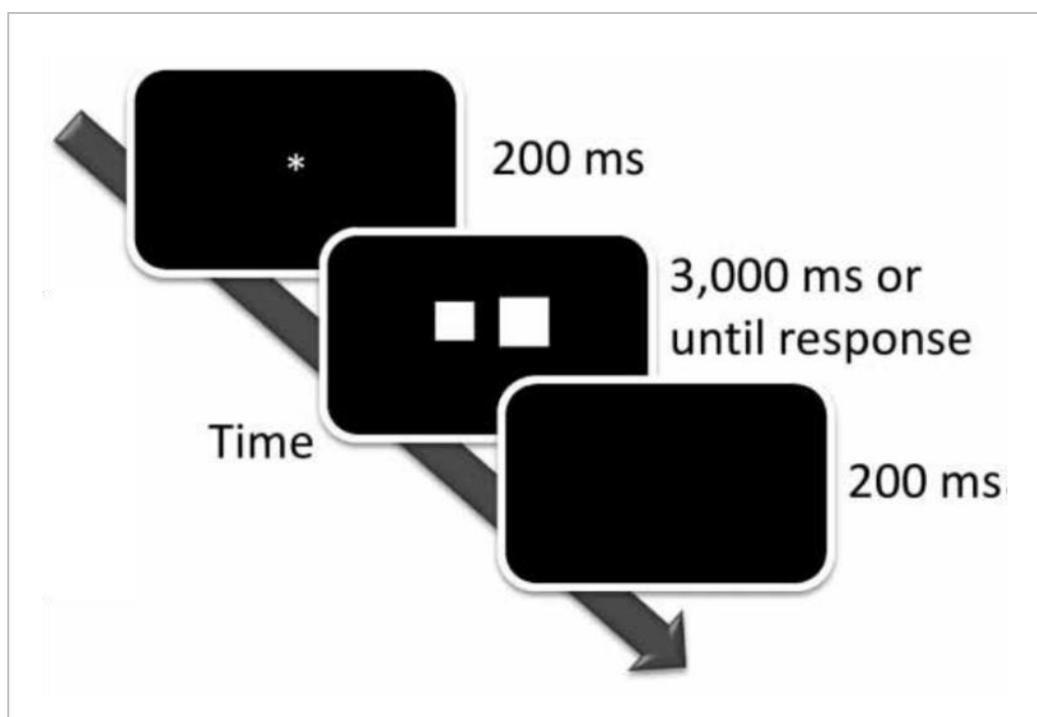


Figura 21. *Paradigma utilizado en la comparación de áreas individuales. La tarea consiste en indicar cuál de las dos áreas es mayor. Tomado de Leibovich (2014).*

Por su parte, D. Odic et al. (2018, 2013) también utilizaron tareas de comparación de áreas, pero con formas irregulares. La Figura 22 muestra los paradigmas empleados en dos experimentos diferentes.

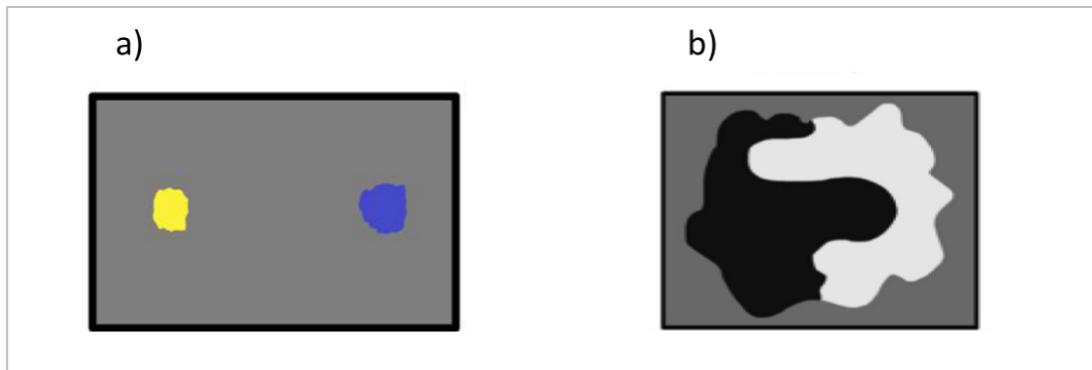


Figura 22. *Tareas de comparación de áreas irregulares con formas separadas (a) o con formas unidas (b). Adaptado de Odic (2013,2018).*

Mediante el uso de estas tareas se ha podido evidenciar que el desarrollo de la precisión en la extensión espacial (al menos en áreas continuas, EA) ocurre de forma independiente al desarrollo de la precisión numérica (Odic, 2018).

Sin embargo, uno de los paradigmas más importantes en el procesamiento de la extensión espacial lo constituyen las tareas de estimación de área acumulada, en las que se debe estimar el área total de un conjunto de elementos. Ya vimos en el epígrafe 1.1.2.1. (Figura 10) los estímulos utilizados por S.R. Yousif y F.C. Keil (2019) en los que los participantes debían estimar la CA de un conjunto de círculos. Otros investigadores como N.K. Tomlinson et al. (2020), S. Savelkouls et al. (2020) y S.F. Lourenco et al. (2012) utilizan los mismos estímulos para tareas de procesamiento numérico y para tareas de procesamiento espacial (Figura 23). En cada ensayo los participantes deben estimar cuál de los dos conjuntos de círculos tiene un área acumulada mayor.

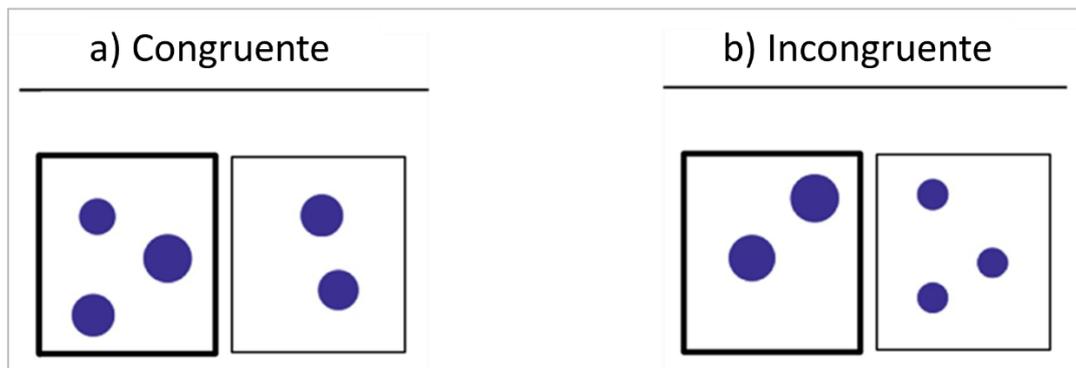


Figura 23. *Tareas de comparación de áreas acumuladas. El área acumulada es congruente con el número de elementos (a), el área acumulada es incongruente con el número de elementos (b). Adaptado de Savelkouls (2020)*

Como se puede observar en la Figura 23 el área acumulada del conjunto de círculos puede ser congruente o incongruente con la cantidad numérica. En el ensayo de la izquierda el área acumulada es congruente con el número de círculos, ya que el conjunto que contiene tres círculos tiene también el área acumulada mayor; por el contrario, en el ensayo de la derecha el área acumulada es incongruente con el número de círculos, pues el conjunto que tiene tres círculos presenta un área acumulada inferior. Este tipo de paradigmas se denominan tareas de congruencia. Y, además de servir para analizar la discriminación de áreas, se utilizan para estudiar las interferencias entre el procesamiento espacial y el numérico.

En cuanto a los marcadores conductuales de la discriminación de áreas, los resultados no son concluyentes: hay estudios que prueban que la discriminación de áreas es dependiente de la *ratio*; es decir, sigue la ley de Weber-Fechner (Odic, 2018; Savelkouls y Cordes, 2020) mientras que otros estudios prueban lo contrario (Leibovich y Henik, 2014b).

Tareas para estudiar la interacción entre el procesamiento numérico y el espacial

Algunos de los paradigmas más utilizados para el estudio del procesamiento general de las magnitudes son: la tarea de conservación del número, las tareas de congruencia y la tarea de bisección; ya que permiten evidenciar la estrecha relación entre el procesamiento numérico y el procesamiento espacial (Figura 24).

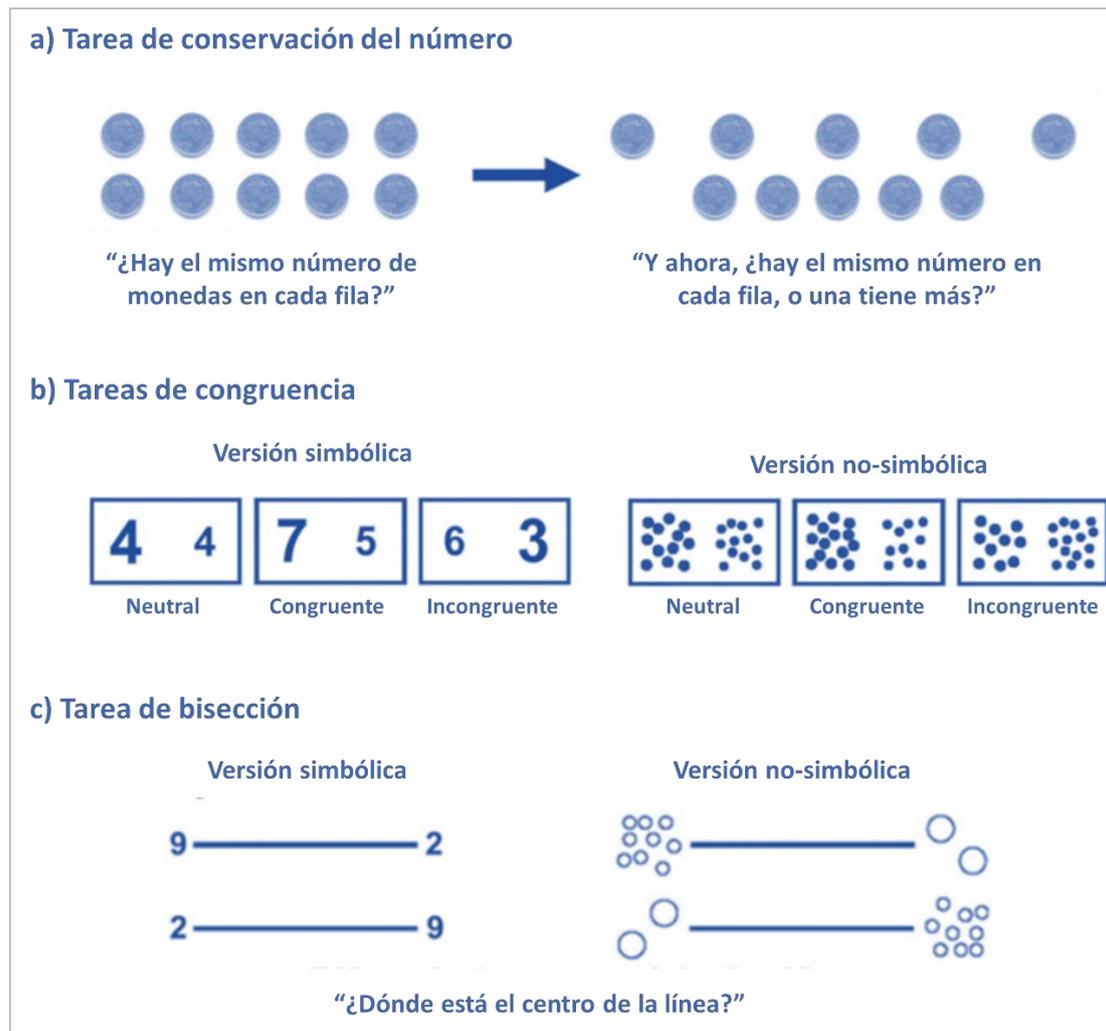


Figura 24. Paradigmas utilizados para estudiar las asociaciones entre el procesamiento numérico y el procesamiento espacial. (a) Tarea piagetiana de conservación del número; (b) Tareas de congruencia; (c) Tarea de bisección. Adaptada de Lourenco y Longo (2011).

La tarea de conservación del número es un paradigma clásico desarrollado por J. Piaget, quien observó que los niños a menudo confundían la extensión espacial con el número. En esta tarea se pide a los niños estimar el número de elementos en dos filas de objetos, que difieren en longitud (consultar descripción de la tarea en Guzmán y García Sanz, 2022). Utilizando este paradigma J. Piaget comprobó que los niños menores de 7 años tendían a considerar las filas más largas como más numerosas, llegando incluso a afirmar que la cantidad de objetos de una fila aumenta a medida que el experimentador separa los objetos (Piaget y Szeminska, 1941). Estas evidencias se interpretaban tradicionalmente como un signo de la inmadurez de razonamiento de los niños. Sin embargo, actualmente se interpretan como una evidencia a favor del procesamiento generalizado de magnitudes

al menos en las etapas iniciales, ya que esta interferencia refleja la asociación entre procesamiento espacial y el numérico (Lourenco y Longo, 2011).

Por otro lado, en las tareas de congruencia como el *Stroop* numérico (Figura 24, apartado b a la izquierda), se pide a los participantes que indiquen cuál de los dígitos presenta un tamaño físico mayor y se analiza cómo este juicio de extensión espacial puede verse afectado por la información numérica del dígito (Besner y Coltheart, 1979). Los resultados típicos muestran que los sujetos toman menos tiempo y cometen menos errores durante ensayos congruentes (el número mayor tiene un tamaño físico mayor) que en los ensayos incongruentes (el número mayor tiene un tamaño físico más pequeño). Este efecto de congruencia es un indicador de que el procesamiento de la magnitud numérica se activa de forma automática, incluso en tareas en las que se busca discriminar el tamaño físico (Henik y Tzelgov, 1982; Schwarz y Heinze, 1998; Tzelgov et al., 1992). De manera similar, un efecto de congruencia del tamaño físico en tareas en las que se pide comparar la magnitud numérica, indicaría una activación automática del procesamiento de la extensión espacial, la cual facilita o interfiere (según la congruencia) con el procesamiento numérico (Zhou et al., 2007). Este tipo de paradigmas se han utilizado en multitud de estudios que abordan la interacción entre el procesamiento espacial y el numérico desde diversas perspectivas: bases neurales, desarrollo, diferencias culturales, etc. (Algunos ejemplos recientes: Ashkenazi, 2018; Ashkenazi et al., 2009; Dadon y Henik, 2017; Hinault et al., 2019; Huang et al., 2019; Kaufmann 2008b; Kaufmann y Nuerk, 2006; Leibovich et al., 2013; Yao et al., 2015).

Finalmente, en la tarea de bisección (Figura 24, apartado c), se pide a los participantes que señalen el centro percibido de una línea física flanqueada por dos valores numéricos. En general, se observa un sesgo sistemático hacia el valor más grande, ya sea que los números se presenten simbólicamente o en forma no simbólica (de Hevia et al., 2006). Este efecto se ha usado para sugerir el nexo entre la representación mental del número y la longitud, de hecho está presente en niños de 5 y 7 años, así como en adultos (de Hevia y Spelke, 2009). Este paradigma también ha sido utilizado en muchos estudios de procesamiento de magnitudes (por ejemplo: Cattaneo et al., 2011; Gebuis y Gevers, 2011; Lourenco y Longo, 2009; Rossetti et al., 2004; Umiltà et al., 2009; Vuilleumier et al., 2004; Zorzi et al., 2002, 2005).

En conclusión, los paradigmas más comúnmente usados para estudiar el procesamiento de magnitudes utilizan marcadores conductuales (por ejemplo: el efecto de congruencia)

que evidencian la interacción entre la dimensión espacial y la numérica. Como ya se ha señalado, todos estos paradigmas analizan la interacción entre el procesamiento de diferentes magnitudes desde una perspectiva de *interferencia*. Sin embargo, hay vacíos notables en la literatura referente al estudio de la capacidad específica para la *integración* de la información cuantitativa numérica y la espacial, mediante tareas cuya ejecución requiera precisamente combinar varias magnitudes para determinar una cantidad global.

1.2. Técnicas de estimulación cerebral no invasiva (NIBS)

Las técnicas de estimulación cerebral no invasiva (NIBS, del inglés *Non-Invasive Brain Stimulation*) son un conjunto de técnicas neurofisiológicas que permiten modificar la actividad cerebral de forma segura y sin efectos secundarios (Valero-Cabré et al., 2017). Se han utilizado en estudios cognitivos para establecer relaciones entre determinadas regiones cerebrales y específicas funciones cognitivas (Walsh y Cowey, 2000). El procedimiento se basa en que la modificación de la actividad cerebral inducida por la estimulación genera unos efectos a nivel comportamental que pueden ser medidos con diferentes estrategias. De esta manera, si al estimular una región particular, que se presume relacionada con una función, se producen cambios en la función cognitiva, eso demuestra que la región es crucial para la función estudiada. En el epígrafe 1.2.3. se abordarán las ventajas del uso de las NIBS para estudios cognitivos por encima de otras técnicas como la IRMf.

Dentro de las NIBS, las técnicas más utilizadas son la estimulación magnética transcraneal y la estimulación eléctrica transcraneal. En ambos casos la estimulación se aplica sobre la superficie del cráneo y con intensidades bajas. En las primeras se aplica un campo magnético, mientras que en las segundas se aplica una corriente eléctrica. Se consideran no invasivas porque no requieren introducir quirúrgicamente los electrodos para aplicar descargas; además, son indoloras y como único efecto secundario presentan un leve cosquilleo en la zona de aplicación. Con una frecuencia inferior al 2% pueden aparecer otros efectos secundarios leves, como la cefalea o los mareos (García Sanz y Hedmont Rojas, 2023).

La Figura 25 muestra el montaje típico de las dos formas más comunes de estimulación cerebral no invasiva: la estimulación magnética transcraneal (TMS, del inglés *Transcranial Magnetic Stimulation*), y la estimulación transcraneal de corriente directa (tDCS, del inglés *Transcranial Direct Current Stimulation*). Para la TMS se coloca una bobina sobre el cráneo justo encima de la zona de la corteza que se quiere estimular. El campo magnético aplicado se traduce en fenómenos de naturaleza electrofisiológica en la zona cortical de esa región diana. Mientras que en la tDCS se aplica una corriente eléctrica de baja intensidad directamente a través de los electrodos colocados sobre el cuero cabelludo. La corriente entra en el encéfalo a través del ánodo (electrodo positivo), pasa por las regiones corticales y subcorticales y sale por el cátodo (electrodo negativo).

La estimulación cerebral no invasiva se puede utilizar como técnica de mejora cognitiva, y también con fines disruptores, en este caso se usa en investigación básica para establecer asociaciones causales entre las estructuras neurales y las funciones cerebrales.

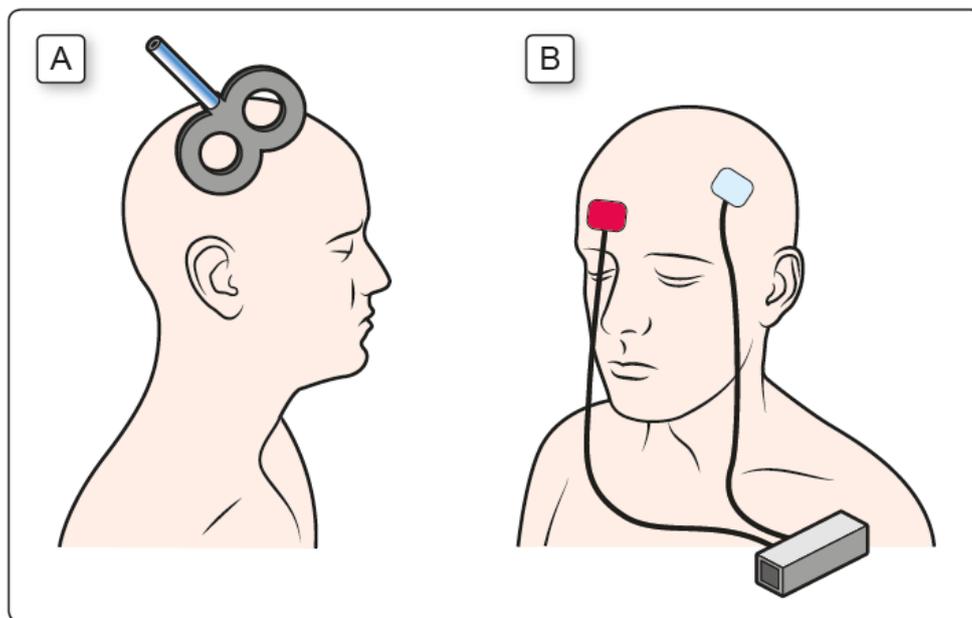


Figura 25. Montaje de las dos formas de estimulación cerebral no invasiva más comunes: (A) Estimulación magnética transcraneal y (B) Estimulación eléctrica transcraneal de corriente directa. Tomado de García Sanz (2023).

1.2.1. Estimulación magnética transcraneal

1.2.1.1. Descripción de la técnica

La estimulación magnética consiste en la aplicación de un campo magnético por medio de una bobina de estimulación que se coloca sobre el cráneo (Walsh y Cowey, 2000). La bobina se sitúa sobre el cuero cabelludo justo encima de la región de la corteza que se quiere estimular. La corriente que fluye en la bobina de TMS produce un campo magnético que dura alrededor de un milisegundo. El campo magnético penetra fácilmente a través del cráneo, y genera, mediante un proceso de inducción electromagnética, una corriente eléctrica justo debajo del hueso, directamente sobre la corteza cerebral (Dayan et al., 2013). Esta corriente afecta al tejido cortical subyacente produciendo efectos inmediatos sobre la excitabilidad neuronal, así como efectos plásticos asociados a la modificación sináptica.

La TMS activa los axones neuronales en la corteza y la sustancia blanca subcortical, sin afectar a los cuerpos celulares de las neuronas corticales (Ridding y Rothwell, 2007). Este tipo de estimulación suprime las señales neuronales o genera ruido neuronal aleatorio; en cualquier caso, sus efectos dependen de la actividad neuronal subyacente previa, de tal forma que afectan especialmente a los grupos neuronales que se encontraban activos, cambiando el equilibrio entre la excitación y la inhibición (Sandrini et al., 2011).

La estimulación magnética no se aplica de forma continua sino en forma de pulsos. Existen diversos protocolos de estimulación magnética transcraneal que varían según la frecuencia y la intensidad de los pulsos electromagnéticos. Dependiendo de los parámetros de estimulación, la TMS puede producir efectos mejoradores de la actividad cognitiva, o también efectos disruptores, similares a una lesión virtual.

La TMS con fines disruptores se utiliza en investigación básica para determinar las bases neurales de determinadas funciones cognitivas. Se aplica la estimulación magnética en condiciones que generan una inactivación reversible de una región específica del encéfalo, como si fuera una lesión; y se analizan las funciones cognitivas que se ven comprometidas cuando esa región está inactiva. De esta manera se puede conocer de forma precisa la implicación causal de las regiones en los procesos cognitivos. Por ejemplo, R. Cohen Kadosh et al. (2010a) aplicaron estimulación magnética sobre el IPS bilateral en condiciones disruptivas, y observaron que la inactivación del IPS afectaba negativamente al procesamiento numérico tanto automático como intencional, concluyendo el rol crucial de esta estructura en el procesamiento numérico.

En cualquier caso, la TMS alcanza una resolución espacial que oscila entre los 0,5 y los 1,5 cm, dependiendo del tejido estimulado (O'Shea y Walsh, 2007), y debido al rápido declive del campo magnético no alcanza profundidades superiores a los 2-3 cm por debajo del cráneo (Sandrini et al., 2011).

1.2.1.2. Protocolos de estimulación

Dependiendo del número y frecuencia de los pulsos magnéticos aplicados sobre el cráneo, se pueden distinguir varios tipos de protocolos de TMS (Figura 26).

La estimulación magnética de pulsos simples consiste en la aplicación de pulsos individuales separados por intervalos de al menos 4 s, de modo no se genere un efecto

sumativo (Valero-Cabré et al., 2017), ya que lo que se desea analizar es el efecto de cada pulso individual. En la Figura 26 se muestra el diagrama de dicha estimulación (conocida como spTMS, del inglés *single-pulse transcranial magnetic stimulation*). Se suele utilizar con fines inhibitorios para estudiar el curso temporal de los procesos. Es decir, para determinar qué regiones intervienen antes o después en un proceso cognitivo.

La estimulación de pulsos apareados o pulsos triples consiste en la aplicación de dos o tres pulsos, respectivamente, cuya descarga tiene lugar con un intervalo inter-estímulo muy pequeño, de forma que se sumen los efectos (en la figura: pTMS y tTMS, del inglés *paired transcranial magnetic stimulation* y *triple transcranial magnetic stimulation* respectivamente).

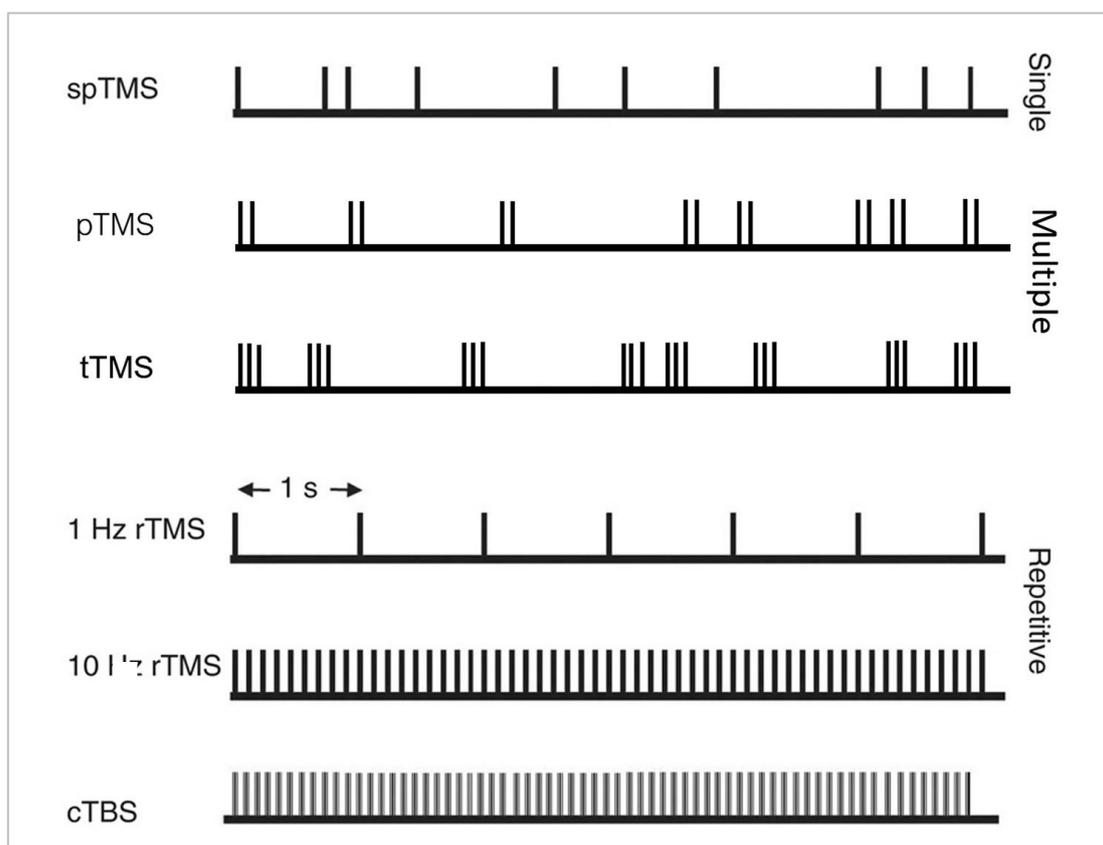


Figura 26. Protocolos de estimulación magnética transcraneal (TMS). Los protocolos de TMS difieren en el número y frecuencia de los pulsos emitidos. En la TMS de pulsos simples (spTMS) se aplican pulsos únicos distanciados entre sí por al menos 4 segundos de forma que no se sumen sus efectos. En la TMS de pulsos múltiples (pTMS y tTMS) se aplican varios pulsos con un intervalo inter-estímulo de pocos milisegundos. Según el número de estímulos aplicados puede ser TMS de pulsos apareados (2 pulsos, pTMS) o TMS de pulsos triples (3 pulsos, tTMS), etc. En la TMS repetitiva (rTMS) se aplican

pulsos con una frecuencia fija. Se distingue la TMS de frecuencias bajas (1-5 Hz) y la TMS de frecuencias altas (5-20 Hz). Tomado de Garcia-Sanz (2022a)

Por su parte, la estimulación magnética repetitiva consiste en la aplicación de pulsos repetidos con una frecuencia fija. Por ejemplo, la emisión de un pulso cada 100 ms, dando lugar a una frecuencia de 10 Hz. En la Figura 26 se muestran los diagramas correspondientes a la estimulación magnética repetitiva a frecuencias altas (por ejemplo 10 Hz) y a frecuencias bajas (1 Hz). En general se considera que la estimulación repetitiva a frecuencias bajas (~1 Hz) disminuye la excitabilidad cortical, inhibiendo la actividad neural de la zona afectada; mientras que la estimulación a frecuencias altas (~5-10 Hz) produce el efecto contrario, aumentando la excitabilidad cortical (efecto facilitador) (Dayan et al., 2013; Fresnoza et al., 2020; Walsh y Pascual-Leone, 2003).

Por último, la TMS tipo *Theta burst* (TBS) es una variante de la estimulación magnética repetitiva que consiste en la aplicación de ráfagas de varios pulsos, repetidas a una frecuencia cercana a los 5 Hz (rango de la banda theta). La Figura 27 muestra el diagrama de uno de los protocolos de estimulación *Theta burst* más utilizado, en el que se aplican ráfagas cortas de 3 pulsos a 50 Hz (es decir, con un intervalo inter-estímulo de 20 ms), que se repiten cada 200 ms (frecuencia de 5 Hz, en el rango de la banda theta) formando un tren continuo durante 20 s o 40 s (Huang et al., 2005).

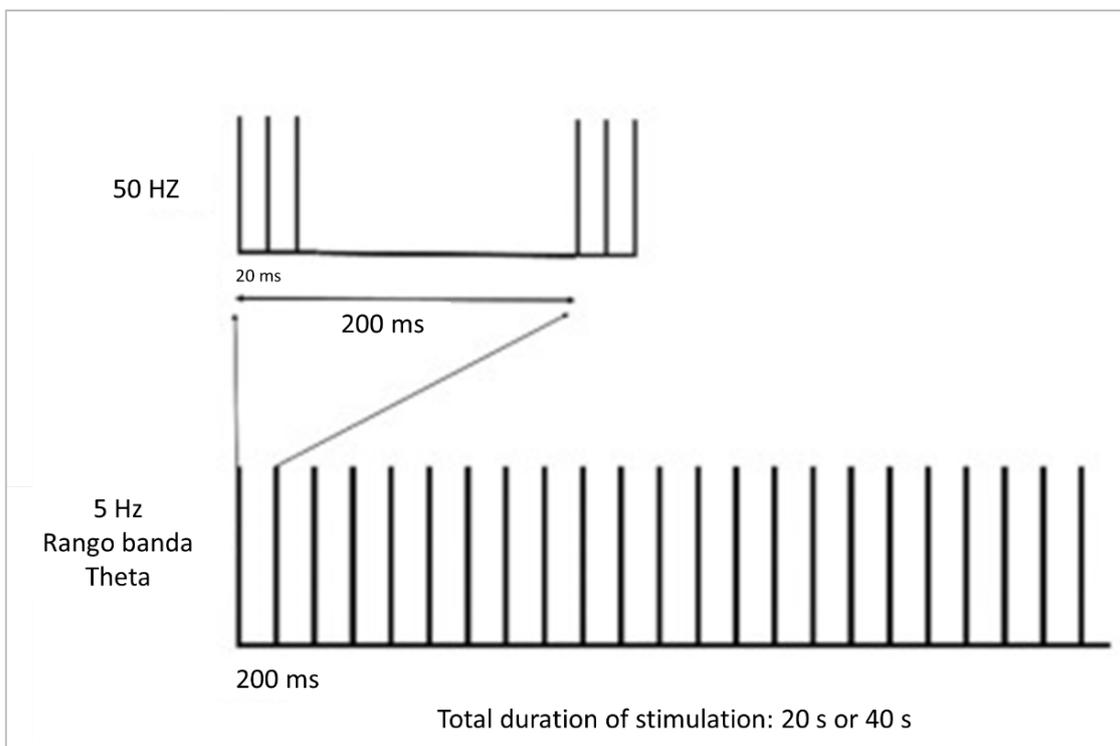


Figura 27. Pulsos aplicados en el protocolo de estimulación Theta burst. Tomado de Garcia-Sanz (2022a).

Este protocolo de estimulación aprovecha el efecto sumativo de los pulsos aplicados repetidamente, consiguiendo efectos moduladores de la excitabilidad celular más duraderos que la TMS clásica, con tiempos de estimulación incluso más breves (Suppa et al., 2016).

1.2.1.3. Mecanismo de acción

Actualmente no hay un consenso acerca de cuáles son los mecanismos de acción de la TMS. Sin embargo, hay claridad con relación a que los efectos de la estimulación dependen del estado de actividad inicial que tenían los grupos neuronales que reciben la acción del campo magnético. Tanto la magnitud como la dirección de los efectos moduladores provocados por la TMS dependen del estado inicial del tejido cerebral estimulado. Es decir, según el estado de activación, los efectos pueden ser inhibidores o facilitadores, y tendrán una magnitud mayor o menor.

Esta dependencia con respecto al estado de activación inicial se ha utilizado para desarrollar una nueva forma de TMS que aumenta la resolución funcional de la técnica.

Silvanto et al. (2007, 2008) utilizaron la adaptación para influir en el estado inicial de un subconjunto de células que codifican atributos particulares del estímulo. En el estudio pionero, los sujetos se adaptaron a combinaciones de color y orientación del estímulo durante 30 s, y después se presentaron los estímulos de la prueba o test. La estimulación TMS se aplicó simultáneamente a la fase de prueba. Los resultados mostraron que la estimulación generaba un mejor rendimiento en la prueba, para los estímulos que habían sido adaptados; y un peor rendimiento para los otros estímulos. Esto muestra que la estimulación había afectado de manera diferente a las neuronas dependiendo de su estado de activación inicial. Además, permite que el investigador pueda selectivamente excitar o inhibir a diferentes poblaciones de neuronas dentro de una misma región anatómica, gracias a que los efectos de la estimulación muestran una dependencia con relación al estado de activación (Silvanto y Pascual-Leone, 2008).

Para poder explicar esta dependencia con respecto al estado de activación, se han propuesto varios modelos de mecanismos de acción de la estimulación magnética sobre las neuronas (García-Sanz et al., 2022a). Los tres principales modelos son: (a) el modelo clásico que propone que la TMS modula la conducta por medio de la supresión de señales neurales (Harris et al., 2008); (b) el modelo que postula que la TMS genera ruido neural (Ruzzoli et al., 2010; Silvanto et al., 2008; Walsh y Pascual-Leone, 2003); y (c) un modelo reciente que considera los efectos de la TMS como resultado de la interacción entre la actividad neural subyacente y la intensidad de la estimulación (Silvanto y Cattaneo, 2017). Este tercer modelo propone que las bajas intensidades pueden ejercer un efecto facilitador o disruptivo dependiendo de la actividad cerebral subyacente (Schwarzkopf et al., 2011), mientras que la TMS de alta intensidad provoca unos disparos de alta frecuencia sincronizados en una población relativamente amplia de neuronas seguido de una depresión, lo cual finalmente genera un efecto disruptor (Siebner et al., 2009). Por lo tanto, a altas intensidades el efecto será siempre disruptivo, mientras que a bajas intensidades el efecto depende de la actividad subyacente de las poblaciones neuronales. De hecho, el efecto disruptor de la estimulación a altas frecuencias ha sido probado en estudios a nivel perceptual, motor y cognitivo (Siebner et al., 2009). Y la dependencia respecto al estado de activación, cuando se usan bajas frecuencias está avalado por estudios cognitivos y perceptivos (Silvanto et al., 2008).

Por lo tanto, el posible uso de la TMS con fines clínicos debe tener en cuenta que los efectos neuromodulatorios de la estimulación pueden variar, tanto en su dirección como en su magnitud, según el estado de activación inicial del tejido afectado.

1.2.2. Estimulación eléctrica transcraneal

1.2.2.1. Descripción de la técnica

La estimulación eléctrica transcraneal es un método no invasivo de estimulación cortical en el que se aplica una corriente eléctrica directamente sobre la superficie del cráneo, mediante unos electrodos que se colocan en el cuero cabelludo, con la finalidad de polarizar las regiones cerebrales diana (Nitsche y Paulus, 2000).

Algunos autores refieren que esta técnica ha sido utilizada desde hace varias décadas (Cohen Kadosh y Elliott, 2013). Sin embargo, no fue sino hasta finales del siglo XX que empezó a ser utilizada de forma generalizada como herramienta para estudiar las funciones cerebrales y como alternativa terapéutica en los procesos de rehabilitación.

En la Figura 25 se mostraba el montaje de uno de los tipos de estimulación eléctrica transcraneal denominado estimulación transcraneal de corriente directa, en el que se colocan dos electrodos uno positivo y otro negativo en distintas localizaciones del cráneo, habitualmente siguiendo las posiciones del sistema internacional EEG 10-20 de los electroencefalogramas.

Esta técnica no induce una descarga masiva y sincronizada de potenciales de acción como lo hace la TMS (Nitsche y Paulus, 2000; Woods et al., 2016); sino que los campos eléctricos resultantes modifican el potencial neuronal transmembrana. Como los voltajes están por debajo del umbral, no genera potenciales de acción (Bikson et al., 2004), en cambio, modulan la actividad neuronal espontánea de una manera dependiente de la polaridad. Se ha demostrado en estudios en modelo animal, y en estudios con humanos, que el electrodo positivo (ánodo) modifica los potenciales de membrana despolarizándolos hasta alcanzar casi el umbral de activación, mientras que el cátodo (electrodo negativo) genera hiperpolarización. Por tanto, la estimulación anódica aumenta la excitabilidad celular, y la catódica disminuye la excitabilidad, al reducir la tasa de disparo de las neuronas (Cohen Kadosh, 2014).

Para la estimulación eléctrica, la resolución espacial depende del tamaño del electrodo (Dmochowski et al., 2011), y los efectos no se limitan al área inmediatamente debajo de los electrodos sino a todas las áreas afectadas por el campo eléctrico generado entre electrodos (Cohen Kadosh, 2014), llegando incluso a afectar a regiones profundas (To et al., 2018).

1.2.2.2. Protocolos de estimulación

La aplicación de la estimulación eléctrica involucra diferentes tipos de protocolos, dependiendo de la corriente eléctrica utilizada y su polaridad. En la Figura 28 se muestran los tipos de corriente que se aplican en cada uno de los protocolos: puede ser estimulación por corriente directa (tDCS), estimulación por corriente alterna a una frecuencia fija (tACS, del inglés transcraneal *Alternating Current Stimulation*) y estimulación por corriente alterna a frecuencias aleatorias, también llamada de ruido aleatorio, (tRNS, del inglés, *Transcranial Random Noise Stimulation*) (Nitsche et al., 2008; Paulus, 2011).

En la tDCS se aplica una corriente continua de baja intensidad (normalmente inferior a 2 mA) durante un periodo de tiempo (~20 minutos) sobre la superficie del cuero cabelludo. Para ello, se coloca un electrodo positivo (ánodo) sobre una región del cráneo y un electrodo negativo (cátodo) en otra región, de forma que se genera una corriente eléctrica directa (Figura 28, parte A). La corriente atraviesa los huesos del cráneo y altera la actividad neuronal espontánea de la corteza.

En la tACS el protocolo consiste en la aplicación de una corriente alterna entre los electrodos, cuya polaridad cambia a una frecuencia fija (Figura 28, parte B).

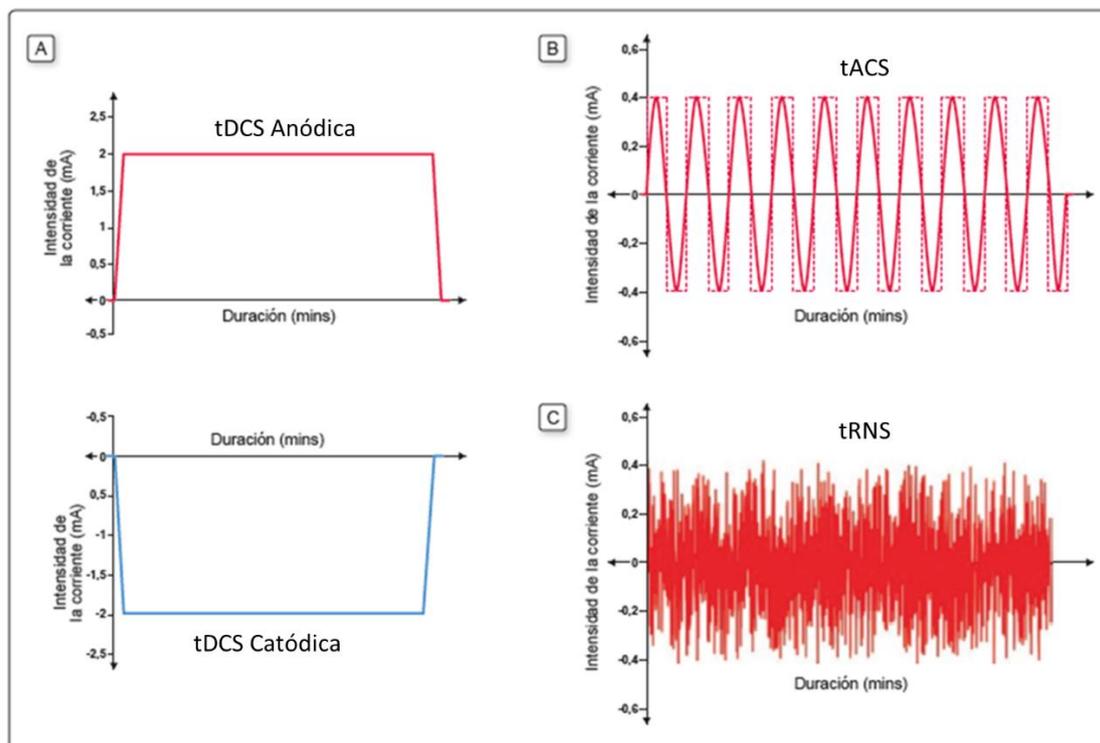


Figura 28. *Protocolos de estimulación eléctrica transcraneal. tACS: estimulación con corriente alterna transcraneal; tDCS: estimulación de corriente directa; tRNS: estimulación con ruido aleatorio transcraneal. Tomado de García Sanz (2023).*

Finalmente, en la estimulación transcraneal por ruido aleatorio (tRNS) se aplica una corriente alterna con un espectro de frecuencias que oscilan de forma aleatoria (Figura 28, parte C). La tRNS se puede aplicar en tres rangos de frecuencia: en todo el espectro (de 0,1 a 640 Hz), en la banda baja (0,1-100 Hz) o en la banda alta (101-640 Hz). Se considera que la tRNS es una técnica más potente que tDCS anódica, al menos para tareas de percepción (Fertonani et al., 2011).

No obstante, la tDCS ha evolucionado hacia configuraciones que focalizan de forma más precisa el campo eléctrico, generando efectos más localizados. Se trata de la estimulación eléctrica multifocal, también conocida como tDCS de alta resolución (HD, del inglés *High Definition*) (HD-tDCS), la cual utiliza electrodos pequeños y varios electrodos de retorno para aumentar la resolución espacial y la focalización (Alam et al., 2016). El uso de varios electrodos de retorno sirve para que la distribución de la corriente esté dirigida de forma precisa hacia la región diana. Se utilizan en ese caso electrodos circulares pequeños (diámetro < 1,2 cm), en comparación con electrodos rectangulares habituales (de <5 cm de lado). Con la tDCS multifocal se generan campos eléctricos un 80% más

focalizados y con una mayor intensidad (98%) en la región diana que con los montajes tradicionales (Dmochowski et al., 2011).

Existen numerosas variaciones en los montajes de la HD-tDCS, siendo el más frecuente el montaje “4x1”, donde un electrodo activo está rodeado por cuatro electrodos de polaridad opuesta, llamados electrodos de retorno (Kuo et al., 2013). Aunque también existen montajes “5x1”, “7x1”, etc. La Figura 29 muestra un ejemplo de montaje de los electrodos en la tDCS clásica y en la HD-tDCS. Como se puede observar, en la tDCS clásica se utilizan solo dos electrodos: el ánodo y el cátodo; mientras que en el diseño multifocal HD-tDCS se utiliza un único electrodo activo y varios electrodos de retorno.

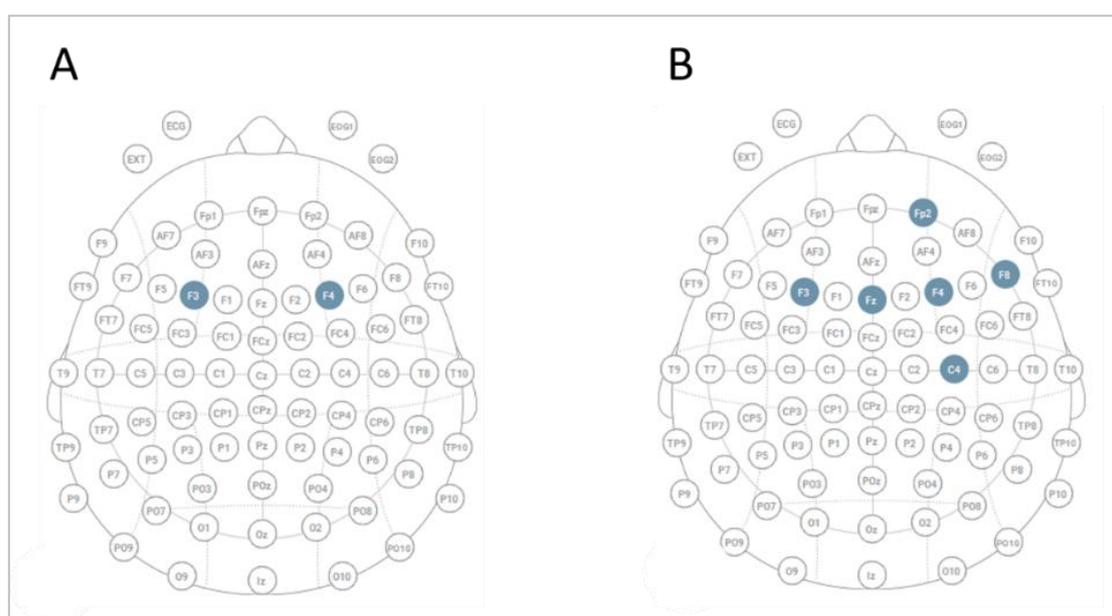


Figura 29. Montaje de los electrodos en: (A) tDCS clásica: se coloca un electrodo para el ánodo y otro para el cátodo. (B) tDCS multifocal o HD-tDCS: se coloca un electrodo activo y 5 electrodos de retorno. Fuente: Elaboración propia.

El campo eléctrico que se genera con la HD-tDCS es mucho más focalizado que el generado por la tDCS clásica. La compañía Neuroelectrics© ha desarrollado un simulador que, utilizando modelos computacionales, predice la distribución del campo eléctrico generada con un protocolo particular de estimulación eléctrica. Esta herramienta permite maximizar los efectos de la estimulación e interpretar con precisión los resultados de los experimentos. Utilizando el simulador de Neuroelectrics (Barcelona) se han generado para esta tesis, el modelo de campo eléctrico de los dos montajes de estimulación correspondientes a la tDCS y la HD-tDCS.

La Figura 30 muestra un ejemplo de los campos eléctricos que se generan cuando se tiene como región diana la corteza prefrontal dorsolateral derecha, esta región puede ser estimulada colocando un electrodo sobre la posición F4 (del sistema 10-20 EEG). En la parte superior de la figura se muestra el modelo de campo electromagnético que se produce al estimular esa zona con tDCS clásica. Como se puede observar, los efectos de la estimulación alcanzan regiones circundantes a la región diana, llegando incluso hasta el lóbulo temporal. La parte inferior de la Figura 30, muestra el modelo para la HD-tDCS, la cual genera un campo mucho más focalizado.

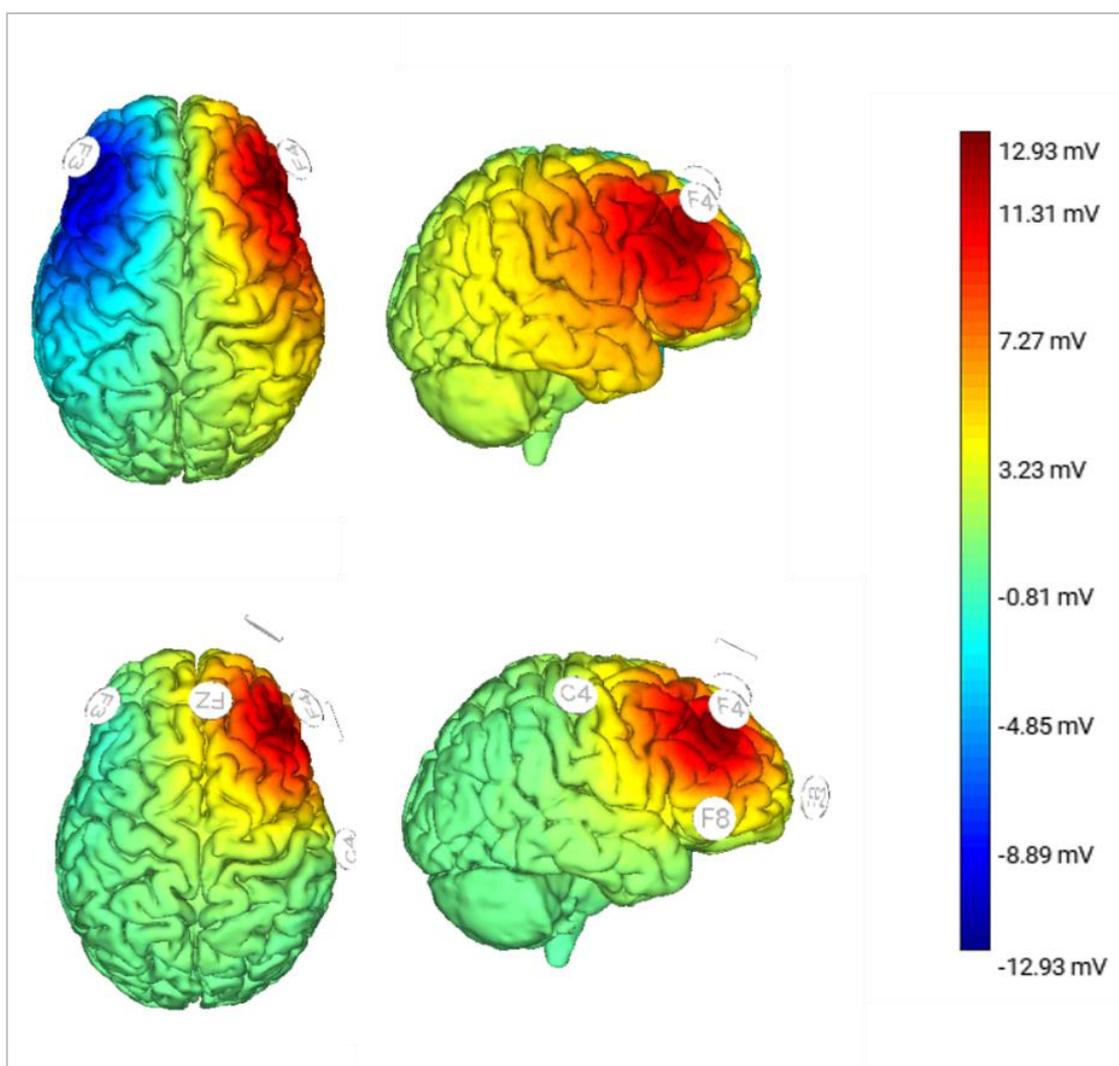


Figura 30. Modelo de campo eléctrico generado por la estimulación transcraneal de corriente directa: comparación entre la tDCS clásica (arriba) y la HD-tDCS multifocal (abajo). Fuente: elaboración propia mediante el simulador de campos eléctricos desarrollado por Neuroelectrics ©.

Si comparamos, por ejemplo, el valor del campo electromagnético en la región diana (corteza prefrontal dorsolateral, F4) en ambos casos el campo generado tiene un valor

superior a los 11 mV. Mientras que si comparamos el valor del campo en una región distante, como sería el lóbulo temporal; vemos que con tDCS clásica el valor ronda los 6 mV (color naranja), mientras que con HD-tDCS está por debajo de los 2 mV (color verde).

1.2.2.3. Mecanismo de acción

Las técnicas de estimulación eléctrica generan una corriente eléctrica en las estructuras y tejidos debajo de los electrodos. En la tDCS convencional, se genera una corriente continua cuya dirección va del ánodo al cátodo (Figura 31). Por el contrario, en la tRNS y la tACS, la corriente eléctrica cambia de orientación con una frecuencia y amplitud variable, generando un ruido que influye en la transmisión eléctrica del tejido subyacente.

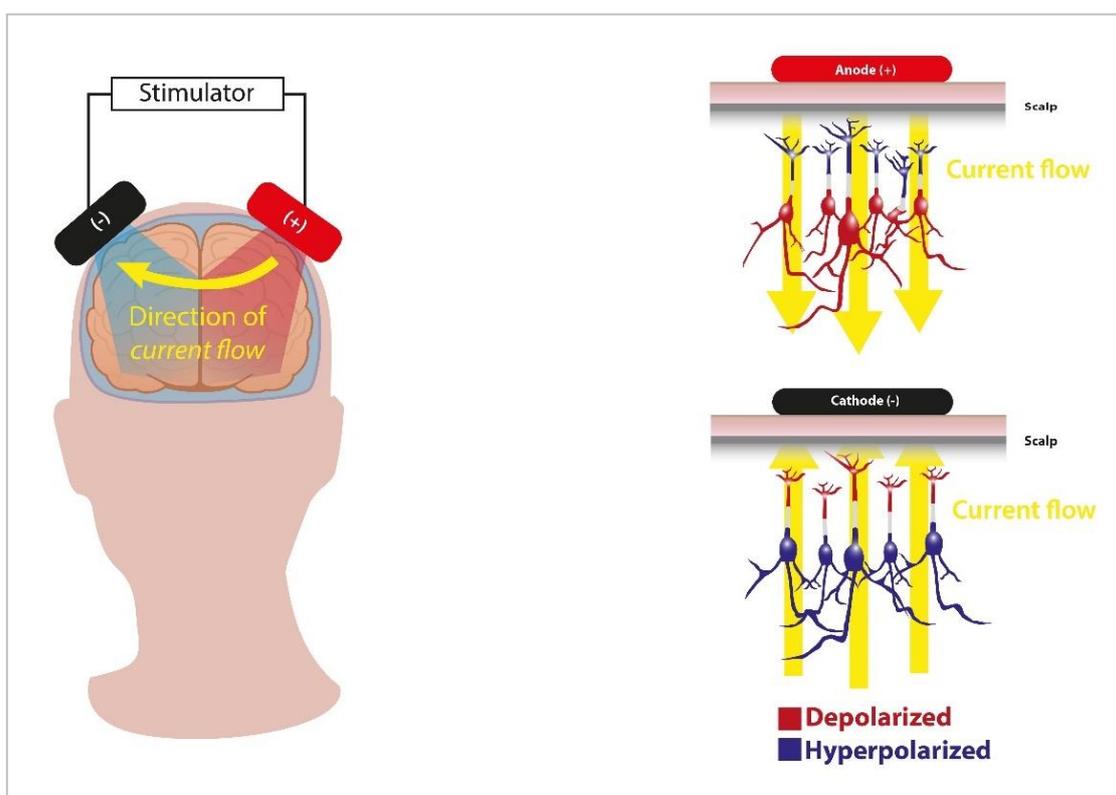


Figura 31. Dirección de la corriente eléctrica en la estimulación tDCS y procesos generados en las neuronas corticales bajo el ánodo y el cátodo. Fuente: Elaboración propia, imagen preparada para un artículo en proceso de publicación.

En el caso de la tDCS, uno de los mecanismos de acción propuestos, es la modulación sub-umbral del potencial de membrana neuronal. Este mecanismo altera la excitabilidad cortical dependiendo de la dirección del flujo de corriente eléctrica aplicada a un área

específica. Otros mecanismos propuestos son los cambios en la liberación de neurotransmisores, el funcionamiento de las células gliales, la microcirculación y los procesos de inflamación local (Woods et al., 2016).

Dado que la corriente utilizada en tDCS es sub-umbral, no induce directamente potenciales de acción (Bikson et al., 2004), sino que modula la actividad neuronal espontánea de forma diferente en la estimulación anódica, donde genera despolarización; y en la estimulación catódica, donde produce hiperpolarización (Liebetanz et al., 2002; Nitsche et al., 2003, 2004, 2005).

Pero ¿qué efecto tiene la corriente eléctrica sobre los procesos de membrana de las neuronas y su actividad? Es decir, ¿cómo se traduce la hiperpolarización o la despolarización en variaciones en la tasa de disparo de las neuronas?

La Figura 32 muestra a nivel de potenciales de membrana, cómo la estimulación eléctrica por corriente directa es un proceso que depende de la polaridad. Es decir, los efectos serán distintos en la región que se encuentra bajo el ánodo y en la situada bajo el cátodo. La estimulación anódica -electrodo positivo- (Figura 32, parte A) altera los potenciales de membrana de reposo generando despolarización. Esta despolarización es sub-umbral, y no genera directamente potenciales de acción, pero supone un aumento de la excitabilidad celular, ya que es fácil que se alcance el potencial necesario para desencadenar un disparo (representado en azul). Mientras que la estimulación catódica -electrodo negativo- (Figura 32, parte B) genera hiperpolarización (representada en rojo), con lo que los potenciales de membrana de reposo se alejan del umbral, y resulta más difícil que se desencadene un potencial de acción. De esta manera disminuye la excitabilidad celular.

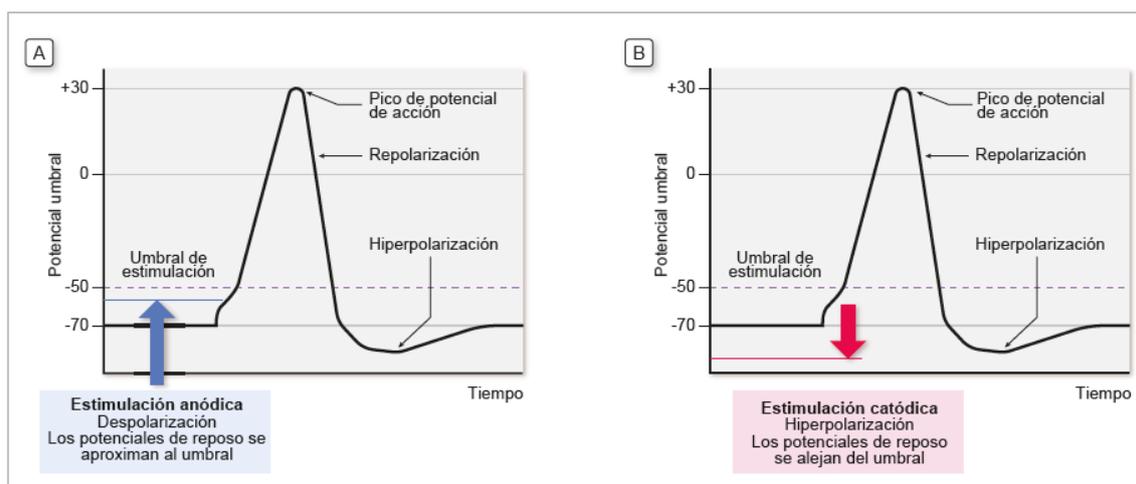


Figura 32. Acción de la estimulación por corriente directa sobre los potenciales de membrana. Tomado de García Sanz (2023).

Este mecanismo de acción propuesto para la tDCS es coherente con los resultados experimentales. De hecho, estudios realizados en corteza motora demuestran que la estimulación debajo del ánodo genera un aumento de la excitabilidad cortical, mientras que bajo del cátodo, la excitabilidad disminuye (Nitsche y Paulus, 2000). En los estudios cognitivos, el vínculo entre los cambios fisiológicos y los efectos conductuales no siempre es directo; sin embargo, en general se considera que la estimulación anódica es excitatoria, mientras que la estimulación catódica es inhibitoria.

1.2.3. Uso de las NIBS para estudios cognitivos

Las técnicas de estimulación cerebral no invasivas pueden ejercer sus efectos cognitivos por medio de tres mecanismos: neuromodulación, neuroplasticidad y neuroestimulación ([Apéndice 1](#)).

La *neuromodulación* consiste en la modificación de los potenciales de membrana que afectan la excitabilidad celular, aumentándola o disminuyéndola, pero sin llegar a generar directamente potenciales de acción. Por el contrario, el término *neuroestimulación* se utiliza cuando los cambios de membrana producidos superan el potencial umbral, y generan disparos (potenciales de acción) en las células estimuladas. Y finalmente, la *neuroplasticidad* se refiere a los cambios en las conexiones neuronales generados por la estimulación cerebral cuando ésta se aplica de forma repetida en diversas sesiones.

La estimulación magnética transcraneal se puede emplear como técnica de neuroestimulación (genera potenciales de acción) y como técnica de neuromodulación (modifica la excitabilidad neuronal); mientras que la estimulación eléctrica es una intervención estrictamente neuromodulatoria. Además, tanto la estimulación eléctrica como la magnética, cuando se usan protocolos repetitivos o de larga duración, pueden generar cambios plásticos en el encéfalo. Es decir, pueden inducir fenómenos de potenciación a largo plazo (LTP) necesarios para los procesos de aprendizaje y memoria.

Los efectos, sobre todo neuromodulatorios, de la estimulación transcraneal han hecho que estas técnicas sean clave dentro de la neurociencia cognitiva. Las NIBS se utilizan en esta disciplina tanto con fines de ciencia básica como con fines de ciencia aplicada (Parkin et al., 2015, Bartrés et al., 2000).

En ciencia aplicada, los protocolos de estimulación eléctrica y magnética que generan facilitación de procesos cognitivos son prometedores tanto en el ámbito clínico como en el educativo. Por ejemplo, se han aplicado las NIBS a la modulación de áreas críticas para procesos cognitivos como la memoria de trabajo, las funciones ejecutivas, y el lenguaje (Sela y Lavidor, 2014). Además, se han reportado aplicaciones terapéuticas de las NIBS en el ámbito clínico (por ejemplo, Di Lazzaro et al., 2021; Viejo-Sobera et al., 2017; Solé-Padullés et al., 2006; Pereira et al., 2013).

En cuanto a la ciencia básica, las NIBS permiten establecer relaciones causales entre estructuras cerebrales específicas, y ciertas funciones cognitivas. Históricamente, la investigación en neurociencia cognitiva utilizó la neuroimagen funcional para mapear topográficamente las áreas activas relacionadas con determinados procesos cognitivos. Sin embargo, con las NIBS, podemos alterar la excitabilidad de una región cortical y analizar los efectos que podría tener sobre una conducta o función cognitiva específica (Pascual-Leone et al., 1999).

Una de las principales ventajas de las NIBS sobre otras técnicas usadas para estudiar las bases neurales de procesos cognitivos, es que la estimulación proporciona una evidencia basada en la interferencia mucho más robusta. Además, las NIBS permiten una resolución espacial, temporal y funcional que otras técnicas no pueden alcanzar (García-Sanz et al., 2022a). La resolución funcional de las NIBS (tanto magnética como eléctrica) supera la lograda por las resonancias y las tomografías, ya que proporciona mapas de interferencia, los cuales indican las regiones cuya implicación - directa o por redes- es crucial para la

función cognitiva en estudio. Es más, algunos protocolos como la estimulación magnética basada la dependencia con respecto al estado inicial (Silvanto et al., 2008), permiten una resolución funcional aún mayor, ya que logran diferenciar la respuesta a la estimulación de poblaciones neurales que solapan dentro de la misma región estimulada. En cuanto a la resolución temporal, la aplicación de estimulación magnética en cortos periodos de tiempo (rango de milisegundos) permite estudiar el curso temporal de los procesos cognitivos, mostrando qué regiones son cruciales antes o después dentro de un mismo proceso. Esta resolución temporal sólo es comparable a la de los estudios de electroencefalografía, pero no se logra con ninguna de las técnicas tradicionales de neuroimagen.

Además, es importante tener presente que podemos explicar la función cerebral de un modo más preciso si nos fundamentamos en la conectividad entre estructuras cerebrales que si lo hacemos basándonos en la localización de una función dada para una región cerebral específica (Honey et al., 2009). Esta aproximación metodológica para explicar la conducta a un nivel de redes neurales distribuidas en el encéfalo necesita técnicas de identificación de la conectividad funcional cortico-cortical y cortico-subcortical *in vivo*, dado que no resulta suficiente con la información procedente de las conexiones anatómicas existentes entre dos áreas (Di Martino et al., 2014). En este sentido, lo interesante es poder determinar si las conexiones entre dos regiones cerebrales son necesarias para una determinada conducta. Las técnicas funcionales como la IRMf se pueden utilizar para estudiar la relación entre ciertas conductas y los patrones específicos de activación de estructuras corticales y subcorticales (Amaro y Barker, 2006). No obstante, dichas técnicas solo proporcionan evidencias complementarias de las redes neurales asociadas con una conducta determinada, dado que no posibilitan el establecimiento de relaciones causales directas. Es decir, la activación de una red neuronal por una conducta puede establecer una asociación entre la actividad neural y la manifestación conductual, pero no proporciona información acerca del papel que una región cerebral o sus conexiones desempeñan en una conducta o función cognitiva (Huettel, 2012).

La combinación de la TMS con las técnicas funcionales de neuroimagen proporciona una aproximación para solucionar este problema (Bergmann et al., 2016). En este sentido es posible utilizar técnicas de neuroimagen funcional como la IRMf para identificar la actividad en diferentes regiones cerebrales que se asocia a una conducta determinada. A

partir de aquí, podemos utilizar la TMS para estimular o inhibir dichas regiones y poder evaluar, de este modo, su papel causal en la manifestación de la conducta. En este sentido, las técnicas de neuroimagen proporcionarían una guía muy útil a la investigación para saber en qué regiones concretas hay que aplicar la estimulación.

En conclusión, las NIBS son una herramienta poderosa para el estudio de las bases neurales de los procesos cognitivos, por si solas o en combinación con otras técnicas, ya que proporcionan mapas de interferencia con una gran resolución temporal y espacial.

Las técnicas de estimulación cerebral no invasiva han contribuido significativamente a comprender y mejorar diferentes procesos cognitivos (Harris et al., 2008; Hartwigsen et al., 2015; Kuo y Nitsche, 2012; Madsen et al., 2015; Santarnecchi et al., 2015). Además de ofrecer información sobre la organización, la dinámica y la plasticidad dependiente de la experiencia de la red cerebral local y global (Dayan et al., 2013); la modulación de áreas críticas para procesos cognitivos como la memoria de trabajo, las funciones ejecutivas o la cognición numérica, frecuentemente obstaculizada en pacientes con diversas condiciones neurológicas, es particularmente relevante para las aplicaciones terapéuticas de las NIBS en rehabilitación (Parkin et al., 2015).

1.2.4. Uso de las NIBS en cognición numérica

Así como en otros campos de la cognición, las NIBS también pueden ser utilizadas en investigación básica para determinar las bases neurales de la cognición numérica; y en investigación aplicada, como una posible intervención para mejorar los procesos de cognición numérica.

Se sabe que las principales regiones implicadas en la cognición numérica, tanto en el procesamiento numérico como en el espacial, se encuentran en la corteza prefrontal y en la corteza parietal (véase los capítulos 1.1.1.2. y 1.1.2.2.). Existen abundantes revisiones sistemáticas de literatura en los últimos años que sustentan estas evidencias y las sintetizan. Estas revisiones y metaanálisis se basan principalmente en estudios de neuroimagen acerca de las regiones implicadas en el procesamiento numérico, el procesamiento espacial, la aritmética, y otros aspectos de la cognición numérica (Arsalidou et al., 2018; Arsalidou y Taylor, 2011; De Smedt et al., 2013; Escobar-Magariño et al., 2022; Faye et al., 2019; Hawes et al. 2019b; Lyons et al., 2016; Peters y

De Smedt, 2018; Ranzini et al., 2022; Serra-Grabulosa et al., 2010; Siemann y Petermann, 2018b; Sokolowski et al., 2017a, 2017b; Mousa, et al., 2017; Yeo et al., 2017).

En cuanto al uso de las NIBS en el campo de la cognición numérica, hay evidencias de su uso con fines de investigación básica a partir del año 2001, con el estudio pionero de (Göbel et al., 2001) en el que aplicaron estimulación magnética repetitiva sobre la AG y observaron un efecto disruptivo en tareas que implicaban el uso de la línea numérica mental. Mientras que los primeros estudios con fines de mejora de la cognición numérica se realizaron con estimulación eléctrica de corriente directa (Cohen Kadosh et al., 2010b). Desde entonces, se han realizado numerosas investigaciones acerca de los efectos de las NIBS en la cognición numérica. Sin embargo, son escasas las revisiones sistemáticas de literatura que sintetizan los aportes de estas técnicas a la cognición numérica. De hecho, antes de 2019 (momento en que se inició nuestra investigación) sólo existían algunas revisiones (por ejemplo, Looi y Cohen Kadosh, 2016; Sandrini y Rusconi, 2009; Sarkar y Kadosh, 2016; Schroeder et al., 2017c), pero no son revisiones sistemáticas o no incluyen un componente de metaanálisis.

Por lo tanto, se requiere evidencia sintética acerca de los efectos de la estimulación transcraneal sobre la cognición numérica, así como evidencia sintética acerca de los factores que influyen en los efectos de la estimulación, tales como el protocolo utilizado, los parámetros de estimulación, etc. Asimismo, se requieren metaanálisis que cuantifiquen la posible mejora de la cognición numérica por medio de la estimulación transcraneal.

Por otro lado, dentro de la cognición numérica se sabe que tanto el procesamiento numérico como el procesamiento espacial son habilidades básicas que se desarrollan tempranamente y ambas están relacionados con la adquisición posterior de habilidades matemáticas (Atit et al., 2021; Devlin et al., 2022; Gunderson et al., 2012). Desde un punto de vista cognitivo-conductual, resulta difícil diferenciar los procesos cognitivos relacionados con el espacio, el tiempo y el número. Y desde una perspectiva de bases neurales, se constata la convergencia del procesamiento numérico, el espacial y el temporal con sustrato neural en la corteza parietal posterior (Riemer et al., 2016).

Sin embargo, toda la evidencia acumulada acerca de la interacción entre el espacio, el tiempo y el número se refiere a la interferencia mutua entre el procesamiento de estas magnitudes, pero no a la integración entre ellas. De hecho, la capacidad específica para

integrar información cuantitativa espacial y la numérica apenas se ha abordado. Dentro de los paradigmas más utilizados en el procesamiento numérico y el espacial casi no están presentes tareas que impliquen integrar varias magnitudes en orden a determinar una cantidad global. Por poner un ejemplo, una cuestión tan simple como decidir ¿qué cantidad es mayor, un aguacate grande o dos pequeños? requiere de un procesamiento complejo de magnitudes: es necesario procesar la información cuantitativa numérica (número de aguacates), la información cuantitativa espacial (tamaño de los aguacates), e integrar ambas para estimar la cantidad total mayor. Por lo tanto, se requieren estudios que analicen desde una perspectiva cognitivo-conductual la capacidad para procesar e integrar información cuantitativa numérica y espacial.

De otra parte, también es importante establecer la implicación de la corteza parietal y la corteza prefrontal en el procesamiento e integración de magnitudes espaciales y numéricas. Ya que aún existe la controversia acerca de si estas magnitudes son procesadas por el MPS, según la propuesta de T. Leibovich et al. (2017a) o si existe un sistema específicamente numérico, como el propuesto por S. Dehaene, 1997; L. Feigenson et al., 2004, y si este sistema tiene una base parietal o si requiere una red frontoparietal. En este sentido, mediante las NIBS se podría estudiar el efecto de la modulación de la actividad de la corteza parietal sobre la capacidad para procesar e integrar diversas magnitudes; y compararla con los efectos de la estimulación de la corteza prefrontal sobre dicha capacidad.

2. Objetivos e hipótesis

El objetivo principal de esta investigación consiste en analizar la capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial desde una doble perspectiva: cognitivo-evolutiva y de bases neurales⁶.

Para lograr este objetivo general se han definido tres objetivos específicos:

- (1) Analizar desde una perspectiva cognitivo-conductual las variaciones en la capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial en tres etapas del desarrollo.
- (2) Determinar los efectos de la neuromodulación parietal y prefrontal por medio de estimulación eléctrica transcraneal, en la capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial.
- (3) Sintetizar cuantitativa y cualitativamente la evidencia acumulada en los últimos diez años acerca de los efectos sobre la cognición numérica de la neuromodulación por medio de la estimulación cerebral no invasiva.

Cada uno de estos objetivos se aborda con un estudio específico, cuyas hipótesis (si procede) son especificadas a continuación.

⁶ En el ámbito de la cognición numérica se ha dado un giro desde los primeros modelos puramente cognitivo-evolutivos (propuesta piagetiana) a modelos neurocognitivos que tienen en cuenta las bases neurales de cada tipo de procesamiento, tal es el caso del modelo del Triple Código (Dehaene et al., 2003) el cual propone tres sistemas cognitivos de representación numérica asociados a tres regiones cerebrales específicas. También la propuesta neopiagetiana (Houdé et al., 2011; Viarouge et al., 2019), explica el desarrollo de la cognición numérica basándose en cambios en la implicación de estructuras corticales. Por este motivo, nuestra tesis pretende abordar la relación entre el procesamiento y la integración de magnitudes espacio-numéricas desde esa doble perspectiva (cognitivo-evolutiva y de bases neurales), ya que consideramos que sólo los datos cognitivos (obtenidos a partir de pruebas conductuales de desempeño, en distintas etapas) o sólo los datos de bases neurales no serían suficientes para poder interpretar nuestros resultados a la luz del estado del arte en materia de cognición numérica.

2.1. Estudio 1: Revisión sistemática y metaanálisis acerca del uso de las NIBS en cognición numérica

Este estudio se realiza con una aproximación no apriorística, ya que busca establecer la información causal proporcionada por las NIBS con respecto a las bases neurales de la cognición numérica, a través del análisis de los estudios experimentales disponibles acerca del efecto de la estimulación transcraneal magnética y eléctrica en la cognición numérica. Asimismo, pretende realizar un análisis cuantitativo (metaanálisis) de los efectos de la estimulación eléctrica transcraneal sobre las habilidades aritméticas (cálculo).

2.2. Estudio 2: Análisis cognitivo-conductual de la capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial.

El objetivo de este estudio es analizar la capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial a lo largo del desarrollo (en niños de 7 y 12 años, y en adultos). Para ello se han diseñado seis tareas de comparación de magnitudes: dos tareas numéricas, dos tareas espaciales (EA, CA) con figuras regulares y dos tareas espaciales (EA, CA) con formas amorfas (Figura 34 en el apartado de metodología). De las seis tareas, tres de ellas son comparaciones de la misma magnitud (para evaluar el procesamiento de magnitudes) y tres de ellas son tareas mixtas (para evaluar la capacidad de integrar magnitudes).

Las hipótesis para este estudio son:

- A) Existen diferencias en el rendimiento en las diversas tareas de comparación numérica y espacial dentro y entre los grupos de edad.
- B) Existen diferencias en el rendimiento en las tareas de comparación de áreas con figuras regulares o irregulares dentro y entre los grupos de edad.
- C) Existen diferencias en el rendimiento en las tareas de comparación de magnitud del mismo formato y de formatos mixtos dentro y entre los grupos de edad.
- D) El rendimiento de los adultos es superior al de los niños en todas las tareas: numéricas y espaciales, tanto en el procesamiento (mismo formato) como en la integración (formato mixto).

- E) El rendimiento en las tareas con áreas irregulares es menor al rendimiento en las tareas con áreas regulares, en todos los grupos de edad.

2.3. Estudio 3. Análisis de los efectos de la modulación de la excitabilidad cortical de las regiones frontoparietales sobre la capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial.

El objetivo de este estudio consiste en determinar los efectos que tiene la neuromodulación parietal y prefrontal derecha (por medio de estimulación eléctrica transcraneal) sobre el rendimiento las tareas de comparación numérica y espacial (del estudio 2), comparado con el control (placebo).

Las hipótesis para este estudio son:

- A) Hay una interacción entre la condición de estimulación (prefrontal, parietal y control) y el rendimiento en cada una de las tareas.
- B) Hay una interacción entre la condición de estimulación (prefrontal, parietal y control) y el rendimiento en las tareas según su magnitud (numérica, espacial regular, espacial irregular).
- C) Hay una interacción entre la condición de estimulación (prefrontal, parietal y control) y el rendimiento en las tareas en el mismo formato o en formatos mixtos.

Dado que las tareas utilizadas en este estudio no han sido usadas antes en otras investigaciones, no disponemos de suficiente base de conocimiento como para establecer hipótesis fundadas acerca de la dirección de las interacciones. No obstante, en base a los antecedentes comentados en la introducción, se pueden aventurar dos hipótesis adicionales:

- D) La estimulación parietal generará mejoras en las tareas de comparación que implican procesamiento de una magnitud (numérica / espacial), lo cual se traduciría en mejores rendimientos en la condición de estimulación parietal que en control.
- E) La estimulación prefrontal generará mejoras en las tareas de comparación que implican integración de magnitudes numéricas y espaciales, lo cual se traduciría en mejores rendimientos en la condición de estimulación prefrontal que en control.

3. Metodología

3.1. Estudio 1

3.1.1. Tipo de estudio: metaanálisis y revisión sistemática

La revisión sistemática de literatura científica con metaanálisis se llevó a cabo siguiendo la metodología de la declaración PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) (Page et al., 2021). Además, con miras a garantizar la transparencia de la investigación científica, se siguió un protocolo predefinido registrado en la base de datos PROSPERO:

(https://www.crd.york.ac.uk/prospero/display_record.php?ID=CRD42019120056)

3.1.2. Fuentes de información y algoritmos de búsqueda

La búsqueda bibliográfica se realizó en dos pasos. En primer lugar, se utilizaron las bases de datos PubMed (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>) y Web-of-Science (<http://www.isiknowledge.com>) para identificar las publicaciones que abordan el estudio de la cognición numérica mediante el uso de las técnicas NIBS en los últimos 11 años (desde enero de 2009 hasta mayo de 2021). La elección del rango temporal se basa en que las revisiones sistemáticas anteriores incluyeron datos publicados hasta 2008.

En segundo lugar, se revisaron las referencias bibliográficas incluidas en capítulos de libro y en revisiones sistemáticas relacionadas con la temática, con la finalidad de identificar cualquier otro estudio relevante.

Se incluyeron documentos publicados en inglés o español. Se excluyeron trabajos sobre sujetos no humanos, estudios no publicados y documentos procedentes de actas de congresos.

Las búsquedas sistemáticas realizadas en ambas bases de datos utilizaron una serie de palabras clave relacionadas con las NIBS y la cognición numérica. Dentro de la cognición numérica se incluyen los subdominios de representación numérica, procesamiento numérico, procesamiento de magnitudes, subitización, conteo, aritmética, entre otros. En cuanto a las NIBS, se tuvo en cuenta tanto la estimulación eléctrica como la magnética: TMS, tDCS, tACS, y tRNS. Los términos exactos empleados en la búsqueda, así como las restricciones se encuentran en el [Apéndice 2](#).

3.1.3. Criterios de inclusión y exclusión de estudios

PARTICIPANTES. Se incluyeron estudios en adultos sanos y se excluyeron los referidos a sujetos con desarrollo atípico, pacientes con alguna condición neurológica, y los niños.

INTERVENCIÓN. En cuanto a las intervenciones, esta revisión sistemática se centró en la estimulación cerebral transcraneal no invasiva, incluyendo la estimulación eléctrica y la magnética: TMS, tDCS, tACS y tRNS.

COMPARADOR. Se incluyeron estudios que compararan los efectos de la estimulación con un grupo control en el que no se aplicara estimulación, o se aplicara estimulación placebo (*sham*).

RESULTADOS. Las medidas de resultado primarias fueron cualquier cambio en los procesos de cognición numérica evidenciado mediante tiempos de reacción, precisión, efectos de congruencia, o cualquier otra variable relacionada con las tareas numéricas o de magnitudes.

Los resultados secundarios fueron los efectos neurales de las NIBS, obtenidos mediante técnicas de neuroimagen u otros estudios auxiliares.

ESTUDIOS. Se delimitó la selección a estudios experimentales, incluyendo ensayos clínicos aleatorizados y diseños cuasi-experimentales, y excluyendo estudios observacionales y de revisión.

Debido a la gran heterogeneidad de los estudios incluidos en la revisión, para la síntesis cuantitativa (metaanálisis) sólo se tuvieron en cuenta los estudios de estimulación eléctrica que analizaban los efectos sobre la habilidad del cálculo. En este caso, para el metaanálisis se seleccionaron los estudios que adicionalmente cumplieran los criterios de inclusión:

- Estudios que analicen las habilidades aritméticas simbólicas (sumas, restas, multiplicación, división).
- Estudios que comparen los resultados de la estimulación con los resultados del control (estimulación placebo).
- Estudios cuya única intervención sea la estimulación eléctrica.

Por tanto, se excluyeron los estudios de estimulación magnética, así como los experimentos en que la estimulación va acompañada con otra intervención (por ejemplo, entrenamiento cognitivo).

3.1.4. Extracción de la información y análisis

Una vez que se realizó el proceso de selección de artículos según el método PRISMA (consultar en el epígrafe 4.1. los resultados de cada una de las fases), la información extraída de cada estudio fue:

- Datos bibliográficos: autores, título, año y revista.
- Datos demográficos: número de participantes, edad y sexo.
- Para los estudios de TMS: (a) protocolo de estimulación: intensidad, frecuencia y tiempo de estimulación; (b) diseño del estudio; (c) condición control; (d) métodos de localización; (e) regiones estimuladas; (f) principales efectos.
- Para los estudios de estimulación eléctrica: (a) protocolo de estimulación: intensidad, rango de frecuencia y duración; (b) diseño del estudio; (c) polaridad y sitios de estimulación; (d) montaje de electrodos; (e) principales efectos.
- Para los estudios incluidos en el metaanálisis: tamaño del efecto, y parámetros estadísticos.

Cuando fue necesario, se contactó a los autores para recopilar información adicional o aclarar conceptos.

3.1.5. Análisis estadístico

Para los estudios incluidos en la síntesis cuantitativa se realizaron siete metaanálisis separados, uno para cada tipo de estimulación y cada tipo de diseño experimental: tRNS inter-sujetos, tRNS intra-sujetos, tDCS bilateral intra-sujetos, tDCS anódica inter-sujetos, tDCS anódica intra-sujetos, tDCS catódica inter-sujetos, tDCS catódica intra-sujetos⁷.

Se siguió el procedimiento metaanalítico desarrollado originariamente por J. Radua et al. (2015), y modificado por A. Albajes-Eizagirre et al. (2018), el cual permite realizar

⁷ Entre los estudios incluidos no había ninguno que utilizara tDCS bilateral con un diseño experimental inter-sujetos.

metaanálisis que incluyan estudios que no reportan de forma completa los resultados estadísticamente no-significativos (NSUE, del inglés *Non-Statistically Significant Unreported Effects*). El procedimiento computa reiteradamente los NSUEs en función de las estimaciones de máxima verosimilitud, y lleva a cabo múltiples metanálisis estándar de efectos aleatorios, usando el estimador de máxima verosimilitud restringida (REML, por sus siglas en inglés *Restricted Maximum Likelihood Estimator*); estos múltiples análisis luego son agrupados utilizando las reglas de Rubin (Albajes-Eizagirre et al. 2019). Cuando los estudios proporcionan más de un tamaño del efecto, éstos fueron promediados.

La razón para usar este procedimiento es que algunos de los estudios incluidos en el metaanálisis reportaron efectos no significativos, pero sin incluir todos los parámetros estadísticos necesarios para un metaanálisis convencional (por ejemplo, el valor t). Tal es el caso de B. Clemens et al. (2013), quienes indicaron un valor de $p > 0,1$, y este intervalo de valor de p podría corresponder a cualquier valor de t entre $-1,83$ y $1,83$. Excluir dichos estudios sesgaría el metanálisis hacia la significación estadística, mientras que incluirlos asumiendo que $t=0$ sesgaría el metanálisis hacia cero. Por el contrario, el procedimiento desarrollado por J. Radua et al. (2015) hace posible incluir estos estudios de forma imparcial.

Para cada uno de los siete metaanálisis, se calculó la mínima diferencia de medias estandarizada corregida por muestra (g de Hedges⁸) entre los dos grupos y su valor p . Para cada análisis se realizaron los correspondientes diagramas de efecto (*Forest plot*) los cuales representan los resultados de cada estudio (estimados puntuales y sus IC) y el resumen estadístico de dichos estudios (estimado global y su IC). Finalmente, se analizó la heterogeneidad de los experimentos utilizando el parámetro I^2 de Higgins, el cual se presenta en forma de porcentaje, considerándose que los estudios son heterogéneos cuando $I^2 > 50\%$ (Ried, 2006).

El riesgo de sesgos en las publicaciones fue analizado de forma independiente por dos investigadores, de forma cualitativa, teniendo en cuenta: la asignación de los participantes (aleatoria o pseudoaleatoria), la comparación con control (*sham*), el diseño (ciego o doble ciego) y el cumplimiento de los criterios de inclusión. Sin embargo, no fue posible evaluar

⁸ Para este parámetro estadístico se consideran como valores de referencia 0.2 (efecto bajo), 0.5 (efecto moderado), 0.8 (efecto grande) (Borenstein et al., 2009).

cuantitativamente el posible sesgo de las publicaciones debido al número limitado de estudios por metaanálisis.

Se utilizó el software MetaNSUE, creado por los autores del procedimiento estadístico, y disponible de forma gratuita en: <https://www.metansue.com/>.

3.2. Estudio 2

3.2.1. Tipo de estudio: estudio no experimental transversal

Esta investigación se trata de un estudio no experimental de tipo transversal con tres grupos de edad (niños de 7 años, niños de 12 años y adultos jóvenes).

3.2.2. Participantes

Los participantes de este estudio fueron: niños colombianos de cuatro instituciones educativas tanto públicas como privadas, de segundo curso de educación primaria y de sexto curso de secundaria; y adultos colombianos estudiantes universitarios. La selección de la muestra se realizó por participación voluntaria.

Para la presente investigación se hicieron las evaluaciones del grupo de adultos, y se realizó el análisis conjunto con los datos de una investigación simultánea (del mismo grupo de investigación) en niños.

Los criterios de inclusión para cada grupo de edad fueron:

Grupo 1:

- Niños escolarizados en 2º curso de educación primaria.
- Edad comprendida entre los 7:0 (años:meses) y los 8:11.
- Visión normal o corregida.
- Habilidades aritméticas con puntuación estandarizada (PT) entre 45 y 115 puntos de la subprueba de cálculo mental aritmético - sumas y restas - de NeurekaCALC (Camacho et al., 2017).

Grupo 2:

- Niños escolarizados en 6º curso de educación secundaria.
- Edad comprendida entre 11:0 y los 13:11.
- Visión normal o corregida.
- Habilidades aritméticas con puntuación estandarizada (PT) entre 45 y 115 puntos de la subprueba de cálculo mental aritmético NeurekaCALC (Camacho et al., 2017).

Grupo 3:

- Adultos realizando estudios universitarios.
- Edad comprendida entre 18:0 y los 22:11.
- Visión normal o corregida.
- Habilidades aritméticas con puntuación estandarizada (PT) entre 45 y 115 de la subprueba de aritmética WRAT-4 (Wilkinson y Robertson, 2006).

Los criterios de exclusión para todos los grupos de edad fueron:

- Antecedentes de enfermedad neurológica o psiquiátrica.
- Diagnóstico de trastorno específico del aprendizaje o del desarrollo.
- Consumo de sustancias que afectan al funcionamiento del sistema nervioso por uso recreativo o por prescripción médica (Ejemplo: ritalina).

La muestra inicial estuvo constituida por 142 participantes de los que se disponía de consentimiento informado. De los cuales, 7 fueron excluidos después del cribado inicial por no cumplir los criterios de inclusión, y otros 19 fueron descartados por datos incompletos.

La muestra final estuvo constituida por 116 participantes, tal y como muestra la Tabla 2.

Tabla 2. *Características sociodemográficas de la muestra*

	N	Edad M (SD)	Lateralidad	Género (Masculino/Femenino)
Grupo 1	37	7,43 (0.50)	91,9 % diestros	20/17
Grupo 2	42	11,67 (0.79)	78,6 % diestros	22/20
Grupo 3	37	18,95 (1.20)	91,9 % diestros	20/17

NOTA: M=Media, SD=desviación estándar. Lateralidad según el inventario de Edimburgh (Oldfield, 1971).

La prueba estadística $\chi^2_{(2)}$ de Pearson para las frecuencias de cada género dentro de los grupos muestra que no hay diferencias significativas $\chi^2_{(2)} = 0,030$, $p = 0,985$ en cuanto al género ([Apéndice 3](#)).

3.2.3. Aspectos éticos

El comité de Bioética de la Universidad de La Sabana (Colombia) aprobó el proyecto de investigación, con registro EDU-43-2019.

Se obtuvieron los consentimientos informados de los padres de los niños participantes, así como el asentimiento de los propios niños. Se contó también con el consentimiento informado de los adultos participantes ([Apéndice 4](#)).

La investigación cumplió con los lineamientos éticos tanto nacionales (COLCIENCIAS, 2017; Colegio Colombiano de Psicólogos, 2009) como internacionales (Society for Research in Child Development, 2021) referentes a la investigación con niños.

En lo concerniente a la transparencia de la investigación científica, el protocolo de la investigación fue publicado previamente en la plataforma *Open Science Framework* <https://osf.io/jh3yg/>.

3.2.4. Evaluación

Se aplicó un procedimiento individual con cada uno de los participantes en la sede de las instituciones educativas (colegio o universidad), siguiendo el protocolo:

- 1° Consentimiento informado.
- 2° Recogida de datos sociodemográficos.
- 3° Pruebas de cribado y evaluación de la lateralidad:
 - Subprueba de aritmética NeurekaCALC (Camacho et al., 2017)
 - Subprueba de aritmética WRAT-4 (Wilkinson y Robertson, 2006)
 - Inventario de lateralidad de Edimburgh (Oldfield, 1971) en su versión adaptada para Latinoamérica (Albayay et al., 2019).
- 4° Evaluación de la capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial mediante tareas de comparación de magnitudes.

La capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial fue evaluada mediante tareas de comparación de magnitudes diseñadas por la autora de esta tesis y programadas mediante el software PsychoPy ®, para ser ejecutadas en el servidor de <https://pavlovia.org/>, el cual registra los resultados de los participantes (tiempos de reacción y aciertos) en cada uno de los ensayos de las tareas.

Los participantes se ubicaban a 50 cm de una pantalla de 17 pulgadas, y respondían a las tareas de comparación utilizando la tecla “p” para indicar el estímulo de la derecha y la letra “q” para el de la izquierda.

Los estímulos numéricos no-simbólicos (conjuntos de puntos) fueron generados mediante el instrumento de Gebuis y Reynvoet (2011), que contrabalancea las variables de confusión como el área envolvente, el perímetro acumulado, etc. Mientras que los estímulos numéricos simbólicos (dígitos) y los estímulos espaciales (áreas) fueron creados individualmente por la autora de la tesis utilizando el programa Adobe PhotoShop.

El grupo de investigación hizo un pilotaje para ajustar el diseño de las tareas, y la comprensión de las instrucciones, con 40 participantes diferentes a los incluidos en la investigación.

El procedimiento incluye seis tareas de comparación de magnitudes, en bloques independientes, realizadas en el mismo orden para todos los participantes. Cada bloque contiene 10 ensayos de prueba (para familiarizarse con la tarea), y 108 ensayos experimentales. Se contrabalanceó el número de veces que la magnitud mayor estaba a la derecha y a la izquierda, y también el número de veces que la cantidad mayor estaba en un formato o en otro. Dentro de cada bloque, los ensayos fueron presentados en orden aleatorio para cada participante.

En la Figura 34 se muestran las seis tareas de comparación de magnitudes diseñadas: dos tareas numéricas, dos tareas espaciales con figuras regulares y dos tareas espaciales con formas amorfas. De las seis tareas, tres de ellas son comparaciones uni-formato; es decir, se comparan cantidades de la misma magnitud (para evaluar la habilidad de procesamiento) y tres de ellas son tareas mixtas; es decir, se comparan cantidades en formatos diferentes (para evaluar la capacidad de integración).

En todos los bloques, se presentaba una cruz de fijación (+) en el centro de la pantalla antes de cada ensayo, durante 200 ms. Después se presentaban los estímulos durante 3000 ms, para evitar las estrategias de conteo, seguido de la pantalla en negro (Figura 33). Estos intervalos de tiempo son idénticos a los utilizados por Leibovich y Henik (2014) en paradigmas de comparación numérica y de áreas.

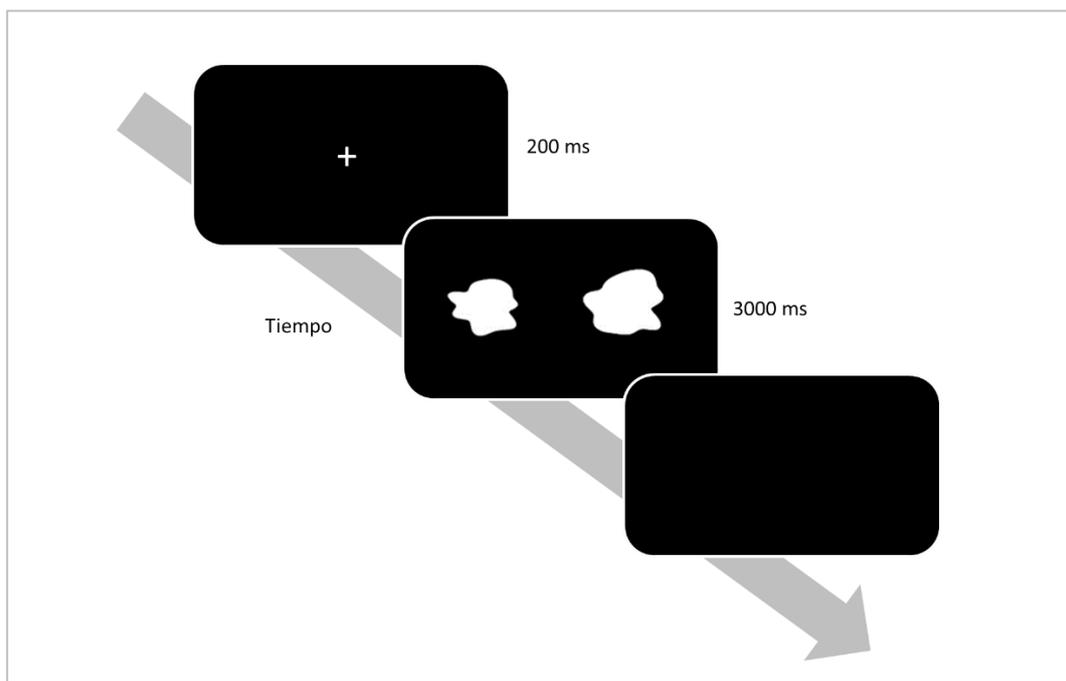


Figura 33. Procedimiento empleado en cada ensayo de las tareas de comparación de magnitudes. Fuente: elaboración propia, imagen preparada para un artículo en proceso de publicación.

En todas las tareas se utilizaron cantidades que se corresponden con los valores numéricos: 9, 12, 15, 16,18, 20, 21, 24, 25, 27, 28. Al combinarlos, se obtuvieron nueve ratios diferentes (la *ratio* se define como el cociente entre el número menor y el mayor): 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85 y 0,9. Por ejemplo, en la tarea de comparación numérica no-simbólica (Figura 34, parte a), la comparación de 9 puntos frente a 15 puntos se corresponde con la *ratio* 0,6. Mientras que en la tarea de comparación de áreas continuas (Figura 34, parte c) se compara un rectángulo cuya área en número de píxeles es proporcional a 9 frente a otro rectángulo cuya área es proporcional a 15, en este caso, la *ratio* es igual 0,6. En todas las tareas, los estímulos se realizaron según los mismos valores y, por tanto, las mismas ratios.

Dado que no todos los valores de la *ratio* son exactos se establecieron las categorías de tal manera que, por ejemplo, la categoría *ratio* 0,3 consiste en las parejas cuyo cociente está entre 0,30 y 0,39; mientras que la *ratio* 0,4 comprende los valores entre 0,40 y 0,49 (procedimiento utilizado por Leibovich y Henik, 2014). Cada una de las ratios se presentó en 12 variantes, para un total de 108 ensayos en cada uno de los bloques.

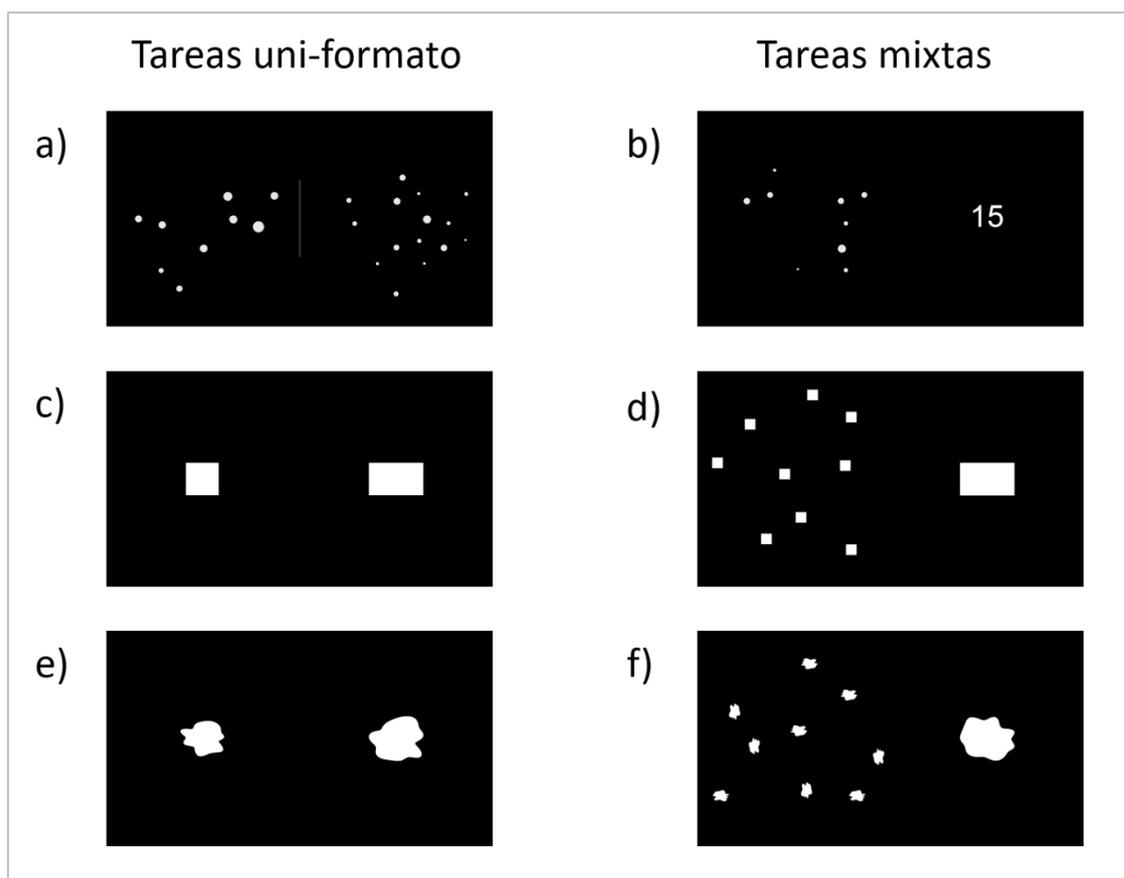


Figura 34. *Tareas de comparación de magnitudes: (a) comparación numérica no-simbólica; (b) comparación numérica mixta (simbólica vs no-simbólica); (c) comparación de áreas regulares continuas; (d) comparación de áreas regulares mixtas (continuas vs discretas); (e) comparación de áreas irregulares continuas; (f) comparación de áreas irregulares mixtas (continuas vs discretas). En todas las imágenes está representada la comparación de la cantidad 9 frente a 15 (ratio 0,6). Adaptado de García-Sanz (2022c).*

Las tareas de comparación numérica no-simbólica y mixta (Figura 34, partes a y b), así como la comparación de áreas continuas regulares e irregulares (Figura 34, partes c y e) se diseñaron siguiendo a Leibovich y Henik, (2014), Lyons et al. (2012) y Odic (2018).

Sin embargo, las tareas de comparación mixtas entre áreas continuas y discretas (Figura 34, partes d y f), no han sido utilizadas con anterioridad, al menos en la bibliografía rastreada.

En este caso, para la tarea de comparación con áreas regulares (Figura 34 d y [Apéndice 5](#)) se utilizaron rectángulos blancos cuya área fuera proporcional en número de píxeles a los valores numéricos: 9, 12, 15, 16, 18, 20, 21, 24, 25, 27, 28 (los mismos que los utilizados en las tareas anteriores) y se presentaron frente a conjuntos de cuadrados

blancos de área individual igual a 1. El conjunto de cuadrados se distribuye en la pantalla de forma análoga a los estímulos utilizados en las tareas de comparación numérica. En el ejemplo de la Figura 34 (parte d), se presenta a la derecha un rectángulo de área 15, frente a 9 cuadrados de área unidad en el lado izquierdo. En este caso la tarea consiste en indicar qué área es mayor, si el área acumulada por el conjunto de cuadrados o el área individual del rectángulo. Se trata de una tarea que implica estimar el área acumulada de un conjunto de elementos y compararlo con el área individual de una figura. Se utilizaron cuadrados con área igual a una unidad para favorecer estrategias basadas en el concepto de medida. Esta tarea, por tanto, permite evaluar la capacidad de integración entre la información cuantitativa numérica (número de cuadrados) y la espacial (tamaño).

En la tarea de comparación mixta con áreas irregulares se diseñó del mismo modo, sólo que utilizando figuras amorfas. En este caso, las formas se presentaron con una rotación variable respecto a su eje (Figura 34 parte f y [Apéndice 5](#) parte b).

En conclusión, se utilizaron un total de seis tareas: dos tareas numéricas, dos tareas espaciales con figuras regulares y dos tareas espaciales con formas amorfas. De las seis tareas, tres de ellas eran comparaciones en el mismo formato (para evaluar el procesamiento de una magnitud singular) y tres de ellas eran tareas de formato mixto (para evaluar la capacidad de integrar magnitudes).

En todas las tareas, se realizaron 108 ensayos, en los que la mitad de las veces la cantidad mayor estaba a la izquierda y la mitad a la derecha, y la mitad de las veces la cantidad mayor estaba en un formato y la mitad en otro. El orden de presentación de los estímulos dentro de cada bloque fue aleatorio para cada participante. Para evitar los efectos de la fatiga visual, se realizaron dos descansos entre bloques de tareas, después de la segunda tarea, y después de la cuarta.

En los tres grupos de edad se utilizaron exactamente las mismas tareas, con el mismo número de ensayos y los mismos estímulos. Sólo fueron diferentes las instrucciones dadas a los participantes, que en el caso de los niños incluían la mediación didáctica de dos figuras animadas (gatos) y explicaciones más acordes a su edad ([Apéndice 6](#)).

3.2.5. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó el programa *IBM SPSS Statistics 27* (IBM Corp.). El análisis descriptivo tuvo en cuenta el tipo de variables del estudio. Las variables cuantitativas se presentan mediante medidas de centralidad (media) y de dispersión (desviación estándar). La media y la desviación estándar fueron calculadas para describir las características demográficas de la muestra. La comparación de la distribución para variables de tipo cuantitativo se realizó mediante pruebas paramétricas, ya que los resultados de la prueba de Kolmogórov-Smirnov permitían asumir la normalidad en los datos de la muestra. Se utilizaron, por tanto, tres modelos factoriales para grupos independientes. El nivel de significación para las pruebas de decisión estadística se situó en 0,05.

Cada uno de los análisis factoriales, se corresponde con una de las hipótesis (A, B y C) señaladas en el epígrafe 2.2.

A) Existen diferencias en el rendimiento en las diversas tareas de comparación numérica y espacial dentro y entre los grupos de edad.

Modelo factorial 3 x 6, correspondiente a los 3 grupos de edad (7, 12 y 19 años) y las 6 tareas de comparación (numérica no-simbólica, numérica mixta, área regular continua, área regular mixta, área irregular continua, área irregular mixta), controlando las covariables lateralidad y sexo.

B) Existen diferencias en el rendimiento en las tareas de comparación de áreas con formas regulares o irregulares dentro y entre los grupos de edad.

Modelo factorial 3 x 3 correspondiente a los 3 grupos de edad (7, 12 y 19 años) y a las tareas agrupadas según la magnitud (tareas numéricas, tareas espaciales con áreas regulares, tareas espaciales con áreas irregulares) controlando las covariables lateralidad y sexo (Figura 35).

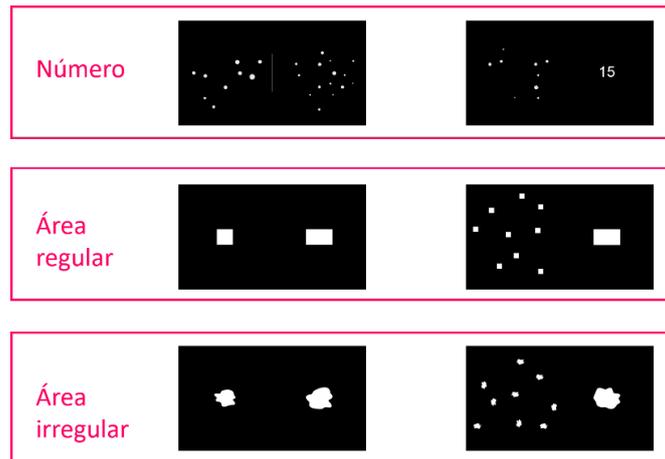


Figura 35. Tareas agrupadas según la magnitud: numérica, espacial regular, espacial irregular. Fuente: Elaboración propia

C) Existen diferencias en el rendimiento en las tareas de comparación del mismo formato y de formatos mixtos dentro y entre los grupos de edad.

Modelo factorial 3 x 2, correspondiente a los 3 grupos de edad (7, 12 y 19 años) y a las tareas agrupadas en tipos de tarea (uni-formato o mixta), controlando las covariables lateralidad y sexo (Figura 36).

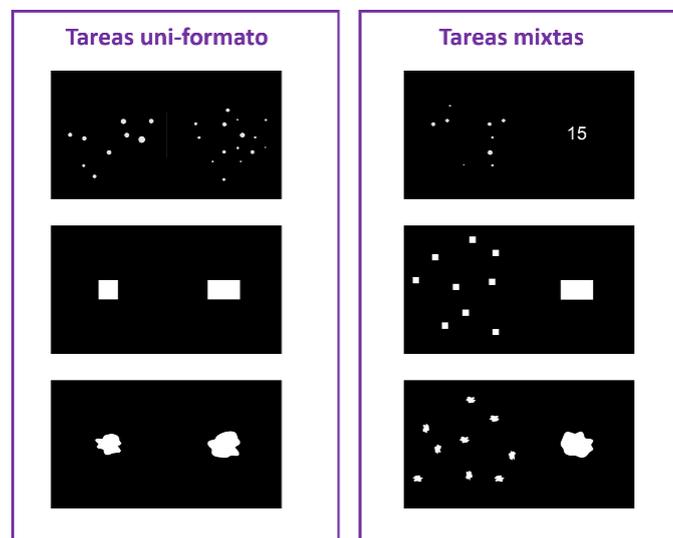


Figura 36. Tareas agrupadas según el tipo de procesamiento: simple (tareas uni-formato) o de integración (tareas mixtas). Fuente: Elaboración propia.

Se realizan también los análisis *post-hoc* de comparaciones por parejas, con los ajustes de Bonferroni. Estos análisis permitirán dar respuesta a las hipótesis D y E (ver epígrafe 2.2.).

Estudios previos muestran que la tasa de aciertos en tareas de comparación numérica, tareas de comparación de áreas y tareas de comparación de longitudes correlaciona positivamente con la edad; mientras que no hay una correlación significativa entre la edad y los tiempos de respuesta en estas tareas (Odic, 2018). Por este motivo para el análisis estadístico se utilizará como variable de desempeño el porcentaje de aciertos.

3.3. Estudio 3

3.3.1. Tipo de estudio: experimento aleatorizado simple ciego con condición control

Se trata de un estudio experimental con diseño intra-sujeto y tres condiciones experimentales: estimulación prefrontal, estimulación parietal y estimulación placebo (control). Los participantes desconocían el protocolo de estimulación aplicado en cada sesión, y se aleatorizó el orden en que cada participante recibía las sesiones de estimulación cerebral no invasiva.

3.3.2. Participantes

Los participantes de este estudio fueron adultos estudiantes de la Universidad de Barcelona (UB), de la Universitat Oberta de Catalunya (UOC) y de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB), hispanohablantes. La selección de la muestra se realizó por participación voluntaria no remunerada.

Criterios de inclusión:

- Estudiante universitario con edad comprendida entre los 18 y los 35 años.
- Habilidades espaciales con puntuación escalar (Pe) entre 7 y 13 puntos de la subprueba de Cubos del WAIS-IV (Wechsler, 2008).
- Habilidades aritméticas con puntuación estándar (PT) entre 85 y 115 puntos en la subprueba de aritmética del WRAT-4 (Wilkinson y Robertson, 2006).
- Disponibilidad para asistir a 4 sesiones experimentales de una hora de duración, con un intervalo mínimo entre sesiones de 24 horas.
- Cumplir con las condiciones para el uso de la estimulación eléctrica transcraneal (Antal et al., 2017; Bikson et al., 2016).
- Visión normal o corregida.

Criterios de exclusión:

- Antecedentes de enfermedad neurológica o psiquiátrica.
- Condición de incompatibilidad para el uso seguro de la tDCS (por ejemplo: embarazo o implantes metálicos en la cabeza) especificadas en el [Apéndice 7](#).

- Abuso o dependencia de sustancias que afecten al sistema nervioso durante los 6 meses previos a la estimulación, así como consumo de estimulantes (incluida cafeína) en las 3 horas previas al procedimiento.
- Lateralidad izquierda, según el inventario de Edimburgh (Oldfield, 1971).

La muestra inicial estuvo constituida por 20 participantes de los que se disponía de consentimiento informado. De ellos, 2 fueron excluidos después del cribado inicial por no cumplir los criterios de inclusión, 4 desertaron sin finalizar el procedimiento, y otros 2 se descartaron por datos incompletos.

La muestra final estuvo constituida por 12 participantes, 3 de género masculino y 9 femenino (Tabla 3). Otros estudios similares que aplican tDCS para analizar los efectos en la cognición numérica contaron con tamaños de muestra análogos -entre 9 y 16 participantes- (por ejemplo: Clemens et al., 2013; Brezis et al., 2016; Kasahara et al., 2013)⁹.

Tabla 3. *Caracterización de la muestra.*

	M	SD
Edad	21,58	3,94
Cubos WAIS (Pe)	10,17	1,69
Aritmética WRAT (PT)	96,92	8,32

NOTA: M=Media, SD=desviación estándar.

3.3.3. Aspectos éticos

El procedimiento experimental fue aprobado por el Comité de Ética de la Universitat Oberta de Catalunya, en septiembre de 2019.

⁹ Los investigadores somos conscientes de las limitaciones que implica el tamaño de muestra reducido. Sin embargo, nos permitimos señalar que el tamaño de la muestra no se basó en una decisión de los investigadores, sino que se debió única y exclusivamente a la ausencia total de financiación para este experimento, lo cual implicó que tuviéramos que utilizar un equipo de estimulación prestado (el cual sólo estaba disponible por dos meses), lo cual condicionó el número de participantes. Además, la falta de retribución económica o académica a los participantes hizo muy arduo el proceso de reclutamiento. Para tratar de minimizar de algún modo las repercusiones del reducido tamaño de la muestra se tomaron dos decisiones: primero, cambiar el diseño experimental, que inicialmente se había pensado inter-sujetos (con 3 grupos experimentales) a intra-sujetos, lo cual supuso que los participantes debieran asistir a una sesión experimental adicional. Y en segundo lugar, decidimos restringir los criterios de inclusión para asegurar una muestra lo más homogénea posible. En el epígrafe 5.3. se discute en detalle esta posible limitación del estudio.

Se obtuvieron los consentimientos informados de todos los participantes ([Apéndice 8](#)) y se garantizó la protección de datos mediante la aplicación de las políticas y lineamientos de la Guía de buenas prácticas para el tratamiento de datos de la Universidad Oberta de Catalunya (2018).

Todo el procedimiento se realizó bajo las directrices de seguridad, consideraciones éticas y guías de aplicación para el uso de la estimulación eléctrica transcraneal en la práctica clínica y la investigación (Antal et al., 2017; Bikson et al., 2016), asegurándose el bienestar y el estado de salud general de los participantes de acuerdo con la directiva del Comité de Ética y las directrices del REAL DECRETO 223/2004. Se aplicaron escalas analógicas visuales antes y después del procedimiento, para evaluar el bienestar de los participantes.

Durante todo el proceso experimental se siguió un protocolo de supervisión.

En lo concerniente a la transparencia de la investigación científica, el protocolo de la investigación fue publicado previamente en la plataforma *Open Science Framework* <https://osf.io/jh3yg/>.

3.3.4. Procedimiento

Se aplicó un procedimiento individual con cada uno de los participantes en el laboratorio del Institut de Neurociències de la Universidad de Barcelona.

Los participantes asistieron a 4 sesiones experimentales en días diferentes. En la primera sesión se realizó el cribado de los participantes; y en las tres siguientes se aplicó la estimulación transcraneal (parietal, prefrontal o placebo) simultánea a la realización de las tareas de comparación numérica y espacial. Se utilizaron las mismas seis tareas del estudio 2 (Epígrafe 3.2.4.), más una tarea de comparación numérica simbólica (Figura 37). Se utilizaron los mismos estímulos y ratios, con la única excepción de que se eliminaron las parejas correspondientes a la *ratio* más fácil (0,3). De esta manera, cada bloque consistió en 96 ensayos, en lugar de 108. Dentro de cada bloque los ensayos se presentaron en orden aleatorio para cada participante. Los bloques de tareas se aplicaron en el mismo orden para todos los participantes.

Cada participante asistió a las tres sesiones de estimulación a la misma hora del día, y en idéntico estado fisiológico (por ejemplo, con el mismo intervalo postprandial y con las

mismas horas de sueño). Se hizo una asignación aleatoria del orden en el que los participantes recibirían cada uno de los tres protocolos de estimulación (parietal prefrontal o placebo), y éstos desconocían la estimulación recibida en cada sesión.

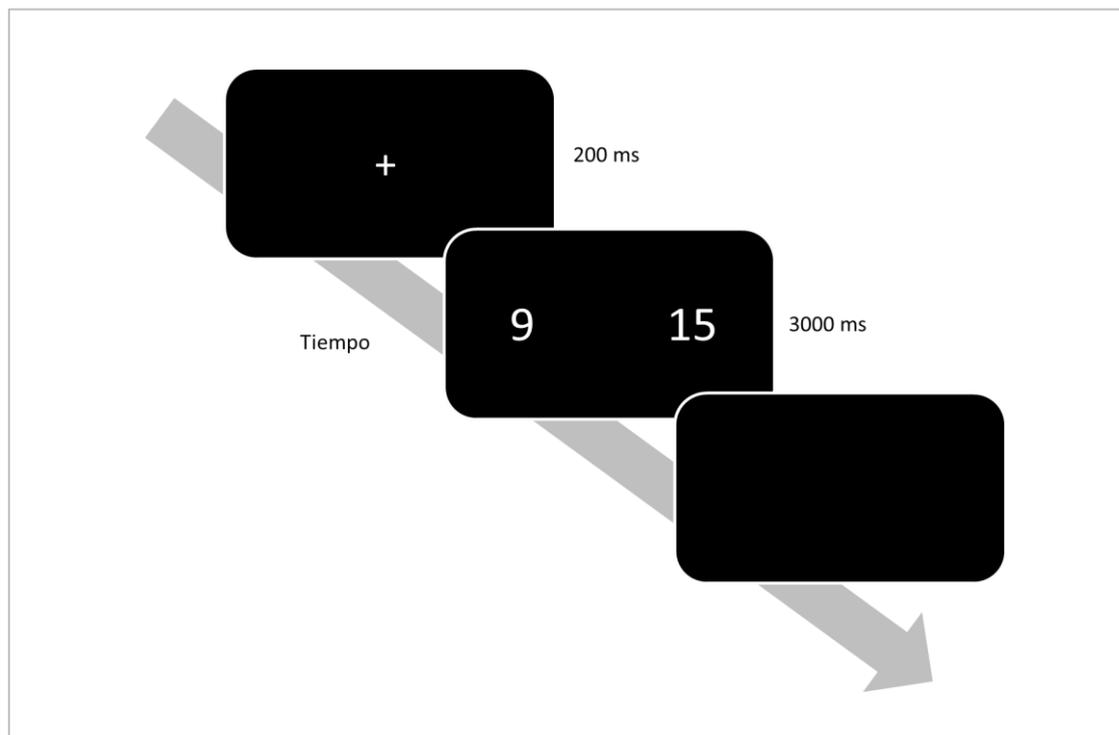


Figura 37. Tarea de comparación numérica simbólica. Los participantes debían indicar qué cantidad es mayor. Fuente: Elaboración propia.

El protocolo de la primera sesión consistió en:

- 1º Consentimiento informado.
- 2º Recogida de datos sociodemográficos.
- 3º Pruebas de cribado y evaluación de la lateralidad:
 - Subprueba de Cubos del WAIS-IV (Wechsler, 2008) en su versión española (Wechsler, 2012).
 - Subprueba de aritmética WRAT-4 (Wilkinson y Robertson, 2006).
 - Inventario de lateralidad de Edimburgh (Oldfield, 1971).
- 4º Revisión de los criterios de exclusión para tDCS.

El protocolo de las tres sesiones restantes fue:

- 1° Escalas analógicas visuales acerca del estado de bienestar (VAS-Pre).
- 2° Estimulación eléctrica transcranial tDCS multifocal.
- 3° (Simultáneamente) Evaluación de la capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial mediante tareas de comparación de magnitudes.
- 4° Cuestionario acerca de los posibles efectos adversos de la estimulación eléctrica.
- 5° Escalas analógicas visuales (VAS-Post).

3.3.5. Protocolo de estimulación

El equipo de tDCS empleado es un modelo STARSTIM 8 de Neuroelectrics ®. Se aplicó la corriente eléctrica por medio de electrodos circulares de 1 cm² colocados directamente sobre el cráneo. El protocolo de estimulación (intensidad, duración, etc.) se carga desde un programa de ordenador conectado inalámbricamente con el estimulador vía Bluetooth (Figura 38).



Figura 38. Disposición del aparato de estimulación y los electrodos en uno de los participantes. Con permiso expreso. Fuente: Elaboración propia.

La estimulación fue simultánea a la ejecución de las tareas de comparación de magnitudes. Este tipo de diseño, llamado tDCS *on-line*, ha sido utilizado en otros estudios de cognición numérica (por ejemplo, Brezis et al., 2016; Clemens et al., 2013).

Se aplicaron tres protocolos de tDCS multifocal diferentes, uno para cada sesión, todos ellos durante 20 minutos:

- PREFRONTAL: estimulación anódica con una intensidad de 2 mA sobre la DLPFC derecha, colocando el electrodo activo sobre la posición F4 del sistema 10/20 EEG.
- PARIETAL: estimulación anódica con una intensidad de 2 mA sobre el IPS derecho, colocando el electrodo activo sobre la posición P4 del sistema 10/20 EEG.
- SHAM (placebo): se aplicaron 3s de estimulación anódica de 2 mA al inicio y al final de los 20 minutos de la sesión sobre la posición F4 o P4. Este protocolo busca imitar las sensaciones producidas por la estimulación activa, pero sin aplicar una corriente eléctrica que pueda generar efectos; se usa por tanto como control ciego (Gandiga et al., 2006).

Con la estimulación PARIETAL se buscó modular la actividad del IPS, el cual se corresponde con las áreas de Brodmann 7 y 40. De acuerdo con E. Klein et al. (2013) y M. Okamoto et al. (2004) éstas áreas se corresponden con las posiciones P3 y P4 del sistema internacional 10/20 de colocación de electrodos para EEG. Por su parte, la estimulación PREFRONTAL está dirigida a la DLPFC (áreas de Brodmann 9 y 46), las cuales se corresponden con las posiciones F3 y F4 del sistema 10/20 EEG (Luft et al., 2017; Mosbacher et al., 2020).

En nuestro estudio se eligieron regiones frontales y parietales del hemisferio derecho (P4 y F4, respectivamente) basándonos en la evidencia acerca de la implicación de redes prefrontales y parietales derechas en el procesamiento de magnitudes espaciales y numéricas (Riemer et al., 2016; Rusconi et al., 2013).

El montaje de electrodos utilizado se basó en Hartmann et al. (2019) quienes ubican un electrodo activo (ánodo) sobre la región diana y varios electrodos de retorno dispuestos circularmente alrededor. Este montaje se denomina tDCS multifocal y su principal

ventaja es la resolución espacial; ya que disminuye el campo eléctrico en las regiones adyacentes y focaliza la estimulación sobre la región diana.

En nuestro caso, la ubicación exacta de los electrodos de retorno fue determinada utilizando el sistema de modelización computacional StarStim®, el cual realiza una estimación de la intensidad del campo eléctrico generada en todo el encéfalo para cada montaje, permitiendo ajustar el montaje a aquel que genere un campo más focalizado sobre la región diana.

La Figura 39 muestra el montaje de los electrodos en la estimulación PREFRONTAL, con el ánodo sobre F4, y los electrodos de retorno en las posiciones Fp2, Fz, F3, C4, F8 del sistema 10/20 EEG. Como se puede observar, el campo eléctrico tiene su máxima intensidad en torno al DLPFC derecho, y presenta intensidades muy bajas en las regiones adyacentes.

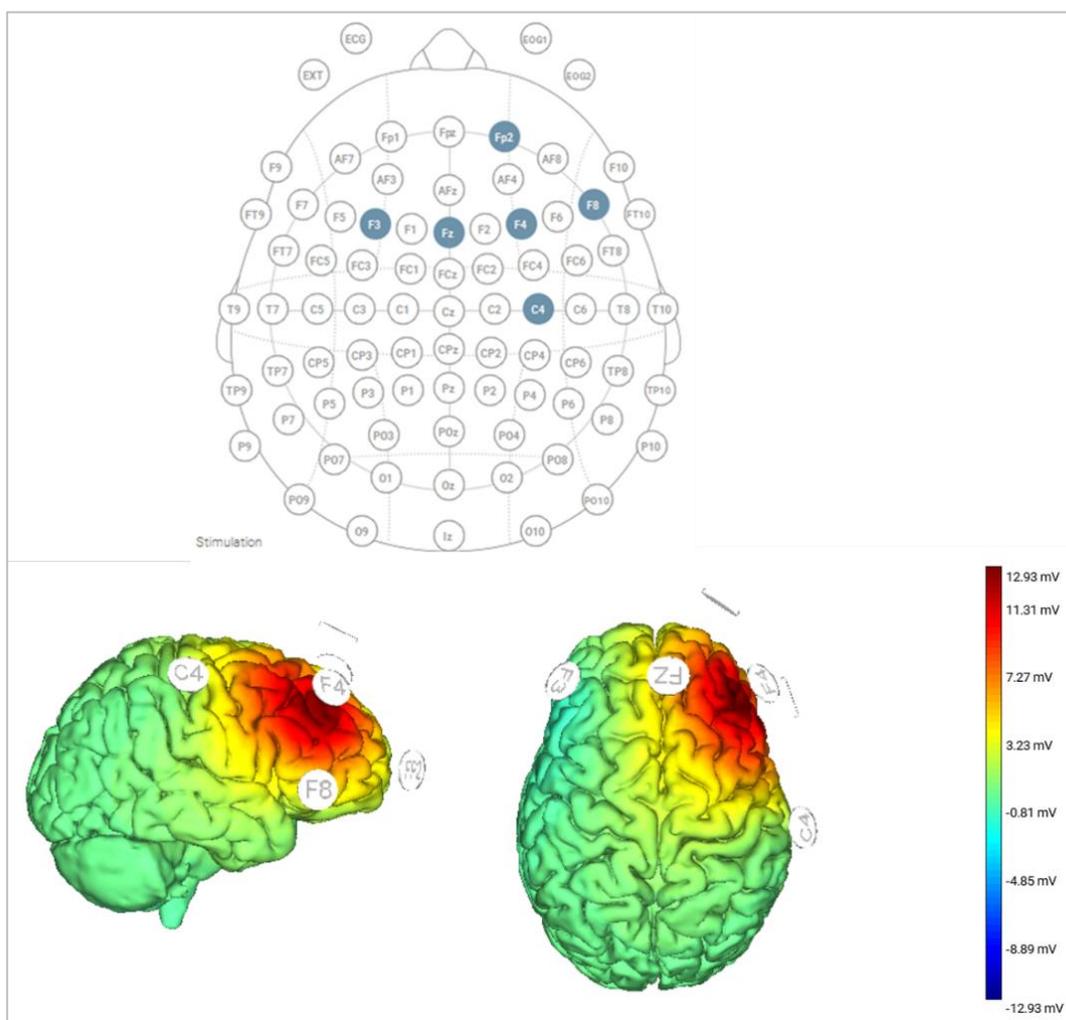


Figura 39. Montaje de los electrodos en la estimulación frontal (arriba) y modelo del campo magnético generado (abajo). Fuente: elaboración propia.

La Figura 40 muestra el montaje de los electrodos en la estimulación PARIETAL con el ánodo sobre P4, y los electrodos de retorno en las posiciones C2, Pz, O2, P8, T8; así como el modelo del campo eléctrico generado mediante este protocolo.

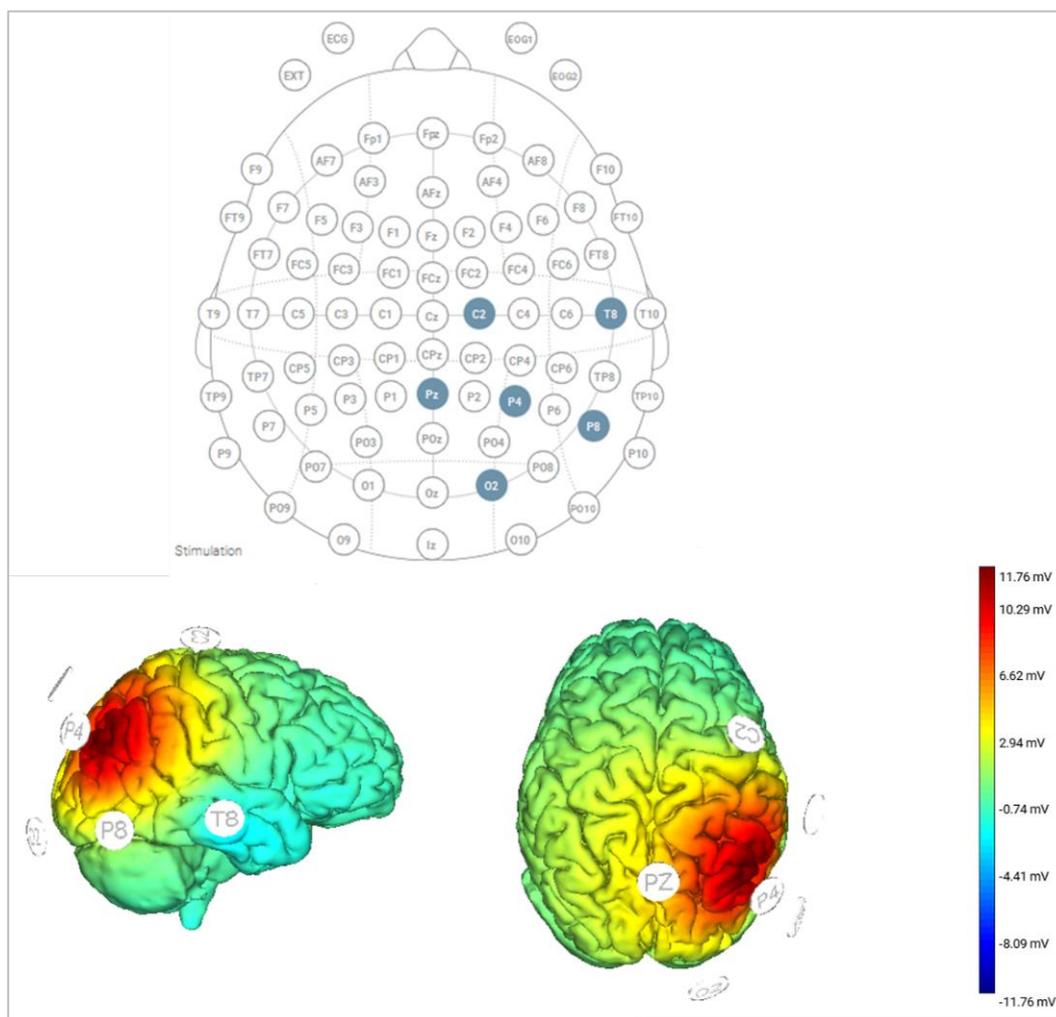


Figura 40. Montaje de los electrodos en la estimulación parietal (arriba) y modelo del campo eléctrico generado. Fuente: elaboración propia.

La intensidad de la corriente aplicada en los dos protocolos activos fue de 2 mA. Esta intensidad se considera sub-umbral y, por lo tanto, no genera directamente potenciales de acción, pero modula la actividad neuronal espontánea (Bikson et al., 2004). En nuestro caso, aplicamos estimulación anódica sobre la corteza prefrontal y parietal, para aumentar la excitabilidad de estas regiones. Se sabe que la estimulación anódica provoca aumento de la excitabilidad neuronal (Nitsche et al., 2007) ya que produce despolarización, y por

tanto los potenciales de membrana están más cercanos al potencial umbral (Liebetanz et al., 2002). Se espera, por tanto, generar una mejora en la cognición numérica (procesamiento e integración de magnitudes numéricas y espaciales).

3.3.6. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó el programa IBM SPSS Statistics 27. El análisis descriptivo tuvo en cuenta el tipo de variables del estudio. Las variables cuantitativas se presentan mediante medidas de centralidad (media) y de dispersión (desviación estándar). La media y la desviación estándar fueron calculadas para describir las características demográficas de la muestra. La comparación de la distribución para variables de tipo cuantitativo se realizó mediante pruebas paramétricas, ya que los resultados de la prueba de Kolmogórov-Smirnov permitían asumir la normalidad en los datos de la muestra. Se utilizaron, por tanto, seis modelos factoriales para muestras emparejadas. El nivel de significación para las pruebas de decisión estadística se situó en 0,05.

Los análisis factoriales se corresponden con las hipótesis (A, B y C) señaladas en el epígrafe 2.3. considerando como medida del rendimiento los porcentajes de aciertos y los tiempos de reacción.

A) Hay una interacción entre la condición de estimulación (prefrontal, parietal y control) y el rendimiento en cada una de las tareas.

Modelo factorial 7 x 3 cruzando las 7 tareas (numérica simbólica, numérica no-simbólica, numérica mixta, área regular continua, área regular mixta, área irregular continua, área irregular mixta) y las tres condiciones de estimulación (PREFRONTAL, PARIETAL y SHAM). El análisis se repitió con cada variable dependiente: tiempos de reacción y porcentaje de aciertos.

B) Hay una interacción entre la condición de estimulación (prefrontal, parietal y control) y el rendimiento en las tareas según su magnitud (numérica, espacial regular, espacial irregular).

Modelo factorial 3 x 3 cruzando los tres tipos de magnitudes (numéricas, espacial con áreas regulares, y espacial con áreas irregulares) con las 3 condiciones de estimulación (PREFRONTAL, PARIETAL y SHAM). El análisis se repitió con cada variable dependiente: tiempos de reacción y porcentaje de aciertos.

C) *Hay una interacción entre la condición de estimulación (prefrontal, parietal y control) y el rendimiento en las tareas en el mismo formato o en formatos mixtos.* Modelo factorial 2 x 3 cruzando los dos tipos de tareas (uni-formato y mixtas) con las 3 condiciones de estimulación (PREFRONTAL, PARIETAL y SHAM). El análisis se repitió con cada variable dependiente: tiempos de reacción y porcentaje de aciertos.

Se realizan también los análisis *post-hoc* de comparaciones por parejas, con los ajustes de Bonferroni. Estos análisis permiten dar respuesta a las hipótesis D y E (Epígrafe 2.3.).

Teniendo en cuenta los estudios previos que reportan efectos de la estimulación eléctrica sobre las tasas de acierto y sobre los tiempos de respuesta (TR) en tareas relacionadas con la cognición numérica (por ejemplo, Hauser et al., 2013; Pope et al., 2015), el análisis estadístico se realizará sobre ambas variables de desempeño.

Adicionalmente a este análisis, se aplicó el modelo de difusión EZ (Wagenmakers et al., 2007) el cual consiste operacionalizar las variables de tal manera que se evite el posible sesgo que podría ocasionar el contrabalanceo entre los tiempos de reacción y el porcentaje de aciertos. En el ámbito de la psicometría se considera que las tareas que implican la elección entre dos posibles respuestas presentan el inconveniente de un posible sesgo por el contrabalanceo entre la rapidez en la respuesta y su precisión. Por ejemplo, un participante que responde muy rápido, pero con muchos errores; frente a otro que tarda más en responder, pero comete menos fallos. Para evitar esto, R. Ratcliff (1978, 2002) propuso un modelo de difusión que permite analizar los datos en términos de los parámetros de un modelo cognitivo que tiene en cuenta las variables de rendimiento y otros factores como la varianza de los tiempos de reacción; y calcula unas variables transformadas, las cuales eliminan el posible error fruto del contrabalanceo. Este modelo se basa en que el tiempo de respuesta se divide en tiempo de no-decisión y tiempo de decisión. El tiempo de no- decisión se refiere al tiempo invertido en procesar los estímulos y codificar la respuesta, es un tiempo que no depende de la habilidad cognitiva que se quiere estudiar. Mientras que el tiempo de decisión sí depende de la habilidad, ya que se refiere al tiempo para la toma de decisión acerca de la respuesta correcta. El modelo de difusión presupone que el tiempo de decisión se invierte en acumular evidencia acerca de cada una de las dos posibles opciones de respuesta, hasta alcanzar un umbral determinado. El modelo de difusión EZ (Wagenmakers et al., 2007) es una versión simplificada del modelo cognitivo de difusión (Ratcliff, 2002) que permite calcular fácilmente las

variables transformadas (tasa de deriva, tiempo de no-decisión, y umbral de decisión), y por tanto evitar el sesgo debido al contrabalanceo entre TR y % de aciertos en tareas que sólo tienen dos posibles respuestas.

Para esta tesis, se llevó a cabo la transformación de las variables según el modelo de difusión EZ y se realizaron los análisis estadísticos factoriales usando como variable dependiente cada una de las variables transformadas ([Apéndice 9](#)). Sin embargo, dado que los resultados estadísticos finales no difirieron con respecto a los obtenidos con las variables directas, en esta tesis se reportarán y discutirán sólo los análisis con las variables de desempeño directas (TR y % aciertos)¹⁰.

¹⁰ Ninguno de los estudios de estimulación eléctrica en cognición numérica publicados en los últimos 20 años utiliza las variables transformadas, por ello los resultados de nuestro análisis estadístico con estas variables se reportará exclusivamente en el Apéndice 9.

4. Resultados

4.1. Estudio 1: Revisión sistemática y metaanálisis acerca del uso de las NIBS en cognición numérica

4.1.1. Estudios incluidos

Mediante las búsquedas iniciales de artículos se identificaron 96 estudios acerca de la TMS y 186 acerca de estimulación eléctrica, en relación con la cognición numérica. Después de leer los títulos y resúmenes se descartaron 4 y 17 artículos, respectivamente, por no estar relacionados con la temática. Se leyó el texto completo de los demás artículos y se excluyeron 78 y 140 estudios por no cumplir los criterios de inclusión.

El diagrama de flujo del proceso de selección de artículos, de acuerdo con la metodología PRISMA (Page et al., 2021), para los estudios de estimulación magnética está representado en la Figura 41, y el correspondiente a los estudios de estimulación eléctrica en la Figura 42. Después de este proceso, resultaron incluidos 21 estudios de TMS y 34 estudios de estimulación eléctrica.

Dentro de los estudios de estimulación eléctrica incluidos, se hizo una selección adicional de las investigaciones que analizan los efectos de la neuromodulación sobre las capacidades específicamente aritméticas simbólicas, para realizar el análisis cuantitativo acerca de los efectos de la tDCS sobre la habilidad del cálculo en adultos sanos. Este proceso dio como resultado 12 estudios incluidos en el metaanálisis. Dado que alguna de las publicaciones contempla más de un experimento, el metaanálisis incluyó un total de 35 efectos (Tabla 9).

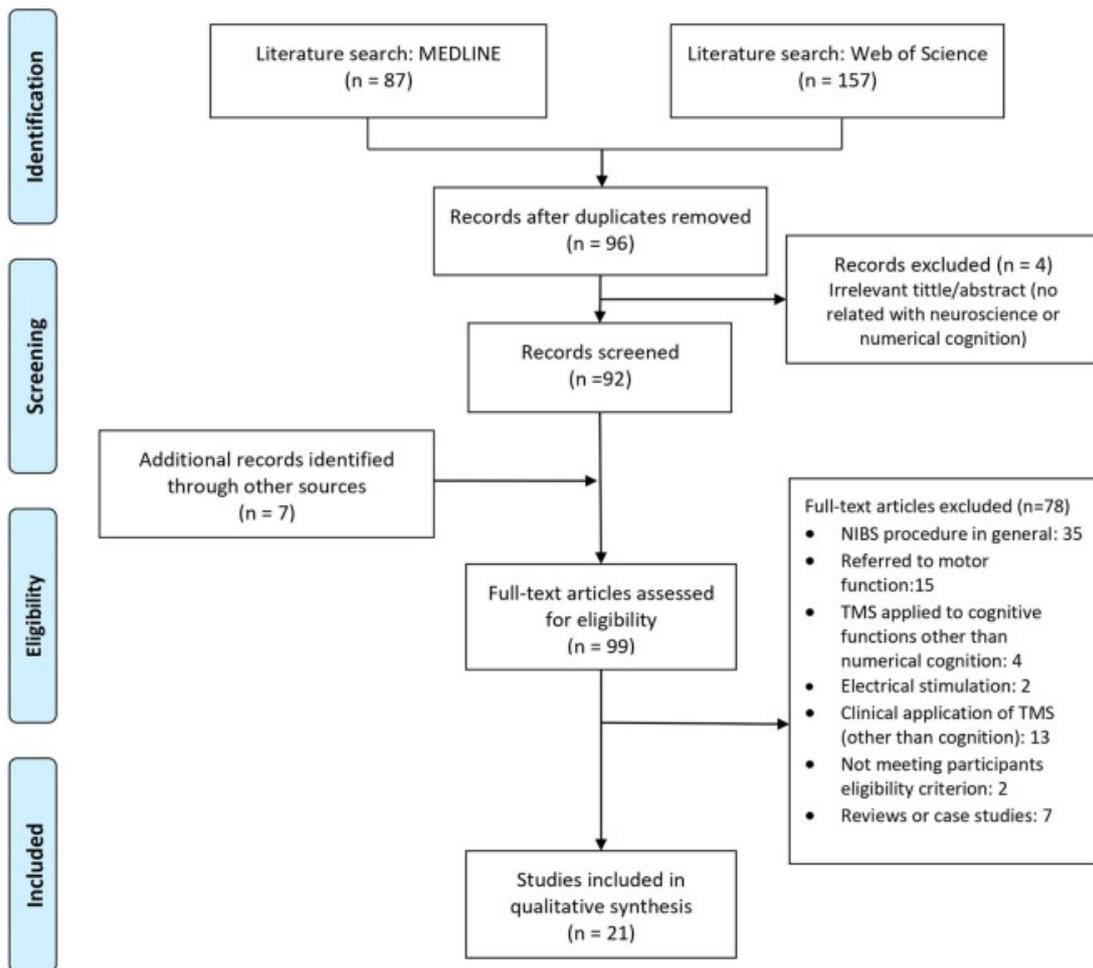


Figura 41. Diagrama de flujo PRISMA del proceso de selección de artículos para la revisión sistemática acerca del uso de la TMS para el estudio de la cognición numérica. Tomado de García-Sanz (2022a).

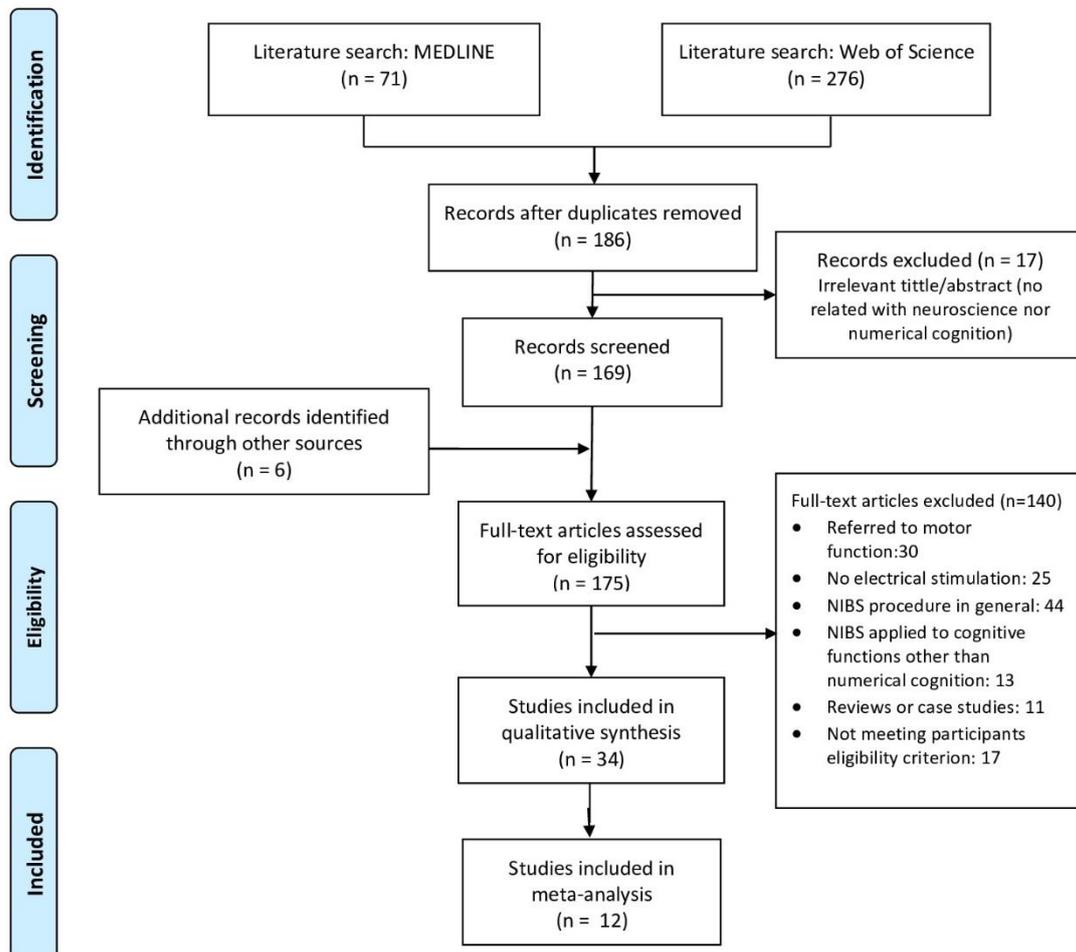


Figura 42. Diagrama de flujo PRISMA del proceso de selección de artículos para la revisión sistemática acerca del uso de la estimulación eléctrica para el estudio de la cognición numérica. Fuente: Elaboración propia, imagen preparada para un artículo en proceso de publicación.

A continuación, se presentan los datos bibliométricos y sociodemográficos de los estudios incluidos en la revisión sistemática y en el metaanálisis.

Tabla 4. Datos bibliométricos y sociodemográficos de los estudios incluidos en la revisión sistemática de literatura.

Tipo de estimulación	Estudio	Tamaño de la muestra	Edad promedio	Desviación estándar (Rango)	Género
Estimulación magnética	Cappelletti, 2009	6	22,2	(21-23)	3M; 3F
	Salillas, 2009	12	22,3	NS	3M; 9F
		8	24,1	NS	2M; 6F
	Cattaneo, 2009	9	26,25	NS	7M; 2F
	Cohen Kadosh, 2010a	7	22,71	2,3	1M;6F
		6	24,33	2,35	0M;6F
	Andres, 2011	10	21	2	10M;0F
	Renzi, 2011	18	23,4	2,9	9M;9F
	Rusconi, 2011	10	30,1	NS	5M;5F
	Dormal, 2012	10	24	0,5	10M;0F
	Cohen Kadosh, 2012	5	28,6	4,5	4M;1F
	Salillas, 2012	12	23	(21-26)	3M;9F
		10	24	(23-27)	3M;7F
	Cheng, 2013	11	24,2	5,2	2M;9F
		11	24	5,39	3M;8F
		11	22,6	5,2	2M;9F
	Sasanguie, 2013	17	22	4,2	10M;7F
	Rusconi, 2013	21	26	(20-37)	11M;10F
	Hayashi, 2013	26		(19-30)	12M;14F
		10		(20-30)	3M;7F
		14		(19-36)	6M;8F
		16		(20-30)	7M;9F
	Lecce, 2015	14	26,7	(19-40)	5M;9F
	Riemer, 2016	22		(21-35)	7M;15F
	Maurer, 2016	20	25	(22-29.5)	9M;11F
	Grotheer, 2016	13	25	3	1M;12F
	Montefinese, 2017	10	25,27	4,79	3M;7F
		10	28,11	5,19	3M;7F
	Fresnoza, 2020	16	26,25	7,07	7M, 9F
	Klichowski, 2020	20	20,9	1.6	20-27
Estimulación eléctrica	Cohen Kadosh, 2010b	15	NS	NS	NS
	Clemens, 2013	10	43	12,4	10M;0F
	Kasahara, 2013	16	21,1	20-23	11M;5F
	Hauser, 2013	21	22,8	NS	10M;11F
		16	23,6	NS	7M;16F
	Snowball, 2013	13	20,92	2,1	6M;7F
		12	21,42	3,23	6M;6F
	Cappelletti, 2013	40	25,8	(19 –36)	18M, 22F
	Klein, 2013	24	26,2	(20–44)	10M, 14F
	Sarkar, 2014	25	21,4	3,5	10M;15F
		20	23,54	3,11	13M;7F
	Javadi, 2014	12	22,8	NS	5M;7F
		13	22,18	NS	6M;7F
	Pope, 2015	21	22	5	8M;13F
		21	22	2,3	7M;14F
21		21,4	3,8	3M;18F	
Rutsche, 2015	23	21,78	2,66 (19-32)	6M;17	

Artemenko, 2015	25	23,28	4,51	3M, 22F
Li, 2015	18	NS	20-42	9M;9F
Houser, 2015	32	NS	NS	
Grabner, 2015	60	21,98	NS	30M;30F
Cappelletti, 2015	30	24,4	(19 -35)	12M,18F
	30	65,5	(60-73)	13M, 17F
Hauser 2016	24	22,4	3	14M;10F
	24	22,4	3,6	14M;10F
Popescu 2016	16	21,94	3,55	9M;7F
	16	22,81	3,23	9M;7F
Brezis 2016	20	25	20-35	7M;13F
	12	26	21-30	6M;6F
Arshad 2016	40	23	NS	18M;22F
Pasqualotto 2016	18	21,2	3,1	9M;9F
	18	21,3	2,6	9M;9F
	18	22	4,4	9M;9F
Schroeder 2016	72	23,9	18-42	17M;55F
Dormal, 2016	39	24	3,9	11M,28F
Schroeder 2017a	24	22,4	18-30	4M;20F
	24	23	18-27	5M;19F
Di Bernardi 2017	60	23,03	4,05 (18-34)	47M;13F
Di Rosa 2017	22	21,45	1,79	7M;15F
	20	24,4	2,56	10M;10F
Schroeder 2017b	24	21,8	(18-26)	5M;19F
To, 2018	45	23,52	4,01	23M, 22F
Bieck, 2018	48	23,48	3,30	19M,19F
Karolis 2019	54	20,6	2	17M;37F
Hartmann 2019	18	24,5	22-30	10M;8F
Mosbacher 2020	62	25,9	5,1	24M;38F
Peña, 2021	28	27,68	13,57	NS
	28	25,29	8,80	
	28	28,93	12,78	
Mosbacher, 2021	137	22,5	3,8	48M, 89F

NOTA: M: masculino, F: femenino. NS: datos no suministrados en la publicación

4.1.2. Resultados referentes a la estimulación magnética

La Tabla 5 muestra en síntesis los procedimientos de TMS empleados en las investigaciones, y los principales efectos de cada protocolo de estimulación magnética sobre la cognición numérica, prestando especial atención a las regiones corticales que fueron estimuladas. Todas las investigaciones analizadas se basan en el poder inhibitorio de la estimulación magnética, es decir, utilizaron parámetros de estimulación que se consideran disruptores, con la finalidad de generar una “lesión virtual” transitoria en una región específica del encéfalo. De este modo buscaron analizar cómo afecta al procesamiento numérico y al cálculo la inactivación temporal de una zona del encéfalo,

y establecer relaciones causales entre estas regiones y determinadas funciones dentro de la cognición numérica como el procesamiento numérico, el procesamiento espacial, la aritmética no simbólica, etc.

A continuación sintetizamos los hallazgos encontrados en cuanto a los protocolos de estimulación, las regiones estimuladas y los métodos de localización empleados para ubicar el estimulador sobre la región diana. Así como los principales efectos generados por cada protocolo de estimulación, y los aspectos referentes a la calidad y fiabilidad de los estudios teniendo en cuenta el diseño investigativo y los controles utilizados.

Tabla 5. Síntesis de los estudios de TMS incluidos en la revisión sistemática.

Estudio	Protocolo (Frecuencia)	Tiempos de estimulación	Intensidad	Región estimulada	Método de localización	N	Diseño experimental	Controles	Efectos de la estimulación
Cappelletti et al., 2009	rTMS (10 Hz)	Duración: 500 ms Al momento de la aparición del primer estímulo	Fija 60% MSO	IPS izq IPS dro	Sistemas de neuronavegación basados en IRMf grupal	6	Ensayo controlado pseudoaleatorizado Intra-sujeto	Estimulación placebo No-estimulación	Los juicios de cantidad con estímulos numéricos y no numéricos se vieron significativamente afectados (TRs más largos) después de rTMS a IPS izquierdo o derecho, así como tareas conceptuales numéricas que no requerían comparaciones numéricas. Sin afectar los procesos perceptivos o conceptuales sobre números que no involucran estímulos numéricos o de cantidad.
Salillas et al., 2009	spTMS	Exp 1 Pulsos a 100, 150, 200 ms desde la aparición del primer estímulo	Relativa 110% PT Individual	VIPS dro VIPS izq	Sistema de neuronavegación sin imágenes radiológicas	12	Ensayo controlado aleatorizado Intra-sujeto	Estimulación en vertex	La TMS sobre el VIPS disminuye el rendimiento en tareas de detección de la dirección del movimiento y en tareas de comparación numérica, lo que sugiere que estos procesos comparten un sustrato neuronal común
		Exp 2 Pulso a 200 ms desde la aparición del primer estímulo	Relativa 110% PT Individual	VIPS dro VIPS izq	Sistemas de neuronavegación basados en IRMe individual	8		No	La estimulación sobre el VIPS contralateral al campo visual donde aparece el número produce una disminución del rendimiento en comparación con la estimulación ipsilateral
Cattaneo et al., 2009	tTMS	Pulsos a 0, 75, 150 ms en el intervalo entre el cador y desde la aparición del primer estímulo	Fija 65% MSO	AG dro AG izq	Sistemas de neuronavegación basados en IRMe individual	9	Ensayo controlado pseudoaleatorizado Intra-sujeto	Control tareas No-estimulación	En la condición de priming con números pequeños: la TMS sobre el AG derecho, abolió el efecto del priming numérico en una tarea de bisección. Mientras que la TMS sobre el AG izq no tuvo efecto significativo. Mientras que en la condición de priming con números grandes tanto la estimulación izq como dra del AG modularon el efecto del priming numérico.
Cohen Kadosh, et al., 2010a	TMSA	Pulsos bifásicos a 180, 280, y 380 ms desde la aparición del primer estímulo	Fija 60% MSO	IPS dro IPS izq	Sistemas de neuronavegación basados en RM grupal	7, 6	Ensayo controlado pseudoaleatorizado Intra-sujeto	Estimulación en vertex y tareas pre-estimulación	Mediante el uso de un paradigma de adaptación., los resultados evidenciaron la disociación entre el procesamiento de dígitos y números verbales en el IPS derecho y la doble disociación entre los diferentes formatos en el IPS izquierdo. Se concluye que las representaciones numéricas del IPS izquierdo y derecho son dependientes del formato

ESTUDIO	Protocolo (Frecuencia)	Tiempos de estimulación	Intensidad	Región estimulada	Método de localización	N	Diseño experimental	Controles	Efectos de la estimulación
Andres et al., 2011	rTMS (10 Hz)	4 pulsos Duración: 300 ms 100 ms desde la aparición del primer estímulo	Fija 65% MSO	HIPS dro HIPS izq PSPL dro PSPL izq	Sistemas de neuronavegación basados en IRMf individual	10	Ensayo controlado aleatorizado Intra-sujeto	Estimulación en vertex	Aumento de los en operaciones de cálculo (resta y multiplicación) después de la estimulación del HIPS izquierdo o derecho, además la estimulación del HIPS generó un aumento la tasa de error en la multiplicación. Mientras que el PSPL no es crucial para resolver problemas aritméticos básicos: ni en operaciones resueltas por procedimientos de cálculo (resta), ni en operaciones resueltas por recuperación de memoria (multiplicación).
Renzi et al., 2011	TMSA	Un solo pulso al momento de la aparición del primer estímulo	Fija 65% MSO	PPC dro PPC izq	Sistema 10/20 EEG	18, 11	Ensayo controlado pseudoaleatorizado Intra-sujeto	Estimulación en vertex No-estimulación	Reducción del efecto de adaptación (diferencia entre RT en los ensayos congruentes e incongruentes) por TMS sobre PPC-izq y PPC-dro, en un paradigma de adaptación de la dirección del movimiento. (Congruencia entre movimiento hacia la izquierda con números pequeños o movimiento hacia la derecha con números grandes). Los resultados sugieren una superposición funcional en las representaciones neurales de la dirección del movimiento y la información de la magnitud numérica.
Rusconi et al., 2011	rTMS (5 Hz)	3 pulsos Duración: 400 ms desde la aparición del primer estímulo	Relativa 110% Individual 1 aMT	IFG dro IFG izq FEF dro FEF izq	Sistemas de neuronavegación basados en IRMe individual	10	Ensayo controlado pseudoaleatorizado Intra-sujeto	Estimulación en vertex	El efecto SNARC (que consiste en la ventaja de las respuestas izquierdas a los números pequeños 1-4 y las respuestas derechas a los números grandes 6-9) no se vio afectado por el sitio de estimulación en el juicio de paridad, mientras que durante los juicios de magnitud, se eliminó tanto para números pequeños como grandes con la estimulación del IFG derecho, y para números pequeños con la estimulación del FEF derecho.
Dormal et al., 2012	rTMS (10 Hz)	5 pulsos Duración: 400 ms desde la aparición del primer estímulo	Fija 65% MSO	IPS dro IPS izq	Sistemas de neuronavegación basados en IRMf individual	10	Ensayo controlado pseudoaleatorizado Intra-sujeto	Estimulación en vertex	La estimulación del IPS derecho aumentó la tasa de error en dos tareas: una tarea numérica no-simbólica y una tarea de estimación de longitudes. Lo cual sugiere que la integridad del IPS derecho es necesaria para discriminar numerosidades y realizar juicios precisos de longitudes.
Cohen Kadosh et al., 2012	rTMS	Pulsos a 220, 320, y 420 ms desde la aparición del primer estímulo t	Fija 60% MSO	IPS dro IPS izq	Sistemas de neuronavegación basados en IRMf individual	5	Ensayo controlado aleatorizado Intra-sujeto	Estimulación placebo Tareas control	La estimulación del IPS derecho disminuyó el procesamiento numérico automático, como lo indica la reducción del efecto de congruencia con el tamaño (TR más grandes para ensayos incongruentes). Y también afecta al procesamiento numérico intencional, como lo indica un efecto de distancia numérica significativamente reducido. Sin embargo la estimulación del IPS izquierdo no afectó al procesamiento automático ni al intencional.

Estudio	Protocolo (Frecuencia)	Tiempos de estimulación	Intensidad	Región estimulada	Método de localización	N	Diseño experimental	Controles	Efectos de la estimulación
Salillas et al., 2012	spTMS	Pulsos simples a 150, 200, 250, o 300 ms desde la aparición del primer estímulo	Relativa 110% Individual PT	VIPS dro VIPS izq HIPS dro HIPS izq	Sistema de neuronavegación sin imágenes radiológicas	12	Ensayo controlado aleatorizado Intra-sujeto	Estimulación en veTRex	El rendimiento en las operaciones de suma se ve afectado por la estimulación del HIPS de ambos hemisferios: ya que hay un aumento de TR, pero no se ve afectado por la estimulación del VIPS. Mientras que el rendimiento en la multiplicación se ve afectado por la estimulación del VIPS de ambos hemisferios y del HIPS izquierdo (aumento de TR). No hubo efectos de interacción significativos relacionados con los tiempos de la estimulación.
				VIPS dro VIPS izq HIPS dro HIPS izq	Sistemas de neuronavegación basados en RM e individual	10		Estimulación contralateral	La disrupción del IPS en cualquiera de los hemisferios en comparación con los sitios de control o el contraste de la presentación visual ipsilateral frente a la contralateral da como resultado una pérdida de eficiencia en forma de un aumento de los TRs (tanto en la suma como en la multiplicación). Tanto el IPS izquierdo como el derecho están implicados en la eficiencia del cálculo exacto
Cheng et al., 2013	cTBS (Burst: 50 Hz, Tain: 5 Hz) ²	Duración: 20 s	Fija 40% MSO	HIPS dro HIPS izq	Sistemas de neuronavegación basados en RM grupal	21	Ensayo controlado aleatorizado Inter-sujeto	Estimulación en vertex Control tareas pre-estimulación	Left IPS-TBS impaired quantity processing (slower TRs) and facilitated order processing (speeded TRs) Right IPS-TBS had no specific effect on either order or quantity processing. La estimulación sobre el IPS izquierdo empeoró el procesamiento de cantidades (TR más lentos) y facilitó el procesamiento del orden (TR más rápidos). Mientras que la estimulación derecha no tuvo efectos específicos en ninguno de los procesamientos.
Sasanguie et al., 2013	TRMS (10 Hz)	Duración: 500 ms desde la aparición del primer estímulo	Relativa 110% Individual aMT	IPS dro IPS izq	Sistemas de neuronavegación basados en RM grupal	17	Ensayo controlado pseudoaleatorizado Intra-sujeto	Estimulación en vertex	La estimulación sobre el IPS izquierdo pero no sobre el IPS derecho eliminó el efecto de distancia por Priming cuando el estímulo es una numerosidad simbólica o no simbólica. Sin embargo, no hubo efectos de la estimulación sobre el IPS derecho o izquierdo cuando el estímulo era un número arábigo. Lo cual sugiere un rol crucial del IPS izquierdo en el mapeo entre numerosidades simbólicas y no simbólicas pequeñas.

Estudio	Protocolo (Frecuencia)	Tiempos de estimulación	Intensidad	Región estimulada	Método de localización	N	Diseño experimental	Controles	Efectos de la estimulación
Rusconi et al., 2013	spTMS	Pulsos entre 0-400 ms (cada 33 ms) Empezando en el momento de la aparición del primer estímulo	Relativa 120% Individual rMT	FEF dro IFG dro PPC dro	Sistemas de neuronavegación basados en IRMe individual	21	Ensayo controlado pseudoaleatorizado Intra-sujeto	Estimulación placebo No-estimulación	Efecto SNARC se reduce en el período inicial (~25-60 ms) cuando se aplica TMS sobre el FEF derecho (tanto para números pequeños como grandes), o el IFG derecho (sólo para números pequeños) También se reduce el efecto SNARC en el período tardío (~200 ms) cuando se estimula el FEF derecho (para números pequeños). Mientras que el PPC derecho no interfirió con el SNARC. Los resultados prueban el papel causal de una red frontoparietal derecha intacta en el procesamiento del espacio numérico mental. El PPC-dro ligado al procesamiento de magnitudes numéricas, y FEF-dro y IFG-dro implicados en la conexión de los códigos visuoespaciales mentales con los códigos de respuesta lateralizados.
Hayashi et al., 2013	cTBS (Burst: 50 Hz Train: 5 Hz)	Duración: 40s	Fija 40% MSO	IPC dro IFG dro	Sistemas de neuronavegación basados en RM grupal	10, 14, 16	Ensayo controlado Intra-sujeto	Estimulación en vertex Control tareas pre-estimulación	La TMS afecta el desempeño de dos tareas diferentes de interacción número-tiempo: la estimulación del IFG derecho perjudica la discriminación temporal (juicios de duración), mientras que la TMS sobre el IPC derecho modula el grado de influencia de la numerosidad en la percepción del tiempo y perjudica la estimación precisa del tiempo, lo que sugiere un modelo de dos etapas en la interacción entre el procesamiento temporal y numérico en el que la región parietal subyace a la interacción a nivel perceptual y la corteza prefrontal subyace a la interacción en las decisiones o juicios de magnitud.
Lecce et al., 2015	cTBS (Burst: 50 Hz Train: 5 Hz)	Duración: 20s 5 minutos antes de empezar las tareas	Fija 40% MSO	IPS dro IPS izq	Sistemas de neuronavegación basados en RM grupal	14	Ensayo controlado aleatorizado Intra-sujeto	Estimulación en vertex Tareas control	La estimulación del IPS izquierdo provocó un aumento de la fracción de Weber (indicativo de un procesamiento numérico empeorado) en los ensayos incongruentes pero no en los congruentes. Lo cual sugiere que el procesamiento de numerosidad se vio afectado mientras que el procesamiento de cantidad continua permaneció sin cambios
Riemer et al., 2016	cTBS (Burst: 30 Hz Train: 6 Hz) ³	Duración: 44 s Después de 10 minutos, se repitió la estimulación	Relativa 100% Individual rMT	PPC dro	Sistemas de neuronavegación basados en RM e individual	22	Ensayo controlado Intra-sujeto	Estimulación placebo	Usando un paradigma unificado que considera los códigos de respuesta espacial y los efectos de congruencia, se observó que la TMS sobre el IPS derecho afectó los efectos de congruencia entre el espacio, el tiempo y los números, pero no afecta las asociaciones de código de respuesta.

Estudio	Protocolo (Frecuencia)	Tiempos de estimulación	Intensidad	Región estimulada	Método de localización	N	Diseño experimental	Controles	Efectos de la estimulación
Maurer et al., 2016	rTMS (5 Hz)	10 pulsos Duración: 1.8 s	Relativa 100 % Individual 1 rMT	52 regiones corticales	Mapeo individual guiado por RM	20	Ensayo controlado aleatorizado Intra-sujeto		Se estimularon 52 sitios corticales mientras el sujeto realizaba cálculos aritméticos. La tasa de error más alta (80 %) para todos los errores de los sujetos se observó en la circunvolución precentral ventral derecha. En cuanto a las tareas de división, se logró una tasa de error del 45 % en la circunvolución frontal media izquierda. La tarea de sustracción mostró su tasa de error más alta (40 %) en la circunvolución angular derecha (AG). Se observó una tasa de error del 35 % en la circunvolución temporal superior anterior izquierda en la tarea de suma. Por último, la tarea de multiplicación indujo una tasa de error máxima del 30 % en el AG izquierdo.
Grotheer et al., 2016	pTMS	0, 100 ms desde la aparición del primer estímulo	Fija 50% MSO	LO izq NFA drp	Sistemas de neuronavegación basados en IRMf individual	13	Ensayo controlado pseudoaleatorizado Intra-sujeto	Estimulación en vertex	La estimulación del NFA derecho perjudicó significativamente la detección de números arábigos en comparación con el control, y también perjudicó la detección de letras romanas. Por el contrario, la estimulación del LO no tuvo efectos en la detección de números ni en la de letras.
Montefinese, 2017	rTMS (10Hz)	4 pulsos Duración: 100 ms desde la aparición del primer estímulo	Fija 65% MSO	VIPS dro VIPS izq HIPS dro HIPS izq	Sistemas de neuronavegación basados en RM grupal	10	Ensayo controlado pseudoaleatorizado Intra-sujeto	Estimulación en vertex	La estimulación sobre VIPS, HIPS, AG y SMG de ambos hemisferios generó aumentos en los tiempos de reacción en operaciones mentales, con una mayor incidencia de la estimulación derecha.
				AG dro AG izq SMG dro SMG izq		10		Estimulación en vertex	La asimetría entre el hemisferio derecho y el izquierdo fue superior para el SMG que para el AG.
Fresnoza, 2020	rTMS (1 Hz)	Duración: 15 min	Relativa 110 % Individual 1 aMT	HIPS izq AG dro	Sistemas de neuronavegación basados en IRMf individual	16	Ensayo controlado pseudoaleatorizado Intra-sujeto	Estimulación en vertex	La estimulación del AG izquierdo produce un peor desempeño en las operaciones de cálculo mental y en las operaciones de recuperación de hechos aritméticos, pero no afecta al rendimiento en las restas. Mientras que la estimulación del HIPS izquierdo no afectó ninguna de las operaciones.

Estudio	Protocolo (Frecuencia)	Tiempos de estimulación	Intensidad	Región estimulada	Método de localización	N	Diseño experimental	Controles	Efectos de la estimulación
Klichowski y Kroliczak, 2020	rTMS (10Hz)	4 pulsos Duración: 100 ms desde la aparición del primer estímulo	Fija 65% MSO	SMG dro SMG izq	Sistemas de neuronavegación basados en RM grupal	20	Ensayo controlado Intra-sujeto	No-estimulación	La estimulación del SMG derecho o izquierdo no afectó a los porcentajes de acierto en las tareas de cálculo en un paradigma que simula los descuentos a la hora de realizar compras; pero sí afecta a los tiempos de respuesta de una forma asimétrica.

NOTA: aMT: umbral motor activo (mínima intensidad del estimulador capaz de inducir la contracción del dedo), rMT: umbral motor en reposo (mínima intensidad del estimulador capaz de inducir la relajación de un dedo contraído), PT: umbral de fosfenos (mínima intensidad del estimulador capaz de inducir la sensación de fosfenos). MSO: Intensidad máxima del aparato estimulador (del inglés, Maximum Stimulator Output), izq: izquierdo, dro: derecho, LO: Lóbulo occipital, NFA: área de formación del número, VIPS: porción ventral del surco intraparietal, HIPS: porción horizontal del surco intraparietal, SMG: circunvolución supramarginal, AG: circunvolución angular, FEF: campos visuales frontales, IFG: circunvolución frontal inferior, PPC: corteza parietal posterior, PSPL: lóbulo parietal posterior superior, IRMe: resonancia magnética estructural, IRMf: resonancia magnética funcional, TR: tiempos de respuesta.

Regiones estimuladas

La mayoría de los estudios incluidos en esta revisión aplicaron la estimulación magnética sobre regiones de la corteza parietal como: el IPS (12 experimentos), la AG (4), la SMG (2) y la corteza parietal posterior (3).

Otros estudios estimularon regiones frontales como la IFG (3 estudios) y el campo ocular frontal (FEF) (1 estudio). Finalmente, hubo otro estudio que aplicó la estimulación sobre regiones relacionadas con el procesamiento visual en el lóbulo occipital.

4.1.2.1. Protocolos de estimulación

Como vimos en el capítulo introductorio los paradigmas de TMS difieren en el número y frecuencia de los pulsos magnéticos aplicados, distinguiéndose la estimulación de pulsos simples (spTMS), de pulsos dobles o emparejados (pTMS), de pulsos triples (tTMS), la estimulación repetitiva (rTMS) y la estimulación de banda theta (cTBS). Todos estos protocolos han sido utilizados en los estudios de cognición numérica.

Los ocho estudios que utilizaron protocolos de pulso simple, doble o triple, lo hicieron para determinar el curso temporal de la intervención prefrontal o parietal en procesos de cognición numérica. Por ejemplo, E. Rusconi et al. (2013) aplicaron pulsos simples en momentos variables durante la ejecución de una tarea que implica la representación espacial de cantidades numéricas, para investigar el punto de tiempo exacto en el que la actividad neuronal de la IFG, el FEF y la corteza parietal posterior (PPC, del inglés *Posterior Parietal Cortex*) son críticas para las asociaciones mentales espacio-numéricas. Evidenciaron que la aplicación de spTMS sobre la IFG derecha en los momentos iniciales (~25–60 ms) y sobre el FEF en el período tardío (~200 ms) afectaba a las asociaciones espacio-numéricas. Mientras que los pulsos simples sobre la PPC derecha interferían sólo en el procesamiento numérico. Estos resultados prueban el papel causal de una red frontoparietal derecha intacta en el procesamiento espacio-numérico, estando la PPC derecha ligada explícitamente al procesamiento de la magnitud numérica, y el FEF y la IFG implicados en la interconexión entre la información numérica y la espacial. Por su parte, Z. Cattaneo et al. (2009) aplicaron pulsos triples a intervalos de 75 ms para estudiar el rol de la AG en la modulación de la atención visuoespacial a lo largo de la línea numérica mental.

Se puede decir que los protocolos que utilizan pulsos simples, dobles o triples explotan la alta resolución temporal de la TMS (varias decenas de ms) y proporcionan mapas cronométricos de implicación funcional de las regiones.

Por otro lado, los estudios que utilizan TMS repetitiva y TBS tienen ventanas de tiempo mucho más amplias en la aplicación de la estimulación, logrando un efecto sumativo que genera una disrupción mayor. Nueve estudios de los incluidos en la revisión sistemática aplicaron rTMS y cuatro estudios usaron TBS. Así, V. Dormal et al. (2012b) utilizaron un protocolo rTMS para estudiar la participación de IPS bilateral en el procesamiento de numérico y de longitudes. Aplicaron pulsos repetidos a 10 Hz sobre el IPS izquierdo y el derecho durante 400 ms, mientras los participantes realizaban una tarea de comparación de números no simbólicos y una tarea de comparación de longitudes. Los autores encontraron que la rTMS sobre el IPS derecho disminuyó la precisión de ambas tareas. Por lo tanto, la integridad del IPS derecho es necesaria tanto para discriminar numerosidades (procesamiento numérico) como para realizar juicios precisos de longitudes (procesamiento espacial).

4.1.2.2. Intensidad

Un aspecto importante en la estimulación magnética es la intensidad del campo magnético aplicado, ya que de ello van a depender los efectos de la estimulación. Se debe aplicar la misma intensidad a todos los participantes, pero la cuestión es: ¿la misma intensidad absoluta o la misma intensidad relativa al umbral de cada participante? En los estudios sobre cognición numérica incluidos en esta revisión, 13 de ellos aplicaron la misma intensidad absoluta a todos los participantes (normalmente el 65% de la capacidad máxima del aparato de estimulación, Tabla 5); mientras que en 8 estudios se aplicó a cada participante una intensidad proporcional a su umbral de respuesta. Los umbrales de respuesta se refieren a la intensidad mínima capaz de generar una respuesta medible. Por ejemplo, el umbral motor es la intensidad del campo magnético aplicado sobre la corteza motora que genera la contracción de un músculo del dedo. De tal forma que con cada participante se determina el umbral motor es decir la intensidad del campo que le genera una respuesta medible en el dedo y luego se aplica sobre la región diana un porcentaje predefinido de esa intensidad. Así, D. Sasanguie et al. (2013) aplicaron sobre la corteza

prefrontal y parietal un campo magnético que tenía una intensidad del 110% del umbral motor determinado para cada participante.

Además, algunos de los estudios utilizaron ambos métodos, y publicaron la correspondencia entre el uso de una intensidad fija absoluta, o el uso de intensidades relativas al umbral individual de cada participante (Tabla 6).

Tabla 6. Correspondencia entre las intensidades relativas y absolutas utilizadas en la estimulación magnética. Fuente: elaboración propia.

Estudio	Región diana	Intensidad relativa	Intensidad absoluta (% MSO)		
			M	Rango	S.D.
Riemer, 2016	PPC derecha	100% rMT	47,3% MSO	32 - 60%	
Rusconi, 2013	PPC derecha	113% rMT	51% MSO	ns	7,6
	FEF derecho		49% MSO	ns	9,3
	IFG derecha		48% MSO	ns	8,1
Maurer, 2016	Hemisferio derecho (26 regiones)	100% rMT	35% MSO	32 -37%	
	Hemisferio izquierdo (26 regiones)		32% MSO	30 – 34%	

NOTA: PPC: corteza parietal posterior, FEF: campo ocular frontal, IFG: circunvolución frontal inferior, rMT: umbral motor en reposo, MSO: intensidad máxima del aparato estimulador, M: media, SD: desviación estándar, ns: información no suministrada.

4.1.2.3. Métodos de localización

Otro aspecto crítico de la estimulación magnética es la precisión en la colocación de la bobina estimuladora sobre la región diana. Los estudios incluidos en esta revisión utilizan cuatro tipos de estrategias para determinar la posición exacta donde se debe colocar la bobina de estimulación. Hay 18 estudios que se basan en imágenes de resonancia magnética (funcional o estructural) de cada participante para acoplarlos a un sistema de neuronavegación que permite monitorear sobre el modelo de cada participante la colocación de la bobina. Otro estudio utilizó el sistema 10/20 EEG para determinar la posición de la bobina de estimulación. Mientras que los dos estudios desarrollados por E. Salillas et al. (2009, 2012) utilizaron un navegador que trabaja en ausencia de imágenes radiológicas.

4.1.2.4. Diseño y control de las investigaciones

Todos los estudios de TMS incluidos en esta revisión tienen un diseño experimental: pseudoaleatorios (12 estudios) o ensayos controlados aleatorios (9 estudios). Los tamaños de muestra variaron de 5 a 22 participantes.

Todos los estudios, excepto uno, utilizaron un diseño intra-sujetos, en el que cada participante recibe varias condiciones de estimulación. Sólo el estudio de J.T. Cheng et al. (2013) utilizó grupos distintos de participantes para cada condición de estimulación (diseño inter-sujetos).

Debido a que la TMS genera efectos sensoriales auditivos y táctiles y podría afectar el rendimiento durante los experimentos es esencial garantizar que los estudios cuenten con un grupo control o con una condición control. Cuando se aplica la TMS a estudios cognitivos, se pueden establecer varias estrategias para garantizar el control de los experimentos (Robertson et al., 2003). Todos los estudios de cognición numérica incluidos en esta revisión utilizan una o varias de las siguientes estrategias (Tabla 5, columna condición control):

- a) Usar una condición control basada en estimulación placebo. Para ello, se coloca la bobina perpendicular a la cabeza de forma que el campo magnético es 0 en la corteza, pero el participante siente el mismo ruido y cosquilleo que en la estimulación normal.
- b) Usar como condición control la estimulación en una región cortical alternativa, que no interfiera con la función analizada. Por ejemplo, el vértex.
- c) Usar una disociación conductual, es decir aplicar varias medidas alternativas y comprobar si los efectos son más o menos específicos.

4.1.2.5. Efectos de la estimulación

Todos los estudios de TMS incluidos en esta revisión reportan efectos disruptores de la TMS sobre las tareas de cognición numérica. Es decir, la estimulación produce un empeoramiento del desempeño en las tareas. En la mayoría de las investigaciones este efecto se mide como un aumento en los tiempos de reacción (descenso en la velocidad de procesamiento) y en otros se reporta como una disminución en los porcentajes de aciertos en las tareas numéricas (Tabla 5, columna Efectos). Además, hay otros estudios que

reportan la disrupción en términos de modificaciones en los efectos de congruencia entre unas magnitudes y otras, o como un cambio en los efectos de asociación del código de respuesta (por ejemplo, Cohen Kadosh, et al., 2010b; Riemer et al., 2016; Rusconi et al., 2011, 2013).

En conclusión, el uso de la TMS en estudios de cognición numérica se ha basado en la “metáfora de la lesión virtual”, la cual fue descrita originariamente en los siguientes términos: “en el contexto de una tarea, la corriente inducida opera como un ruido neuronal; es decir, el pulso agrega actividad aleatoria durante la actividad organizada en la región cortical. Este ruido neural sirve para retrasar o interrumpir el desempeño y, en este sentido, la TMS opera como una lesión. No hay por supuesto daños en la corteza y los pulsos no generan cambios a largo plazo” (Walsh y Rushworth, 1999, p. 127). Es decir, se aplica la estimulación sobre una región de la corteza para interferir transitoriamente la actividad neural normal, y así poder analizar los efectos de esta interrupción en el desempeño en la tarea de cognición numérica. De esta forma, los estudios establecen una relación causal entre la región afectada por la estimulación y la función cognitiva evaluada por las tareas.

4.1.3. Resultados referentes a la estimulación eléctrica

Al contrario de lo que acabamos de ver con la estimulación magnética, donde la estimulación se utilizaba solamente para deteriorar las habilidades numéricas de forma transitoria y establecer relaciones entre las regiones y las funciones cognitivas, los estudios de estimulación eléctrica incluidos en la revisión, aplican la estimulación tanto con fines facilitadores como inhibidores de la cognición numérica. La Tabla 7 resume las principales características de los estudios de estimulación eléctrica incluyendo el diseño experimental, los parámetros de estimulación y los efectos de la neuromodulación. Además, varias de las investigaciones incluidas en la revisión sistemática, analizan no solo los efectos cognitivos de la estimulación eléctrica, sino que estudian también los efectos a nivel neurofisiológico, combinando la estimulación transcraneal con otras técnicas como los electroencefalogramas, la resonancia magnética o la espectroscopía de infrarrojo.

Tabla 7. Síntesis de los estudios de estimulación eléctrica incluidos en la revisión sistemática.

Estudio	Protocolo (Rango de frecuencias) Duración	N	Diseño experimental	Polaridad y sitios de estimulación A (Ánodo) C (Cátodo)	Montaje	Efectos a nivel cognitivo-conductual, neurofuncional, fisiológico y electrofisiológico
Cohen Kadosh et al., 2010b	tDCS 1 mA 20 min	15	Ensayo simple ciego con grupo control. Inter-sujetos	Parietal Grupo 1 (N = 5) A: P3, C: P4 Grupo 2 (N = 5) A: P4, C: P3 Grupo 3 (N = 5) Sham	Electrodos: 3x3 cm	Cognitivo-conductual: La tDCS simultánea al aprendizaje de un sistema numérico artificial produce una mejora de la competencia numérica cuando la estimulación anódica se dirige al lóbulo parietal derecho y la estimulación catódica está sobre el lóbulo parietal izquierdo mientras que la configuración contraria produce un empeoramiento de la precisión.
Clemens et al., 2013	tDCS 2mA 20 min	10	Ensayo aleatorizado simple ciego con control Intra-sujetos	3 condiciones: ● A: CP4 ● No estimulación ● Sham	Electrodos: 5x7 cm Electrodos de referencia en la región supraorbital contralateral	Cognitivo-conductual: el rendimiento en la tarea (multiplicación) no fue modulado por la estimulación. Neurofuncional: la IRMf revela cambios en los correlatos neurales que implican una mayor actividad en el AG bilateral durante los problemas de multiplicación en la condición de estimulación
Kasahara, et al., 2013	tDCS 2mA 10 min	16	Ensayo simple ciego con control Intra-sujetos	Posición de los electrodos seleccionada de acuerdo con las áreas identificadas por IRMf Sesión 1: A: PC izq C: PC dro Sesión 2: A: PC dro C: PC izq Sesión 3: Sham bilateral	Electrodos: 5x7 cm	Cognitivo-conductual: La estimulación con el ánodo sobre la corteza parietal izquierda y el cátodo sobre la corteza parietal derecha genera tiempos de respuesta inferiores en las tareas de cálculo mental solo en los sujetos con dominancia hemisférica parietal izquierda, pero no en los sujetos con activación parietal bilateral. La lateralización parietal de los sujetos fue determinada en un experimento de IRMf.
Hauser et al., 2013	tDCS 1mA 25 min	37	Ensayo aleatorizado con control Intra-sujetos	PPC Exp 1 (N=21) Electrodos activos en cada condición: ● A: P3 ● A: P3, P4 ● C: P3, P4 ● Sham Exp 2 (N=16) Electrodo activo: ● A: P4	Electrodos activos: 5x7 cm Electrodos de referencia: 10x10 cm región supraorbital contralateral	Cognitivo-conductual: La estimulación anódica sobre la corteza parietal izquierda mejora el rendimiento en una tarea de comparación de números de 2 dígitos y en una tarea de restas de 2 cifras. Sin embargo, la estimulación bilateral y la estimulación anódica derecha no generan ninguna mejora comparados con sham.

Estudio	Protocolo (Rango de frecuencias) Duración	N	Diseño experimental	Polaridad y sitios de estimulación A (Ánodo) C (Cátodo)	Montaje	Efectos a nivel cognitivo-conductual, neurofuncional, fisiológico y electrofisiológico
Snowball et al., 2013	tRNS 1mA 100-600 Hz 20 min	25	Ensayo aleatorizado doble ciego con grupo control. Inter-sujetos	DLPFC estimulación Grupo 1 (N=13) F3 y F4 Grupo 2 (N=12) Sham	Electrodos: 5x5 cm	Cognitivo-conductual: la estimulación acompañada de entrenamiento cognitivo mejora las velocidades de cálculo y la recuperación de memoria basada en el aprendizaje aritmético, y este efecto tiene una duración a largo plazo. fisiología: las mejoras conductuales se asocian con respuestas hemodinámicas definidas (medidas mediante NIRS) consistentes con un acoplamiento neurovascular más eficiente en el DLPFC izquierdo también con efectos a largo plazo.
Cappelli et al., 2013	tRNS 1 mA (0-250 Hz) 20 min	40	Ensayo aleatorizado simple ciego con grupo control. Inter-sujetos	Grupo 1 (N=10) Estimulación: P3 y P4 + entrenamiento Grupo 2 (N=10) Sham + entrenamiento Grupo 3 (N=10) Estimulación: C3 y C4 + entrenamiento Grupo 4 (N=10) Estimulación: P3 y P4 Sin entrenamiento	Electrodos: 7x5 cm	Cognitivo-conductual: la combinación de estimulación cerebral y el entrenamiento cognitivo intenso genera mejoras en las tareas de discriminación numérica entrenadas y estas mejoras se mantienen a largo plazo. Además parece haber una transferencia de la mejora en la tarea de discriminación numérica entrenada, a otros dominios como el procesamiento espacial y el temporal.
Klein et al., 2013	tDCS 1mA 20 min	24	Ensayo pseudo-aleatorizado simple ciego con control Intra-sujetos	Dos electrodos activos de la misma polaridad en cada condición: ● A: P3, P4 ● C: P3, P4 ● Sham	Electrodos activos: 5x5 cm Electrodos de referencia: 10 x10 cm en la región supraorbital	Cognitivo-conductual: la estimulación parietal bilateral afecta los tiempos de reacción en una tarea numérica (sumas) pero no en una tarea control (Stroop de color). La estimulación excitatoria (anódica) reduce el efecto de distancia distractora en las sumas mentales, mientras que la estimulación inhibitoria (catódica) la aumenta.
Sarkar et al., 2014	tDCS 1mA 30 min	55	Ensayo aleatorizado doble ciego con control y diseño mixto.	Ambos grupos: alta (N=25) y baja (N=20) ansiedad matemática recibieron dos condiciones de estimulación ● A: F3, C: F4 ● Sham	Electrodos: 5x5 cm	Cognitivo-conductual y fisiológico: el uso de marcadores conductuales y fisiológicos evidencia una doble disociación. La estimulación de la DLPFC produce efectos contrarios en los sujetos dependiendo de sus características individuales, concretamente de su ansiedad matemática. De tal forma que los tiempos de reacción están mejorados y se disminuye la producción salivar de cortisol en los sujetos con alta ansiedad matemática. mientras que en los sujetos con baja ansiedad matemática empeoran los tiempos de reacción y no se evidencia un descenso de los niveles de cortisol salivares. Además, en ambos casos, la estimulación cerebral produce un empeoramiento del funcionamiento ejecutivo (medido mediante la tarea de flancos).
Javadi et al., 2014	tDCS 1,5 mA Trial-by-trial simulation:	25	Ensayo aleatorizado con control y diseño mixto.	Grupo tarea numérica (N=12) Cada participante recibió 3 condiciones de estimulación ● A: P3, C: P4 ● A: P4, C: P3 ● Sham Grupo tarea de duración(N=13)	Electrodos: 3.5x3.5 cm	Cognitivo-conductual: doble disociación entre la lateralidad y las tareas, la estimulación anódica parietal izquierda y catódica derecha produce una mejora en los juicios de numerosidad y un empeoramiento de los juicios de duración (medidas las tasas de acierto). Mientras que la configuración contraria (ánodo a la derecha y cátodo a la izquierda) produce efectos contrarios empeoran los juicios de numerosidad y mejoran los de duración.

Estudio	Protocolo (Rango de frecuencias) Duración	N	Diseño experimental	Polaridad y sitios de estimulación A (Ánodo) C (Cátodo)	Montaje	Efectos a nivel cognitivo-conductual, neurofuncional, fisiológico y electrofisiológico
	1600 ms of stimulation between stimuli			Las mismas 3 condiciones de estimulación		
Pope et al., 2015	tDCS 2mA 20 min	63	Ensayo aleatorizado simple ciego con grupo control. Inter-sujetos	DLPFC izq El electrodo activo en cada grupo: Grupo 1 (N=21) A: F3 Grupo 2 (N=21) C: F3 Grupo 3 (N=21) Sham	Electrodos: 5 x 5 cm Electrodos de referencia en el músculo deltoideos derecho	Cognitivo-conductual: la estimulación anódica sobre la DLPFC produce una mejora significativa en las demandas cognitivas relacionadas con la aritmética, la memoria de trabajo verbal y la atención, en contraste con la estimulación catódica o el grupo control.
Rutsche et al., 2015	tDCS 1,5 mA 30 min	26	Ensayo pseudo-aleatorizado con control Intra-sujetos	PPC izq Dos condiciones • A: centrado entre las posiciones P5 y CP5 Sham	Electrodos activos: 7x5 cm Electrodos de referencia en la región supraorbital contralateral 10 x 10 cm	Cognitivo-conductual: la estimulación anódica mejora los tiempos de respuesta en problemas aritméticos con números grandes y disminuye las tasas de solución en problemas aritméticos con números pequeños. Electrofisiológico: la estimulación produce un aumento de la desincronización alfa en problemas con cifras grandes y una disminución de la sincronización theta en problemas pequeños.
Artemenko, 2015	tDCS 1mA 20 min	25	Ensayo pseudo-aleatorizado simple ciego con control Intra-sujetos	Electrodo activo en cada condición: • A: P3 • A: P4 • C: P3 • C: P4 • Sham •	Electrodos activos: 5x5 cm Electrodos de referencia en la región supraorbital contralateral 10 x 10 cm	Cognitivo-conductual: la estimulación anódica de la región intra parietal derecha aumenta el efecto de llevado en operaciones de suma, mientras que la estimulación catódica o placebo no tuvieron efecto.
Li et al., 2015	tDCS 2 mA 30 min	18	Ensayo pseudo-aleatorizado simple ciego con control Intra-sujetos	Cada participante recibió 3 condiciones de estimulación: • A: P3, C: P4 • A: P4, C: P3 Sham	Electrodos: 5x5 cm	Cognitivo-conductual: la estimulación anódica izquierda y catódica derecha produce un deterioro del rendimiento en tareas de comparación numérica con tiempos de respuesta más lentos.
Estudio	Protocolo	N	Diseño experimental	Polaridad y sitios de estimulación A (Ánodo)	Montaje	Efectos a nivel cognitivo-conductual, neurofuncional, fisiológico y electrofisiológico

	(Rango de frecuencias) Duración			C (Cátodo)		
Houser et al., 2015	tDCS 1 mA or 2 mA 20 min	32	Ensayo aleatorizado simple ciego con grupo control. Inter-sujetos	IPS izq Grupo 1 (N=10) 1mA A: P3, C: T4 Grupo 2 (N=9) 2 mA A: P3, C: T4 Grupo 3 (N=13) • Sham	Electrodos: 3x5 cm	Cognitivo-conductual: la estimulación anódica del IPS izquierdo con 1 mA o con 2 mA mejora el rendimiento en una tarea de cálculo estadístico recientemente aprendida.
Grabner, 2015	tDCS 1,5 mA 30 min	60	Ensayo aleatorizado simple ciego con grupo control. Inter-sujetos	PPC electrodos activos sobre: Grupo 1 (N=20): A: centrado entre las posiciones P5 y CP5 Grupo 2 (N=20): C: centrado entre las posiciones P5 y CP5 Grupo 3 (N=20): Sham	Electrodos activos: 5x7 cm Electrodos de referencia en la región supraorbital contralateral 10 x 10 cm	Cognitivo-conductual: la estimulación catódica sobre la corteza parietal izquierda (comparado con la estimulación placebo) disminuye las tasas de aprendizaje y conduce a desempeños peores incluso cuando la tarea se mide 24 horas después de la estimulación. por el contrario la estimulación anódica genera una mejora específica referida al aprendizaje de restas.
Cappell et al., 2015	tRNS 1 mA (0,1-640 Hz) 20 min	60	Ensayo aleatorizado simple ciego con grupo control. Inter-sujetos	Grupo: jóvenes (N=30) Subgrupo: P3, P4 Subgrupo: C3, C4 Subgrupo: Sham Grupo: ancianos (N=30) Subgrupo: P3, P4 Subgrupo: C3, C4 Subgrupo: Sham	Electrodos: 7x5 cm	Cognitivo-conductual: las tareas de discriminación numérica mejoran con el entrenamiento y esta mejora tiene unos efectos a largo plazo cuando el entrenamiento es simultáneo a la estimulación parietal este efecto es independiente de la edad.
Hauser et al., 2016	tDCS 1 mA 30 min	48	Ensayo pseudo-aleatorizado simple ciego con grupo control. Inter-sujetos	Grupo 1 (N=20) Electrodo activo A: centrado entre las posiciones P5 y CP5 Grupo 2 (N=20) Sham	Electrodos activos: 5x7 cm Electrodos de referencia en la región supraorbital contralateral 5 x 10 cm	La tDCS aplicada simultáneamente mientras se registra la actividad neural mediante IRMf muestra una disociación cognitiva y neural entre los problemas aritméticos nuevos y los problemas aritméticos conocidos: La estimulación hace que los problemas repetidos se resuelven con más precisión y se aprecia una mayor actividad en el circunvolución angular bilateral y en la corteza prefrontal lateral. Mientras que la resolución de problemas novedosos se acompaña con una mayor activación en el IPS bilateral y la corteza prefrontal dorsomedial.
Estudio	Protocolo (Rango de frecuencias)	N	Diseño experimental	Polaridad y sitios de estimulación A (Ánodo) C (Cátodo)	Montaje	Efectos a nivel cognitivo-conductual, neurofuncional, fisiológico y electrofisiológico

	Duración					
Popescu et al., 2016	tRNS 1 mA (100-640 Hz) 20 min	32	Ensayo aleatorizado doble ciego con grupo control. Inter-sujetos	Grupo 1 (N=16) 3 primeros días (F3 y F4) 2 días siguientes (P3 y P4) Grupo 2 (N=16) Sham + entrenamiento	Electrodos: 4x4 cm	Cognitivo-conductual: la estimulación produce tiempos de reacción mejores y tasas de aprendizaje más altas en la fase de entrenamiento, así como tiempos de reacción más rápidos para los problemas entrenados y los problemas nuevos este efecto solo se aprecia en los problemas que tienen 1° de dificultad alto.
Brezis, et al., 2016	tDCS 1 mA 25 min	32	Ensayo pseudo-aleatorizado simple ciego con control y diseño mixto.	Exp 1 (N=20) Cada participante recibió dos condiciones de estimulación: • A: F4 • A: P4 Exp 2 (N=12) Idénticos sitios de estimulación pero otra tarea cognitiva Exp 3 (N=12) Sham	Electrodos activos: 3x3 cm Electrodos de referencia en la región supraorbital contralateral 3x5 cm	Cognitivo-conductual: la estimulación anódica de la corteza parietal derecha mejora la precisión en tareas de estimación del promedio de varias secuencias numéricas, sin afectar al rendimiento en tareas relacionadas con la atención lo cual sugiere que se trata de una mejoría específicamente numérica.
Arshad et al., 2016	tDCS 1,5 mA 15 min	20	Ensayo aleatorizado simple ciego con grupo control. Inter-sujetos	Grupo 1: estimulación vestibular fría (N=10) Cada participante recibió cuatro condiciones de estimulación: • A: F4 • C: F4 • A: F3 • C: F3 Group 2: estimulación vestibular cálida y las mismas condiciones de estimulación (N=10)	Electrodos de referencia en el músculo deltoides ipsilateral	Cognitivo-conductual: en un paradigma en el que hay que calcular la media entre 2 números de 2 cifras la estimulación vestibular fría en combinación con un test de rivalidad binocular produce la inhibición del hemisferio izquierdo y un sesgo numérico hacia los números más pequeños mientras que la estimulación cálida combinada con un test de rivalidad binocular genera un sesgo hacia los números más altos. Es decir los números pequeños se relacionan con la ubicación en el lado izquierdo del espacio mientras que los números grandes se asocian con el lado derecho del espacio bajo condiciones normales hay una competición interhemisférica para identificar el número correcto.
Pasqualotto, 2016	tRNS 1 mA (100-600 Hz) 20 min	54	Ensayo aleatorizado doble ciego con grupo control. Inter-sujetos	Grupo 1: F3, F4 Grupo 2: P3, P4 Grupo 3: Sham	Electrodos: 5x5 cm	Cognitivo-conductual: la estimulación parietal y prefrontal disminuye significativamente los tiempos de reacción inmediatamente, así como mejora los porcentajes de acierto después de 7 días en operaciones aritméticas (restas).
Estudio	Protocolo (Rango de frecuencias) Duración	N	Diseño experimental	Polaridad y sitios de estimulación A (Ánodo) C (Cátodo)	Montaje	Efectos a nivel cognitivo-conductual, neurofuncional, fisiológico y electrofisiológico

Schroeder et al., 2016	tDCS 1mA 25 min	72	Ensayo pseudo-aleatorizado simple ciego con control Intra-sujetos	Cada grupo de participantes recibieron dos condiciones de estimulación Exp 1 (tarea de juicios de paridad) • C: F3 • Sham Exp 2 (tarea de juicios de magnitud) • C: F3 • Sham Exp 3 (tarea de juicios de paridad) • A: F3 Sham	Electrodo activo: 5 × 7 cm Electrodos de referencia: 5 × 7 cm colocados sobre el antebrazo contralateral	Cognitivo-conductual: La estimulación catódica sobre la corteza prefrontal izquierda elimina el efecto SNARC durante juicios de paridad y juicios de magnitud.
Dormal et al., 2016	tRNS 1,5 mA (0,1-640 Hz) 20min	39	Ensayo aleatorizado con control y diseño mixto.	Cada grupo de participantes recibió dos condiciones de estimulación: Grupo 1 Parietal (N=13) • P4 • Sham Grupo 2 Corteza motora suplementaria (N=13): • FCz • Sham Grupo 3 (N=13) • No estimulación	Electrodo activo: 5x7 cm. Electrodos de referencia: 5x7 cm en el codo izquierdo	Cognitivo-conductual: estimulación parietal derecha afecta el rendimiento en tareas de discriminación temporal pero no en tareas de discriminación numérica.
Schroeder et al., 2017a	tDCS 1mA 25 min	48	Ensayo aleatorizado con grupo control. Inter-sujetos	Grupo 1 (N=24) A: F3 Grupo 2 (N=24) C: F3 •	Electrodo activo: 5x7 cm Electrodos de referencia: 5x7 cm en el antebrazo derecho	Cognitivo-conductual: la estimulación anódica afecta de manera diferencial a tareas numéricas y a tareas relacionadas con el orden de los días de la semana de tal manera que la estimulación revierte la asociación SNARC en tareas relacionadas con el orden mientras que enfatiza el efecto SNARC en tareas numéricas.
Di Bernardi Luft et al., 2017	tDCS 1 mA 15 min	60	Ensayo aleatorizado simple ciego con grupo control. Inter-sujetos	DLPPFC Grupo 1 C: F3 Grupo 2 A: F3 Grupo 3 Sham	Electrodos circulares: área 8 cm ² Electrodos de referencia en posición triangular (T7, Cz, Fp2)	Cognitivo-conductual: la estimulación catódica facilita la resolución de problemas que exigen relajar los condicionantes de aprendizajes previos mientras que la estimulación anódica y el placebo no tuvieron efecto.
Estudio	Protocolo (Rango de frecuencias) Duración	N	Diseño experimental	Polaridad y sitios de estimulación A (Ánodo) C (Cátodo)	Montaje	Efectos a nivel cognitivo-conductual, neurofuncional, fisiológico y electrofisiológico

Di Rosa et al., 2017	tDCS 1,5 mA 15 min	39	Ensayo pseudo-aleatorizado simple ciego con control Intra-sujetos	Cada participante recibió 3 condiciones de estimulación en cada experimento: Exp 1 (N=20) PPC izq <ul style="list-style-type: none"> • A: P3 • C: P3 • Sham Exp 2 (N=19) PPC dro <ul style="list-style-type: none"> • A: P4 • C: P4 • Sham 	Electrodo activo: 5x5 cm. Electrodos de referencia: 5x7 cm región supraorbital contralateral	Cognitivo-conductual: la estimulación catódica sobre la corteza parietal posterior derecha disminuye significativamente los efectos de asociación entre la paridad y el número, pero no disminuye los efectos de asociación espacio-numéricos, sugiriendo una disociación entre ambos efectos. La estimulación anódica sin embargo no afectó a ninguno de los dos efectos de asociación.
Schroeder et al., 2017b	tDCS 1mA 25 min	24	Ensayo pseudo-aleatorizado simple ciego con control Intra-sujetos	Cada participante recibió dos condiciones: <ul style="list-style-type: none"> • A: F3 • Sham 	Electrodo activo: 5 x 7 cm Electrodos de referencia: 5 x 7 cm sobre el antebrazo derecho	Cognitivo-conductual: La estimulación anódica modula las asociaciones espacio numéricas cuando se utilizan días de la semana, pero no cuando se utilizan meses del año como estímulos.
To et al., 2018	HD-tDCS 1 mA 20 min	45	Ensayo aleatorizado simple ciego con grupo control. Inter-sujetos	Grupo 1 (N=15) A: FZ Grupo 2 (N=15) C: FZ Group 3 <ul style="list-style-type: none"> • Sham 	Electrodos circulares radio 1cm Electrodos de referencia: Fp1, Fp2, F7, F8	Efectos electrofisiológicos: la estimulación anódica genera un aumento significativo de la frecuencia beta en corteza cingulada, mientras que la estimulación catódica conduce a un aumento significativo de la actividad de banda theta en esa región. Cognitivo-conductual: la estimulación anódica genera cambios en la tarea de Stroop numérico para los ensayos incongruentes mientras que la estimulación catódica genera cambios en la tarea de Stroop numérico emocional solo para los ensayos emocionales.
Bieck et al., 2018	tRNS 1 mA (100-640 Hz) 20 min	48	Ensayo pseudo-aleatorizado simple ciego con control Intra-sujetos	Cada participante recibió 3 condiciones de estimulación <ul style="list-style-type: none"> • F3/ F4 • P3/ P4 • Sham 	Electrodos: 5x5 cm	Cognitivo-conductual: la estimulación bilateral del IPS y la DLPFC no genera efectos moduladores significativos en tareas aritméticas de suma.
Karolis et al., 2019	tRNS 2 mA (0,1-640 Hz) 20 min	54	Ensayo aleatorizado doble ciego con grupo control. Inter-sujetos	Grupo Parietal Superior (N=18) Electrodos en la posición intermedia entre PZ-P3 y PZ-P4 Grupo Intraparietal (N=18): Electrodo en P3 y P4 <ul style="list-style-type: none"> • Grupo Control (N=18): Electrodo en C3 y C4 	Electrodos: 3x3 cm	Cognitivo-conductual: la estimulación de la corteza parietal superior afecta el umbral de decisión, pero no la precisión en tareas numéricas.
Estudio	Protocolo (Rango de frecuencias) Duración	N	Diseño experimental	Polaridad y sitios de estimulación A (Ánodo) C (Cátodo)	Montaje	Efectos a nivel cognitivo-conductual, neurofuncional, fisiológico y electrofisiológico

Hartmann et al., 2019	HD-tDCS 2 mA 25 min	18	Ensayo pseudo-aleatorizado simple ciego con control Intra-sujetos	Cada participante recibió 3 condiciones de estimulación, <ul style="list-style-type: none"> A: P3 Referencia: F2, F5, PO4, PO7 A: P4 Referencia: F1, F6, PO3, PO8 Sham 	Electrodos circulares 1 cm diámetro	Cognitivo-conductual: la estimulación parietal genera mejoras en tareas aritméticas relacionadas con restas. no hay diferencias entre los efectos de la estimulación derecha o la estimulación izquierda.
Mosbacher et al., 2020	tDCS 1 mA 25 min	62	Ensayo aleatorizado doble ciego con grupo control. Inter-sujetos	Grupo 1 (N=21) A: F3 Grupo 2 (N=20) A: P3 Grupo 3 (N=21) <ul style="list-style-type: none"> Sham 	Electrodo activo 3x3 cm Electrodos de referencia de región supraorbital 5 x 7 cm	Cognitivo-conductual: ni la estimulación frontal izquierda ni la estimulación parietal izquierda conducen a una mejora general de la aritmética (sumas y restas). A nivel electrofisiológico: la estimulación cambia los patrones de activación en el hemisferio izquierdo mientras que los cambios en el hemisferio derecho se restringen al grupo placebo.
Peña et al., 2021	tRNS 2mA (100-500 Hz) 20 min	84	Ensayo aleatorizado doble ciego con grupo control Inter-sujetos	Grupo 1 A: F3, C: F4 Grupo 2 C: F3, A: F4 Grupo 3 Sham	Electrodos circulares: área 8 cm ²	Cognitivo-conductual: la estimulación mejoró el rendimiento en tareas de creatividad, pero no afectó a tareas de aritmética no simbólica.
Mosbacher et al., 2021	tDCS 1mA 25 min alpha-tACS theta-tACS Adjusted 1-1,5mA 25 min	¹³⁷	Ensayo aleatorizado doble ciego con grupo control. Inter-sujetos	Grupo 1 (N=20) tDCS, A: F3 Grupo 2 (N=18) tDCS, A: P3 Grupo 3 (N=20) Alpha-tACS, F3 Grupo 4 (N=20) Alpha-tACS, P3 Grupo 5 (N=20) Theta-tACS, F3 Grupo 6 (N=20) Theta-tACS, P3 Grupo 7 (N=20) Sham	Electrodo activo: 3x3 cm Electrodos de referencia: 5x7 cm (en tDCS región supraorbital contralateral, en tACS hombro izquierdo)	Cognitivo-conductual: se compararon diversos métodos de estimulación, comprobando que solo la estimulación frontal theta tACS produce mejoras en el aprendizaje aritmético evidenciado mediante la reducción del número de repeticiones necesarias para aprender hechos aritméticos nuevos.

4.1.3.1. Protocolos de estimulación

La aplicación de la estimulación eléctrica para el estudio de la cognición numérica se ha realizado mediante variados protocolos: con corriente directa (anódica o catódica, tDCS), con corriente alterna a una frecuencia fija (tACS), y con corriente alterna a frecuencias aleatorias (tRNS). De los estudios incluidos en esta revisión: 22 utilizaron tDCS tradicional, 2 utilizaron HD-tDCS multifocal, 9 utilizaron tRNS y un estudio aplicó comparativamente tDCS y tACS.

En estudios de estimulación referentes al campo de la percepción, se considera que la tRNS es más potente, en cuanto a los efectos, que la tDCS (Fertonani et al., 2011). Esta tendencia se ha observado también en los artículos que aplican la estimulación para afectar la cognición numérica incluidos en esta revisión, de forma que en los primeros años la mayoría de las investigaciones utilizan tDCS y en la actualidad se utiliza más la tRNS. Sin embargo, los resultados de nuestro metaanálisis acerca de los efectos de la estimulación eléctrica en las habilidades aritméticas, no nos permiten decir si la tRNS es más o menos eficaz que la tDCS, ya que no se encontraron efectos globales significativos (como describiremos más adelante). Por otro lado, es interesante el estudio de Mosbacher et al. (2021), quienes compararon seis protocolos de estimulación diferentes (Tabla 7), y vieron que sólo la tACS (de banda theta) mejoraba las tasas de aprendizaje aritmético.

4.1.3.2. Polaridad y montaje

Todos los estudios incluidos en esta revisión dirigen la estimulación eléctrica sobre regiones de la corteza parietal o prefrontal con la finalidad de que los efectos neuromodulatorios afecten al desempeño en tareas de cognición numérica. La mayoría de los estudios tienen como región diana el IPS (posiciones P3 y P4) y la DLPFC (posiciones F3 y F4). En todos los casos excepto en uno, la colocación de los electrodos se basa en el sistema de posiciones 10/20 de los electroencefalogramas.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que en el caso de tDCS, como la corriente es directa, los efectos de la estimulación dependerán de la polaridad de los electrodos. Normalmente bajo el ánodo se produce un aumento de la excitabilidad cortical, mientras que bajo el cátodo disminuye. Por el contrario, en la estimulación tRNS y tACS la corriente es alterna y no va a haber diferencias de polaridad entre los dos electrodos, ya que esta cambia de

uno a otro constantemente. Es decir, en los experimentos de tDCS hay que tener en cuenta la colocación de los electrodos y su polaridad, mientras que en los de tRNS y tACS sólo hay que tener en cuenta el montaje de los electrodos. La Tabla 8 muestra una síntesis de los montajes y polaridades utilizados en los experimentos de cognición numérica analizados en la revisión.

La dependencia de la polaridad en la tDCS hace que se utilicen dos tipos de montaje: el denominado unilateral y el bilateral (Sela y Lavidor, 2014). En el llamado montaje bilateral, los electrodos se colocan en dos regiones homólogas una en cada hemisferio, se pretende que en un hemisferio se produzcan efectos excitatorios y en el otro inhibitorios. Este tipo de montajes permite estudiar la lateralidad de las funciones. De los estudios de tDCS incluidos en esta revisión, 5 de ellos utilizaron un montaje bilateral. Por ejemplo, en el experimento de R. Cohen Kadosh et al. (2010b) colocaron el ánodo sobre el IPS derecho y el cátodo sobre el IPS izquierdo, y observaron una mejora en el aprendizaje de un sistema numérico artificial. Sin embargo, este tipo de montajes no permite distinguir si el efecto se debe a la excitación parietal derecha o a la inhibición parietal izquierda, ya que ambos procesos son simultáneos.

Para evitar este inconveniente, se utilizan los montajes unilaterales en los que un electrodo con la polaridad deseada (anódica o catódica) se ubica en la región diana y el otro electrodo se coloca en una región no relacionada con la función cognitiva. El electrodo ubicado en la región diana se llama electrodo activo, mientras que el otro electrodo se considera el electrodo de referencia, cuya función es simplemente permitir la salida de la corriente eléctrica. Por ejemplo, C. Artermenko et al. (2015) usaron un montaje unilateral en el que colocaron el ánodo sobre el IPS derecho y el cátodo en una región no relacionada con la cognición numérica (la región supraorbital), de esta forma analizaron el efecto específico de la estimulación excitatoria (anódica) del lóbulo parietal derecho en el rendimiento en tareas numéricas. Dentro de la misma investigación hicieron otro experimento colocando el ánodo en el lado contrario (IPS izquierdo) y el cátodo sobre una región no relacionada. De esta forma se pueden disociar los efectos facilitadores o inhibidores mediante estimulación anódica o catódica sobre una o varias regiones articulares.

De los experimentos incluidos en la revisión, 15 de ellos utilizaron montaje unilateral. en el que colocaron el electrodo activo (ánodo o cátodo) en la zona diana y un electrodo de

referencia con polaridad opuesta en una región distante que no interfiriera con la función a analizar. En los casos en que la región diana era parietal, los electrodos de referencia se ubicaron sobre la región supraorbital contralateral o sobre el lóbulo temporal. Mientras que, cuando la región diana era prefrontal, la opción preferente para el electrodo de referencia es extracraneal, normalmente sobre un músculo (Tabla 8).

Tabla 8. *Diferentes montajes utilizados en los estudios de estimulación eléctrica y disposición de los electrodos. Fuente: elaboración propia.*

Estimulación	Montaje de los electrodos		Estudios
tRNS	Convencional	Electrodos colocados sobre regiones homólogas de ambos hemisferios por ejemplo corteza parietal derecha e izquierda, P3 y P4.	Bieck et al., 2018; Cappelletti et al., 2015, 2013; Karolis et al., 2019; Pasqualotto, 2016; Popescu et al., 2016; Snowball et al., 2013; Peña et al., 2021
	No convencional	Electrodo activo sobre la región diana y electrodo de referencia en el codo izquierdo.	Dormal et al., 2016
tDCS	Unilateral	Electrodo activo (ánodo o cátodo) sobre la región diana PARIETAL. Electrodo de referencia sobre la región supraorbital contralateral.	Artemenko et al., 2015; Brezis et al., 2016; Clemens et al., 2013; Di Rosa et al., 2017; Grabner et al., 2015; Hauser et al., 2016; Mosbacher et al., 2020; Rutsche et al., 2015; Mosbacher et al., 2021.
		Electrodo activo sobre la región diana PREFRONTAL. Electrodo de referencia en un músculo.	Pope et al., 2015; Schroeder et al., 2017a, 2017b, 2016; Arshad et al., 2016
		Electrodo activo sobre la región diana PARIETAL. Electrodo de referencia sobre el lóbulo temporal.	Houser et al., 2015
		Electrodo activo sobre la región diana PARIETAL. Tres electrodos de referencia en disposición triangular.	Di Bernardi Luft et al., 2017
	Bilateral con polaridad opuesta	Ánodo sobre una región y cátodo sobre la región homóloga contralateral.	Javadi et al., 2014; Kadosh et al., 2010; Kasahara et al., 2013; Li et al., 2015; Sarkar et al., 2014
	Bilateral bicefálico con la misma polaridad	Dos electrodos activos de la misma polaridad sobre dos regiones homólogas. Electrodo de referencia sobre la región supraorbital.	Hauser et al., 2013; Klein et al., 2013
HD-tDCS	Unilateral	Configuración 4x1: un electrodo activo rodeado por cuatro electrodos de retorno.	Hartmann et al., 2019; To et al., 2018
tACS	Unilateral	Electrodo de retorno en el hombro	Mosbacher et al., 2021

Por su parte, hay dos estudios que utilizan un montaje particular con dos electrodos activos y dos electrodos de referencia. Se trata de un montaje bilateral bicefálico en el que los dos electrodos activos tienen la misma polaridad (dos cátodos o dos ánodos) y se colocan en regiones homólogas de los dos hemisferios, mientras que los dos electrodos de retorno se colocan en regiones distantes no relacionadas con la cognición numérica (Hauser et al., 2013; Klein et al., 2013).

Por otro lado, los experimentos de C. Di Bernardi et al. (2017), M. Hartmann, et al. (2019) y W.T. To et al. (2018) utilizan varios electrodos de retorno en lugar de uno, para focalizar más el efecto del electrodo activo.

Finalmente, en los experimentos que usan tRNS o tACS, al no depender de la polaridad, se suelen colocar ambos electrodos sobre regiones homólogas de los dos hemisferios (montaje convencional).

4.1.3.3. Diseño y control de las investigaciones

Todos los estudios de estimulación eléctrica incluidos en la revisión son ensayos controlados. Dieciocho de ellos utilizaron un diseño inter-sujetos (con tamaños de muestra que oscilaban entre 5 y 24 participantes por grupo, con tamaños totales de muestra entre 15 y 137); doce estudios utilizaron un diseño intra-sujeto (con tamaños de muestra que oscilaron entre 10 y 48 participantes) y cuatro estudios utilizaron un diseño mixto con la condición de estimulación como un factor intra-sujeto. La mayoría de los estudios fueron simple o doble ciego.

Los estudios de neuromodulación de regiones relacionadas con la cognición numérica que hemos analizado usan 4 estrategias para controlar los experimentos. En primer lugar, la mayoría de los estudios utilizan la estimulación placebo (*sham*), que consiste en aplicar la corriente durante pocos segundos al inicio y al final de la sesión, generando las mismas sensaciones cutáneas que la estimulación real, pero sin alterar la excitabilidad; por lo tanto, sirviendo como un placebo confiable (Gandiga et al., 2006).

Además, los estudios controlan los efectos de la polaridad, y el montaje, así como los parámetros de la estimulación (intensidad y duración). En general, los estudios unilaterales controlan los efectos de la polaridad comparando dentro del mismo estudio en experimentos o grupos diferentes las dos polaridades posibles: estimulación anódica y

estimulación catódica, sobre la región diana. Sin embargo, algunos estudios solo analizan los efectos de una polaridad (por ejemplo: Schroeder et al., 2016). Por su parte, en los estudios bilaterales se comparan los efectos de las dos configuraciones opuestas: ánodo a la derecha y cátodo a la izquierda, y viceversa.

En cuanto a la incidencia de los parámetros de estimulación, sólo hay un estudio en esta revisión que compare los efectos de la estimulación en función de la intensidad, usando dos protocolos diferentes: uno con corriente de 1 mA y otro con 2mA. (Houser et al., 2015).

Algunos estudios utilizan como control, la estimulación en una región cerebral diferente a la región diana, ya que consideran que la evidencia proporcionada al comparar la estimulación real con la estimulación *sham* (placebo) no es suficiente para probar la implicación específica de la región en la función cognitiva. Así, M. Cappelletti et al. (2015, 2013); y V.R. Karolis et al. (2019); utilizan la estimulación aplicada a la corteza motora como control para compararlo con estimulación parietal (región diana).

Otro control importante para probar la especificidad de la implicación de una región en una función cognitiva particular es el uso de tareas control, es decir, la aplicación de diversos instrumentos referidos a dominios cognitivos distintos. Por ejemplo, ensayar los efectos de la estimulación en una tarea numérica y en una tarea de lenguaje. En esta línea de medir los efectos de la estimulación en habilidades cognitivas diferentes, A.H. Javadi et al. (2014) evidenciaron una doble disociación entre el procesamiento temporal y el numérico. Para ello, utilizaron un diseño mixto con condiciones de estimulación como factor intra-sujeto y el tipo de tarea (numérica o temporal) como factor inter-sujeto: un grupo realizó una tarea de numerosidad y el otro una tarea de duración. Los resultados mostraron que la tDCS con polaridad ánodo izquierdo/cátodo derecho produce mayores precisiones en las tareas de juicio de numerosidad y disminuye la precisión en las tareas de juicio de duración. Por el contrario, la configuración opuesta (ánodo derecho/cátodo izquierdo) produce una mayor precisión en las tareas de juicio de duración y una disminución en las tareas de numerosidad.

4.1.3.4. Efectos de la estimulación

Respecto a los efectos de la estimulación eléctrica, los estudios incluidos en esta revisión tienen en común dos aspectos: (1) todos ellos analizan los efectos moduladores de la estimulación eléctrica en la cognición numérica a través de marcadores conductuales en tareas numéricas, de magnitudes y de cálculo; y (2) todos los estudios, excepto uno, aplican la estimulación a la corteza parietal y prefrontal. Sin embargo, estos estudios muestran resultados muy variados, que oscilan desde efectos facilitadores (mejoradores de la cognición numérica) a efectos disruptores (empeoramiento del desempeño), así como estudios que reportan efectos no significativos de la estimulación parietal/prefrontal sobre la cognición numérica.

Dentro de los experimentos de tDCS unilateral se observan resultados tan heterogéneos que llegan a ser contradictorios. Por ejemplo, los estudios que aplican estimulación anódica (protocolo supuestamente facilitador) reportan efectos nulos o efectos de mejora relativa (por ejemplo: Clemens et al., 2013; Hauser et al., 2013, 2016; Pope et al., 2015). Mientras que los experimentos que aplican estimulación catódica (supuestamente inhibidora) arrojan efectos de mejora cognitiva (por ejemplo: Schroeder et al., 2016a), y también efectos de empeoramiento (por ejemplo: Klein et al., 2013), así como efectos nulos (Hauser et al., 2013).

Por su parte, los estudios de tRNS y tACS muestran efectos de mejora de la cognición numérica o efectos nulos (por ejemplo: Dormal et al., 2016; Mosbacher et al., 2021; Snowball et al., 2013).

Por otro lado, las investigaciones incluidas en esta revisión muestran que los efectos neuromoduladores de la estimulación parietal y prefrontal sobre las tareas numéricas y el cálculo dependen de varios factores, como la combinación con el entrenamiento, el estado de actividad previa o determinadas características individuales.

La combinación de la estimulación con el entrenamiento, en paradigmas de aprendizaje conduce a mejoras significativas en la cognición numérica (Cappelletti et al., 2015; Cheng et al., 2013; Grabner et al., 2015; Popescu et al., 2016; Snowball et al., 2013). Así, por ejemplo, M. Cappelletti et al. (2013) demostraron que la tRNS sobre la corteza parietal combinada con el entrenamiento, produce una mejora del rendimiento en tareas de discriminación numérica considerablemente superior a la conseguida solo con entrenamiento o solo con estimulación.

Por otro lado los efectos de la estimulación eléctrica dependen de características individuales como la edad (Cappelletti et al., 2015), la ansiedad por las matemáticas (Sarkar et al., 2014a) o la lateralización hemisférica evidenciada por IRMf (Kasahara et al., 2013).

En síntesis, los estudios de estimulación eléctrica incluidos en esta revisión muestran cinco hallazgos principales: (1) la estimulación eléctrica puede generar mejoras en la cognición numérica bajo ciertas condiciones; (2) los efectos de la estimulación dependen de la polaridad; (3) se confirma el principio de dependencia de la actividad ya que los resultados varían según los procesos neurocognitivos en curso; (4) el acoplamiento de la estimulación con el entrenamiento conduce a efectos duraderos; y (5) los efectos de la estimulación pueden variar según las características individuales.

4.1.3.5. Resultados del metaanálisis: efectos de la estimulación eléctrica sobre la habilidad de cálculo

Dentro los estudios de estimulación eléctrica incluidos en la revisión sistemática se seleccionaron aquellos referidos específicamente a la capacidad aritmética (cálculo), y que cumplieran los criterios de inclusión para el metaanálisis señalados en el epígrafe 3.1.3. Resultaron 12 publicaciones, que incluyen 35 efectos. Los experimentos seleccionados comprendían 508 participantes. Se analizó el efecto que tenía la estimulación (comparado con *sham*) en el desempeño en tareas aritméticas, para cada uno de los experimentos. Las características de estos experimentos se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Experimentos incluidos en el metaanálisis y valor estadístico de la comparación del efecto de la estimulación vs sham.

# Efecto	Protocolo	Diseño	Artículo	N	n1	n2	t
1	tRNS	Intra-sujetos	Bieck, 2018	48	-	-	3.924283
2			Bieck, 2018	48	-	-	($p>0,549$)
3		Entre-sujetos	Snowball, 2013	25	13	12	3,200000
4			Snowball, 2013	25	13	12	2,598076
5			Popescu, 2016	32	16	16	($p>0,63$)
6			Popescu, 2016	32	16	16	($p>0,42$)
7			Popescu, 2016	32	16	16	($p>0,11$)
8			Popescu, 2016	32	16	16	($p>0,11$)
9	tDCS Bilateral	Intra-sujetos	Kasahara, 2013	9	-	-	2,569047
10			Kasahara, 2013	7	-	-	($p>0,13$)
11			Sarkar, 2014	25	-	-	13,603676
12			Sarkar, 2014	20	-	-	8,721238
13			Sarkar, 2014	25	-	-	($p>0,05$)
14			Sarkar, 2014	20	-	-	($p>0,05$)
15	tDCS anódica	Intra-sujetos	Clemens, 2013	10	-	-	($p>0,1$)
16			Hauser, 2013	21	-	-	2,38
17			Hauser, 2013	21	-	-	0,77
18			Hauser, 2013	16	-	-	1,13
19			Hauser, 2013	16	-	-	0,07
20			Rutsche, 2015	23	-	-	0,56
21			Rutsche, 2015	23	-	-	2,44
22			Rutsche, 2015	23	-	-	2,14
23			Rutsche, 2015	23	-	-	0.50
24			Entre-sujetos	Pope, 2015	42	21	21
25		Pope, 2015		42	21	21	2,2315914
26		Pope, 2015		42	21	21	0,9219544
27		Pope, 2015		42	21	21	3,4452866
28		Hauser, 2016		48	24	24	1,2973049
29		Mosbacher, 2020		62	41	21	2,5601074
30		Mosbacher, 2020		62	41	21	($p>0,05$)
31		Mosbacher, 2021		57	38	19	-1,8720000
32		Mosbacher, 2021		57	38	19	-2,3940000
33	tDCS catódica	Intra-sujetos		Hauser, 2013	21	-	-
34		Entre-sujetos	Pope, 2015	42	21	21	0
35			Pope, 2015	42	21	21	0

NOTA: Los diversos efectos incluidos en cada estudio se refieren a diferentes experimentos, subgrupos y tipos de variable de salida. N: tamaño de la muestra, n1: tamaño del grupo experimental, n2: tamaño del grupo control, t: tamaño del efecto.

Se analizaron separadamente los experimentos según el protocolo de estimulación utilizada y el tipo de diseño experimental: tRNS inter-sujetos, tRNS intra-sujetos, tDCS bilateral intra-sujetos, tDCS anódica inter-sujetos, tDCS anódica intra-sujetos, tDCS catódica inter-sujetos, tDCS catódica intra-sujetos. A continuación se presentan los resultados de cada uno de los metaanálisis.

Análisis de los estudios tRNS

El análisis de los estudios que utilizan tRNS con un diseño intra-sujetos incluyó un estudio y dos efectos, la heterogeneidad fue de $I^2 = 0,00 \%$, y el efecto global (g de Hedges = 0,276) no fue significativo ($p = 0,065$).

Por su parte, el análisis de los estudios tRNS con diseño inter-sujetos incluyó dos estudios y seis efectos, con una alta heterogeneidad $I^2 = 71,06 \%$, un efecto global moderado ($g = 0,528$), pero no significativo ($p = 0,367$).

Análisis de los estudios tDCS bilateral

Todos los experimentos que utilizaron tDCS bilateral tenían un diseño intra-sujetos, comprendiendo 2 estudios y 6 efectos. El análisis mostró que los experimentos presentaban una heterogeneidad baja ($I^2 = 24,44 \%$), con un efecto global grande ($g = 0,860$), y altamente significativo ($p < 0,001$). La Figura 43 muestra la contribución de cada uno de los experimentos (tamaño del círculo correspondiente a cada estudio) al resultado global y su intervalo de confianza (extremos del segmento o barra). Así como el efecto global, representado en la parte baja: el centro indica la estimación puntual y la amplitud indica los márgenes de su intervalo de confianza. Como se puede observar, el efecto global es un efecto positivo (a la derecha del 0) lo cual se interpreta como una mejora de la variable de salida (desempeño en las tareas de cálculo) en la condición de estimulación respecto a la condición control (*sham*), para el conjunto de los experimentos incluidos en este metaanálisis.

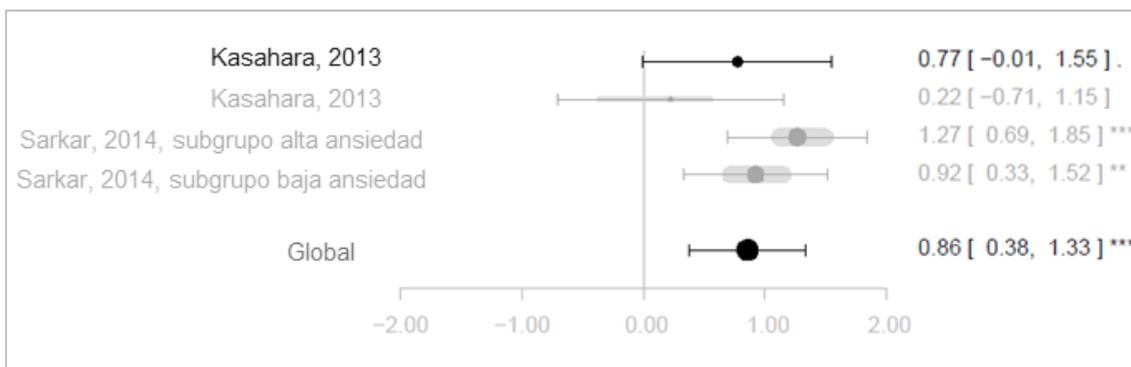


Figura 43. Diagrama de efectos (forest plot) correspondiente a los experimentos de tDCS bilateral. En la parte superior se representan los estimados y los intervalos de confianza de cada experimento, y en la parte inferior los del resultado global.

** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. Las posiciones decimales se indican con el signo punto.

Análisis de los estudios tDCS anódica

El análisis de los estudios que utilizan tDCS anódica con un diseño intra-sujetos incluyó tres estudios y nueve efectos, con una heterogeneidad $I^2 = 0,00 \%$, un efecto global bajo ($g = 0,242$), y no significativo ($p = 0,057$). En la Figura 44 se observa que los intervalos de varios de los experimentos, así como del efecto global cruzan el valor nulo (0,00) de la variable de resultados, el cual se corresponde con la ausencia de un efecto significativo de la intervención.

Por su parte, el análisis de los estudios de tDCS con diseño inter-sujetos incluyó cuatro estudios, y nueve efectos, con una heterogeneidad alta ($I^2 = 67,81 \%$), un efecto reducido ($g = 0,150$) y no significativo ($p = 0,552$).

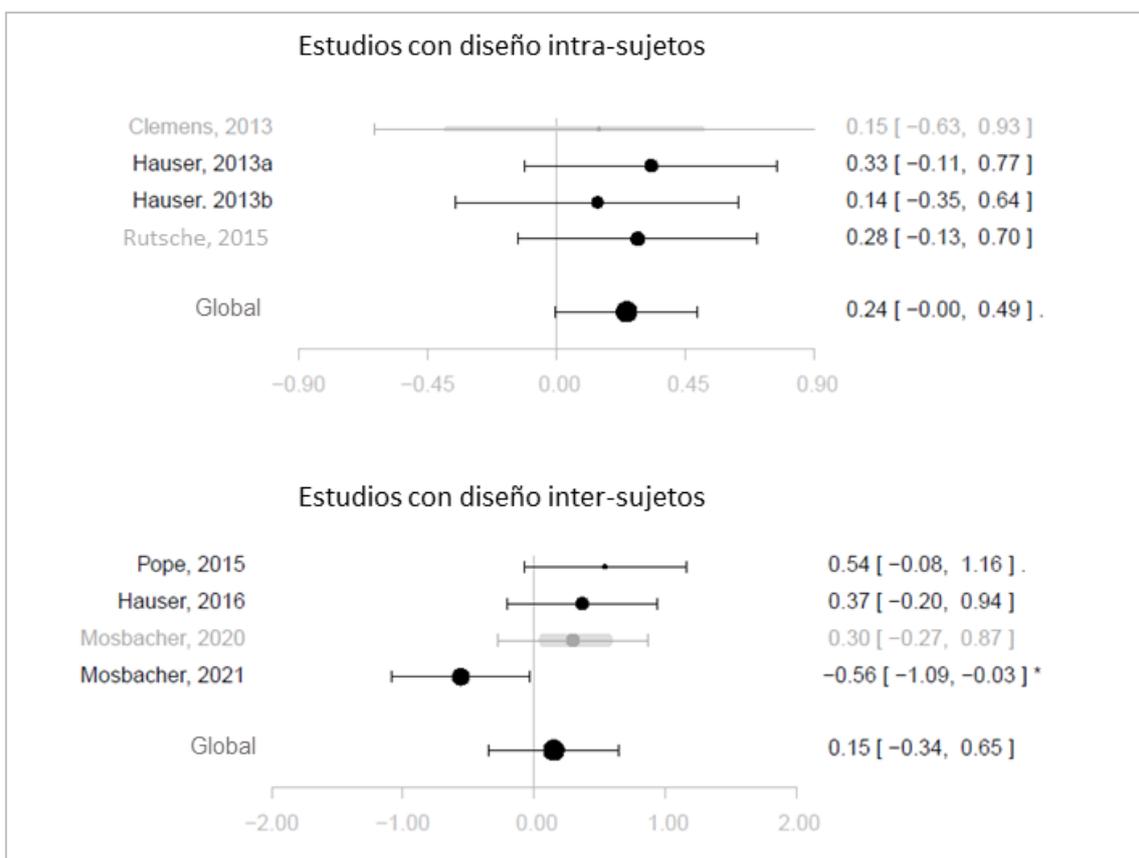


Figura 44. Diagramas de efectos (forest plot) de los estudios de tDCS anódica. En la parte superior los experimentos con diseño intra-sujetos, y en la parte inferior los inter-sujetos. * $p < 0.05$. Las posiciones decimales se indican con el signo punto.

Análisis de los estudios tDCS catódica

Respecto a los estudios que utilizan tDCS catódica, se encontró un único estudio intra-sujetos con un único efecto, y un estudio inter-sujetos con dos efectos ($I^2 = 0,00\%$) cuyo análisis arrojó un efecto global muy bajo ($g = 0,145$) y no significativo ($p = 1,000$).

En conclusión, los resultados del metaanálisis muestran que:

En primer lugar, la evidencia acumulada acerca de los efectos de la tRNS sobre la capacidad de cálculo en sujetos sanos no es concluyente, debido al reducido número de experimentos y a la alta heterogeneidad. El efecto de este tipo de estimulación sobre la capacidad de cálculo no es significativo.

En segundo lugar, la evidencia actual acerca del uso de la tDCS bilateral indica que hay un efecto positivo y altamente significativo de este tipo de estimulación eléctrica sobre la

capacidad de cálculo en sujetos sanos. Este resultado está avalado, además, por la baja heterogeneidad de los experimentos¹¹.

Por su parte, la evidencia acerca de los efectos de la tDCS anódica sobre la capacidad de cálculo difiere según el diseño experimental. Así, los experimentos intra-sujetos muestran un efecto pequeño y no significativo de la estimulación, avalado por una baja heterogeneidad, lo cual hace que este resultado (efecto no significativo) se pueda considerar relativamente concluyente. Mientras que resultados de los experimentos inter-sujetos no son tan concluyentes, pues muestran una alta heterogeneidad, aunque también muestran un efecto pequeño y no significativo de la estimulación tDCS anódica sobre la capacidad de cálculo.

Finalmente, el metaanálisis de los estudios de tDCS catódica muestra un efecto no significativo de la estimulación sobre la capacidad de cálculo, sin embargo este resultado no es concluyente debido al reducido número de estudios.

¹¹ Sin embargo, este resultado hay que ponerlo en relación con el hecho, señalado en los epígrafes anteriores y reportado por Sarkar et al. (2014), de que la estimulación eléctrica bilateral puede generar mejoras en la cognición numérica y al mismo tiempo generar un empeoramiento de las funciones ejecutivas.

4.2. Estudio 2: Estudio cognitivo-conductual transversal acerca de la capacidad para procesar e integrar información cuantitativa numérica y la espacial

Se analizó la distribución de la muestra mediante la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, la cual es adecuada para tamaños de muestra superiores a 50. Y se realizó la prueba de esfericidad de Mauchly de la matriz de covarianzas de error de las variables dependientes. Los resultados de ambas pruebas ([Apéndice 10](#)) permiten asumir una distribución normal de las variables en los tres grupos de edad, así como el cumplimiento del criterio de esfericidad; por lo tanto, se realizó un análisis estadístico mediante pruebas paramétricas.

4.2.1. Rendimiento en las tareas de comparación dentro y entre los grupos de edad

El análisis factorial 3 x 6 correspondiente a los tres grupos de edad (7 años, 12 años, 19 años) y a las seis tareas de comparación (numérica no-simbólica, numérica mixta, área regular continua, área regular mixta, área irregular continua, área irregular mixta) utilizando como variable dependiente el porcentaje de aciertos, y controlando las variables sexo y lateralidad, mostró un efecto significativo del grupo de edad ($F_{(2,111)} = 51,369$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,481$, potencia = 1,000), un efecto significativo del tipo de tarea ($F_{(5,107)} = 5,100$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,044$, potencia = 0,986), y un efecto significativo de la interacción entre los grupos de edad y las tareas ($F_{(10,216)} = 3,065$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,052$, potencia = 0,984). Lo cual significa que hay diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de edad, en cuanto a las tasas de acierto. También hay diferencias significativas entre las diversas tareas dentro de cada grupo de edad. Y finalmente, las diferencias entre los grupos de edad son específicas del tipo de tarea (la interacción GrupoEdad*Tarea fue significativa).

El análisis por parejas con ajustes de Bonferroni para los tres grupos de edad muestra que en el conjunto de tareas el grupo de adultos (grupo 3, 19 años) tiene tasas de acierto significativamente superiores a los dos grupos de niños (grupo 1, 7 años, y grupo 2, 12 años). Mientras que en los dos grupos de niños no hay diferencias significativas entre sí (Tabla 10 y Figura 45).

Tabla 10. Comparaciones por parejas de las tasas de aciertos (%) de los tres grupos de edad en el conjunto de tareas de comparación.

(I) GrupoEdad	(J) GrupoEdad	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig. ^b	95% de intervalo de confianza para diferencia	
					Límite inferior	Límite superior
Grupo 1	Grupo 2	-1,131	1,491	1,000	-4,756	2,493
	Grupo 3	-13,562*	1,488	< 0,001	-17,178	-9,945
Grupo 2	Grupo 1	1,131	1,491	1,000	-2,493	4,756
	Grupo 3	-12,430*	1,484	< 0,001	-16,038	-8,822
Grupo 3	Grupo 1	13,562*	1,488	< 0,001	9,945	17,178
	Grupo 2	12,430*	1,484	< 0,001	8,822	16,038

NOTA: Se basa en medias marginales estimadas

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0,05.

b. Ajuste para varias comparaciones: Bonferroni.

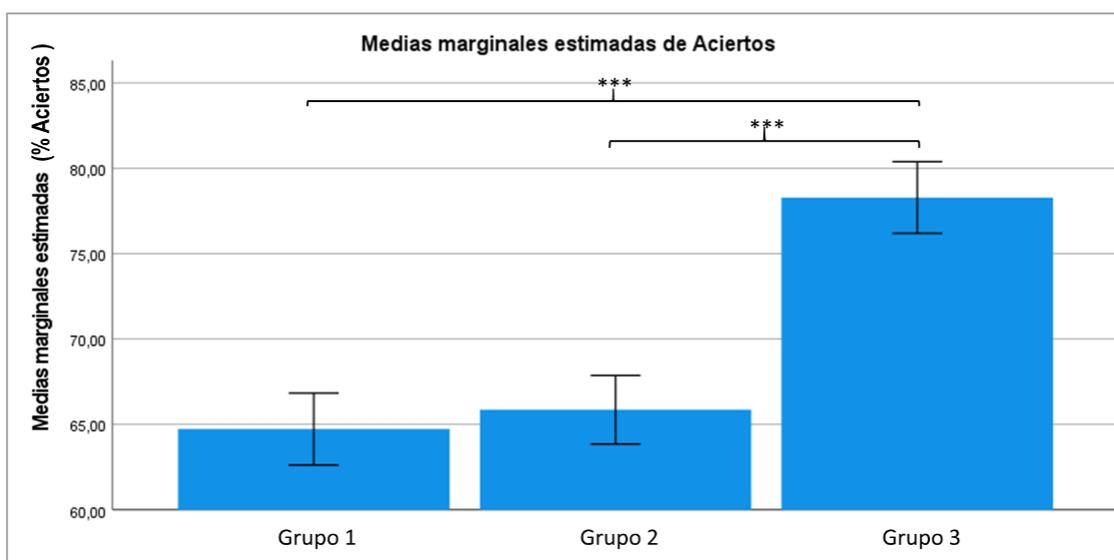


Figura 45. Porcentajes de aciertos en cada grupo de edad, para el conjunto de tareas.
NOTA: barras de error con intervalo de confianza 95%. *** $p < 0,001$.

Por su parte, la Tabla 11 muestra la comparación por parejas con ajustes de Bonferroni, para los 7 tipos de tareas en el conjunto de la muestra. Siendo las tareas más fáciles (tasa de aciertos $> 75\%$) la comparación numérica no simbólica, y las comparaciones con áreas regulares, sean continuas o discretas. Mientras que las tareas más difíciles (tasa de aciertos $< 65\%$) son la comparación numérica mixta, y las comparaciones entre áreas irregulares,

sean continuas o discretas (Figura 46, conjunto de la muestra). Este efecto se cumple también dentro de cada grupo de edad (Figura 47).

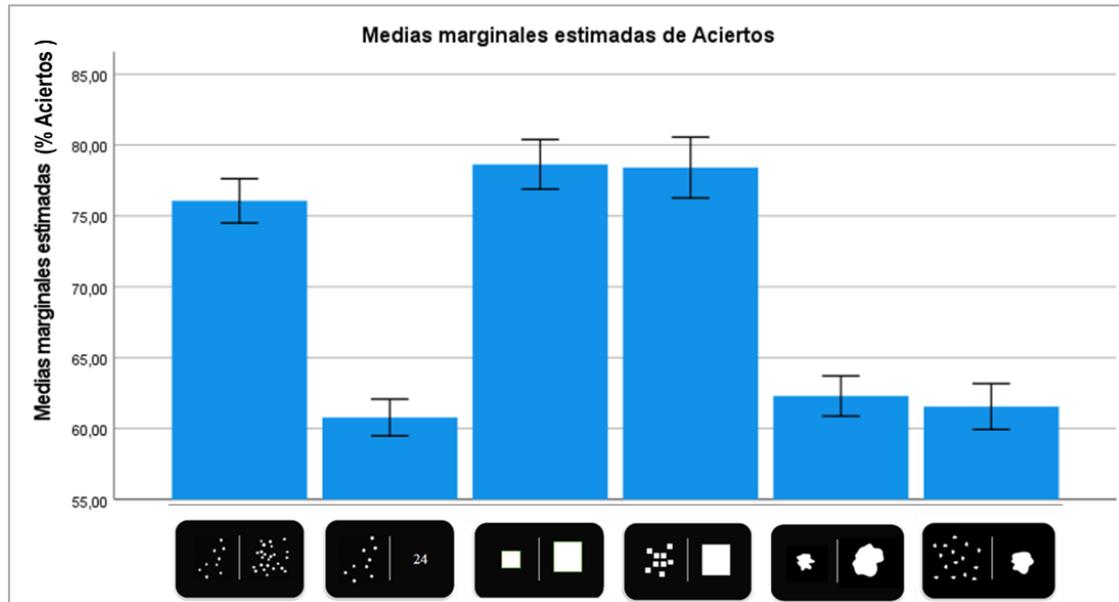


Figura 46. Porcentajes de acierto en cada una de las tareas de comparación, para el conjunto de la muestra, (NOTA: barras de error con intervalo de confianza 95%).

Tabla 11. Comparaciones por parejas de las tasas de aciertos (%) en cada una de las tareas de comparación, para el conjunto de la muestra.

(I) Tarea	(J) Tarea	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig. ^b	95% de intervalo de confianza para diferencia ^b	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	15,286*	0,774	< 0,001	12,965	17,607
	3	-2,572*	0,761	0,015	-4,855	-0,290
	4	-2,348	1,059	0,431	-5,526	0,830
	5	13,771*	0,902	< 0,001	11,064	16,477
	6	14,516*	0,899	< 0,001	11,818	17,213
2	1	-15,286*	0,774	< 0,001	-17,607	-12,965
	3	-17,859*	0,901	< 0,001	-20,560	-15,157
	4	-17,634*	1,040	< 0,001	-20,754	-14,514
	5	-1,515	0,744	0,659	-3,746	0,716
	6	-0,771	0,743	1,000	-2,999	1,458
3	1	2,572*	0,761	0,015	0,290	4,855
	2	17,859*	0,901	< 0,001	15,157	20,560
	4	0,225	1,061	1,000	-2,959	3,408
	5	16,343*	0,859	< 0,001	13,768	18,919
	6	17,088*	0,997	< 0,001	14,097	20,079
4	1	2,348	1,059	0,431	-0,830	5,526
	2	17,634*	1,040	< 0,001	14,514	20,754
	3	-0,225	1,061	1,000	-3,408	2,959
	5	16,119*	1,007	< 0,001	13,097	19,140
	6	16,864*	1,000	< 0,001	13,865	19,862
5	1	-13,771*	0,902	< 0,001	-16,477	-11,064
	2	1,515	0,744	0,659	-0,716	3,746
	3	-16,343*	0,859	< 0,001	-18,919	-13,768
	4	-16,119*	1,007	< 0,001	-19,140	-13,097
	6	0,745	0,744	1,000	-1,489	2,978
6	1	-14,516*	0,899	< 0,001	-17,213	-11,818
	2	0,771	0,743	1,000	-1,458	2,999
	3	-17,088*	0,997	< 0,001	-20,079	-14,097
	4	-16,864*	1,000	< 0,001	-19,862	-13,865
	5	-0,745	0,744	1,000	-2,978	1,489

NOTA: Se basa en medias marginales estimadas. Tareas: 1: numérica no simbólica, 2: numérica mixta, 3: áreas continuas regulares, 4: áreas regulares mixtas, 5: áreas continuas irregulares, 6: áreas irregulares mixtas.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0,05.

b. Ajuste para varias comparaciones: Bonferroni.

Como se puede observar en la tabla anterior, no hay diferencias en las tasas de acierto entre la tarea de comparación numérica mixta y la comparación mixta de áreas irregulares ($p = 1,000$), así como tampoco hay diferencias entre las dos tareas de comparación de áreas regulares sean continuas o discretas ($p = 1,000$).

Finalmente, la interacción entre el tipo de tarea y el grupo de edad se muestra en la Figura 47, donde aparecen marcadas las diferencias significativas entre las diversas tareas entre los grupos de edad (correspondientes a la comparación con ajustes de Bonferroni, ver [Apéndice 11](#)), y en la Figura 48, que muestra las tareas más fáciles y difíciles dentro de cada grupo de edad.

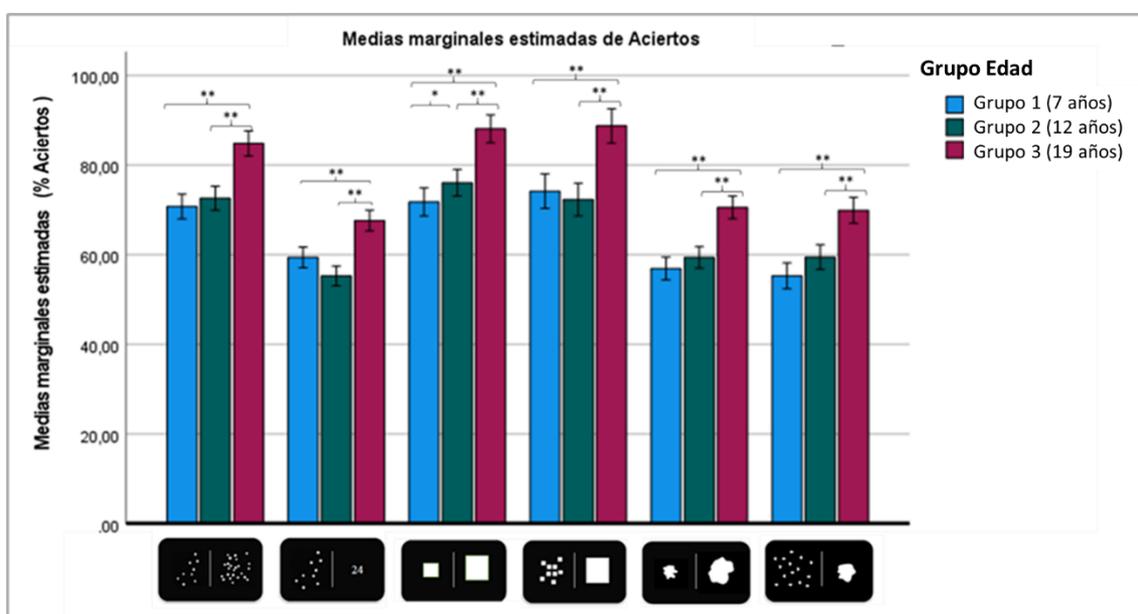


Figura 47. Porcentajes de acierto de cada tarea en cada grupo de edad. NOTA: barras de error con intervalo de confianza 95%. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$.

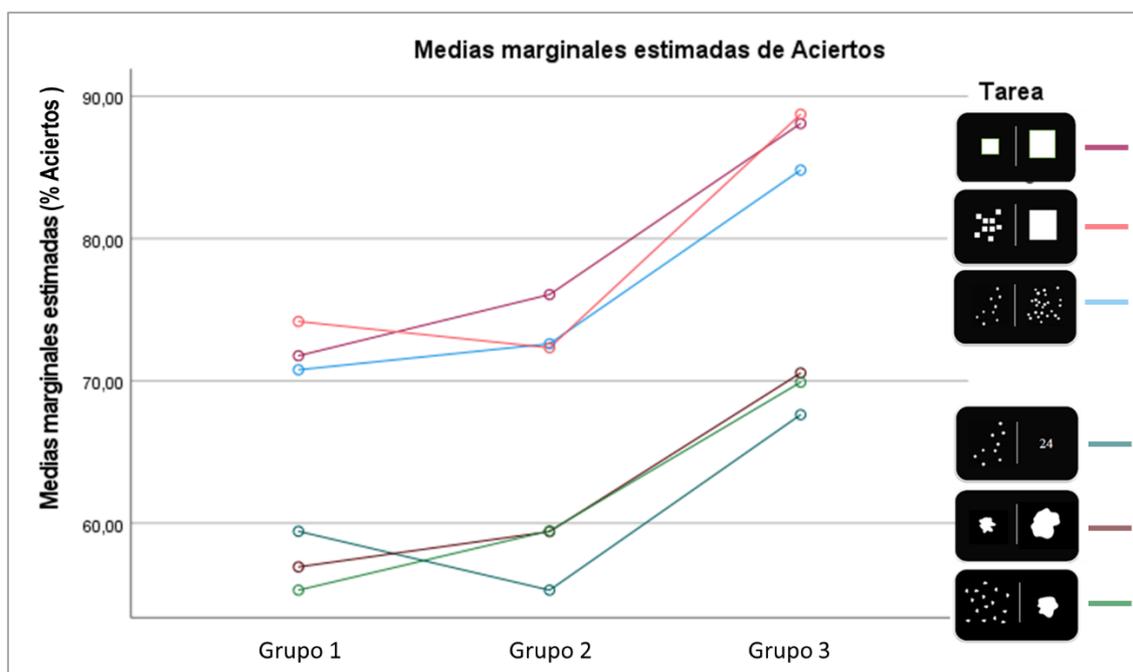


Figura 48. Porcentajes de aciertos de cada tipo de tarea en cada grupo de edad. *NOTA: para mayor claridad en el gráfico se han omitido las barras de error, el dato se encuentra en el Apéndice 11.*

4.2.2. Rendimiento en las tareas de comparación según la magnitud (numérica, espacial regular o espacial irregular) dentro y entre los grupos de edad

El modelo factorial 3 x 3 correspondiente a los 3 grupos de edad (7, 12 y 19 años) y a las tareas agrupadas según la magnitud (tareas numéricas, tareas espaciales con áreas regulares y tareas espaciales con áreas irregulares) controlando las variables de sexo y lateralidad, dio como resultado un efecto principal significativo del grupo de edad ($F_{(2,111)} = 51,369$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,481$, potencia = 1,000), así como de la magnitud (numérica, espacial regular, o espacial irregular) [$F_{(2,110)} = 5,190$, $p = 0,006$, $\eta^2 = 0,045$, potencia = 0,825] y de la interacción GrupoEdad*Magnitud ($F_{(4,222)} = 2,987$, $p = 0,020$, $\eta^2 = 0,051$, potencia = 0,791). Lo cual significa que: 1º hay diferencias entre los grupos de edad para el conjunto de magnitudes; 2º hay diferencias entre las magnitudes para el conjunto total de la muestra; y 3º hay una interacción significativa entre los grupos de edad y las magnitudes.

El análisis por parejas con ajustes de Bonferroni para los tres tipos de magnitudes muestra que las comparaciones numéricas, las espaciales con figuras regulares y las espaciales con figuras irregulares difieren estadísticamente entre sí en cuanto al porcentaje de

aciertos en el conjunto de la muestra (Tabla 12 y Figura 49). Siendo la magnitud más fácil la comparación de áreas regulares, seguido de la comparación numérica, y finalmente la comparación de áreas irregulares.

Lo cual significa que las tareas que implican estimación de áreas presentan rendimientos significativamente diferentes si las áreas tienen formas regulares o irregulares (amorfas). Es importante tener en cuenta que las tareas utilizadas en este estudio implican la estimación de áreas continuas y/o áreas acumuladas, y que los rendimientos en estas estimaciones han resultado significativamente superiores con las áreas regulares que, con las áreas irregulares, en el conjunto de la muestra.

Tabla 12. Comparaciones por parejas de las tasas de aciertos (%) en las diferentes magnitudes, para el conjunto de la muestra.

(I) Magnitud	(J) Magnitud	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig. ^b	95% de intervalo de confianza para diferencia ^b	
					Límite inferior	Límite superior
Numérica	Áreas regulares	-10,103*	0,684	< 0,001	-11,765	-8,441
	Áreas irregulares	6,500*	0,627	< 0,001	4,975	8,025
Áreas regulares	Numérica	10,103*	0,684	< 0,001	8,441	11,765
	Áreas irregulares	16,603*	0,718	< 0,001	14,857	18,350
Áreas irregulares	Numérica	-6,500*	0,627	< 0,001	-8,025	-4,975
	Áreas regulares	-16,603*	0,718	< 0,001	-18,350	-14,857

NOTA: Se basa en medias marginales estimadas

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0,05.

b. Ajuste para varias comparaciones: Bonferroni.

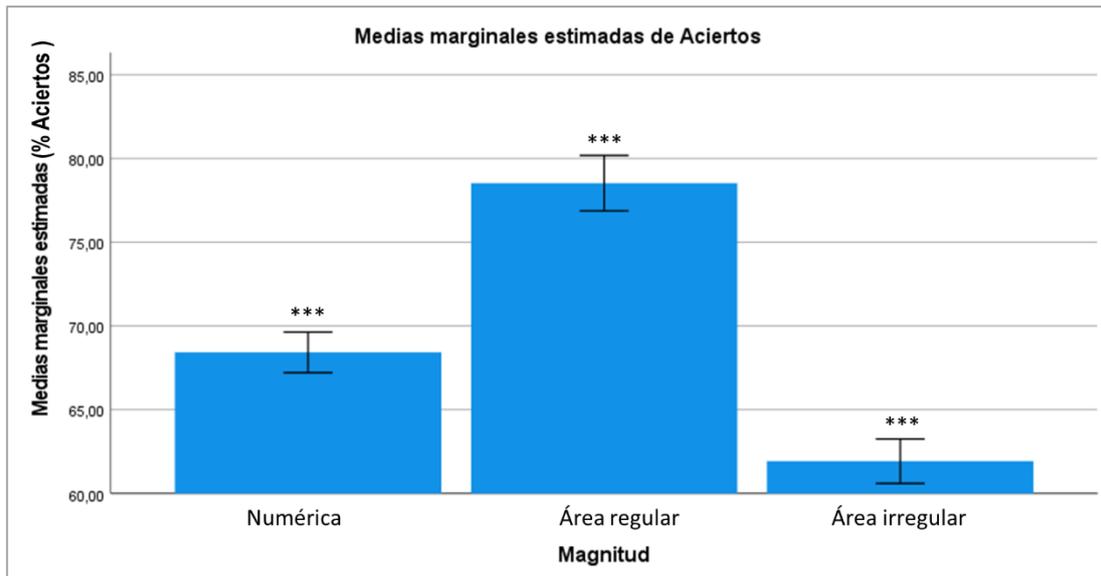


Figura 49. *Porcentajes de aciertos en cada magnitud para el conjunto de la muestra.*
 NOTA: barras de error con intervalo de confianza 95%. *** $p < 0,001$.

En cuanto a la interacción entre las magnitudes y los grupos de edad, el análisis muestra que dentro de los tres grupos de edad se cumple el efecto de que hay diferencias entre las tareas de comparación con áreas regulares y con áreas irregulares. Asimismo, dentro de cada grupo se cumple que las tareas más fáciles son las comparaciones de áreas regulares, seguidas de la comparación numérica, y finalmente la comparación de áreas irregulares (Figura 50).

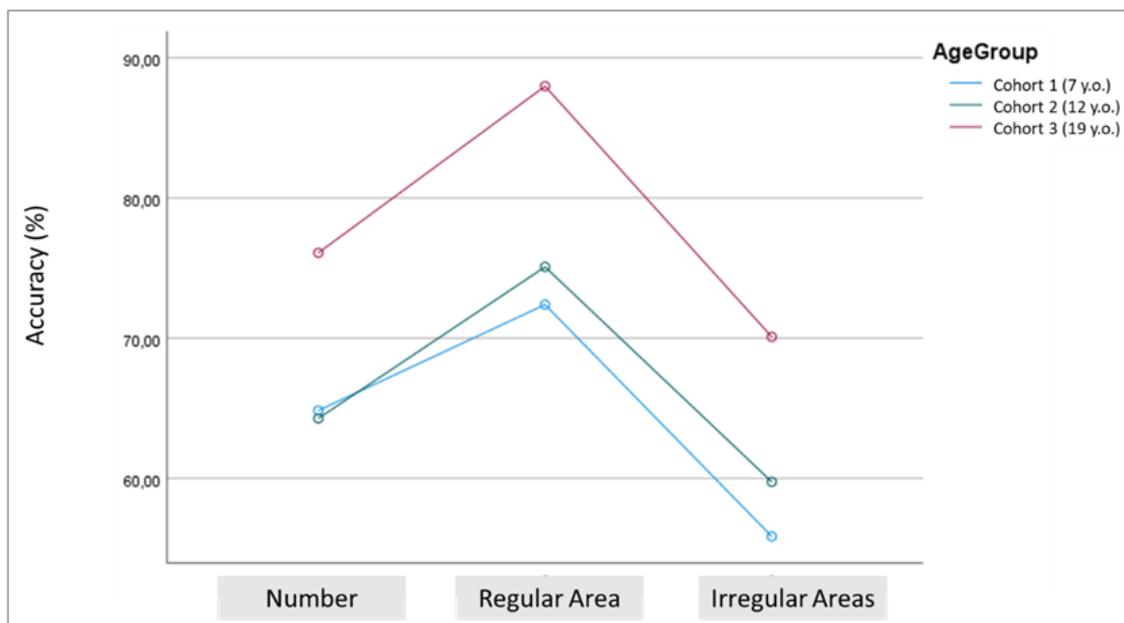


Figura 50. Porcentajes de aciertos de cada magnitud en cada uno de los tres grupos de edad. NOTA: para mayor claridad en el gráfico se han omitido las barras de error, el dato se encuentra en la Tabla 13. Tomado de García-Sanz (2022b).

Mientras que, entre grupos, se observa que el rendimiento del grupo 3 es significativamente superior a los otros dos grupos en las tres magnitudes. Sin embargo, entre el grupo 1 y 2 se observa similar rendimiento en las tareas numéricas y una cierta mejoría del grupo 2 respecto al 1 en las tareas espaciales tanto con áreas regulares como irregulares (Tabla 13, descriptivos). No obstante, las diferencias entre los dos grupos de niños no alcanzan significatividad estadística (Tabla 14, comparación múltiple). Es importante señalar que en este estudio se utilizaron exactamente las mismas ratios (niveles de dificultad de la comparación) en los tres grupos de edad; y equivalentes ratios en todas las comparaciones de magnitud (por ejemplo, la *ratio* 0,6 en la comparación numérica se corresponde a la comparación entre 9 y 15 elementos, mientras que en la comparación de áreas (EA y CA) se corresponde con un área proporcional en píxeles 9 y otra área proporcional a 15).

Tabla 13. Descriptivos del rendimiento (en % de aciertos) de los tres grupos de edad en cada una de las magnitudes.

Magnitud		N	Media	Desviación estándar	Error estándar	Mínimo	Máximo
Numérica	Grupo 1	37	64,849	7,083	1,164	48,93	77,08
	Grupo 2	42	64,287	6,732	1,039	51,71	75,13
	Grupo 3	37	76,094	6,426	1,056	53,52	85,00
	Total	116	68,232	8,605	0,799	48,93	85,00
Áreas regulares	Grupo 1	37	72,399	8,863	1,457	53,99	90,00
	Grupo 2	42	75,092	11,255	1,737	48,03	92,52
	Grupo 3	37	87,973	6,521	1,072	62,22	95,56
	Total	116	78,342	11,320	1,051	48,03	95,56
Áreas irregulares	Grupo 1	37	55,868	5,176	0,851	43,52	72,22
	Grupo 2	42	59,761	7,579	1,169	47,69	75,93
	Grupo 3	37	70,101	8,682	1,427	48,15	87,50
	Total	116	61,817	9,353	0,868	43,52	87,50

Tabla 14. Comparaciones múltiples de los % de aciertos entre los tres grupos de edad, en cada una de las magnitudes.

Magnitud	(I) GrupoEdad	(J) GrupoEdad	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95% ^b	
						Límite inferior	Límite superior
Numérica	Grupo 1	Grupo 2	0,562	1,522	1,000	-3,137	4,261
		Grupo 3	-11,244*	1,570	< 0,001	-15,059	-7,4230
	Grupo 2	Grupo 1	-0,562	1,522	1,000	-4,261	3,137
		Grupo 3	-11,807*	1,522	< 0,001	-15,506	-8,107
	Grupo 3	Grupo 1	11,244*	1,570	< 0,001	7,430	15,059
		Grupo 2	11,807*	1,522	< 0,001	8,107	15,506
Áreas regulares	Grupo 1	Grupo 2	-2,694	2,073	0,589	-7,732	2,344
		Grupo 3	-15,574*	2,138	< 0,001	-20,769	-10,379
	Grupo 2	Grupo 1	2,694	2,073	0,589	-2,344	7,732
		Grupo 3	-12,880*	2,073	< 0,001	-17,918	-7,843
	Grupo 3	Grupo 1	15,574*	2,138	< 0,001	10,379	20,769
		Grupo 2	12,880*	2,073	< 0,001	7,843	17,918
Áreas irregulares	Grupo 1	Grupo 2	-3,892	1,647	0,060	-7,896	0,111
		Grupo 3	-14,233*	1,699	< 0,001	-18,361	-10,105
	Grupo 2	Grupo 1	3,892	1,647	0,060	-0,111	7,896
		Grupo 3	-10,341*	1,647	< 0,001	-14,344	-6,337
	Grupo 3	Grupo 1	14,233*	1,699	< 0,001	10,105	18,361
		Grupo 2	10,341*	1,647	< 0,001	6,337	14,344

NOTA: Se basa en medias marginales estimadas

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0,05.

b. Ajuste para varias comparaciones: Bonferroni.

4.2.3. Rendimiento en las tareas de comparación según el tipo de tarea (uni-formato o mixta) dentro y entre los grupos de edad

El modelo factorial 3 x 2, correspondiente a los 3 grupos de edad (7, 12 y 19 años) y a las tareas agrupadas en tareas uni-formato (relacionadas con el procesamiento de magnitudes) y tareas mixtas (relacionadas con integración de magnitudes), utilizando como variable dependiente los porcentajes de aciertos, dio como resultado un efecto principal significativo del grupo de edad ($F_{(2,111)} = 51,369, p < 0,001, \eta^2 = 0,481$, potencia = 1,000), un efecto significativo del tipo de tarea (uni-formato o mixta) [$F_{(1,111)} = 8,990$,

$p = 0,003$, $\eta^2 = 0,075$, potencia = 0,844] y un efecto significativo de la interacción Grupo de Edad * Tipo de Tarea ($F_{(2,111)} = 3,142$, $p = 0,047$, $\eta^2 = 0,054$, potencia = 0,593).

Lo cual significa que: 1° hay diferencias significativas entre los tres grupos de edad en el conjunto de los tipos de tareas; 2° hay diferencias significativas entre el desempeño en las tareas uni-formato (procesamiento de una magnitud) y el desempeño en las tareas mixtas (las cuales requieren integración de magnitudes diferentes) en el conjunto de la muestra completa; y 3° las diferencias entre los grupos de edad son específicas de los tipos de tarea (uniformato o mixta). La Tabla 15 muestra las tasas de acierto (%) en cada grupo de edad para las tareas mixtas y las uni-formato.

La comparación entre las tareas uni-formato y las mixtas con ajustes de Bonferroni muestra que las tareas uni-formato, las cuales implican el procesamiento de una magnitud son significativamente más fáciles (tasas de acierto superiores) que las tareas mixtas (tasas de acierto inferiores), las cuales requieren integración de diferentes magnitudes, en el conjunto de la muestra (Figura 51).

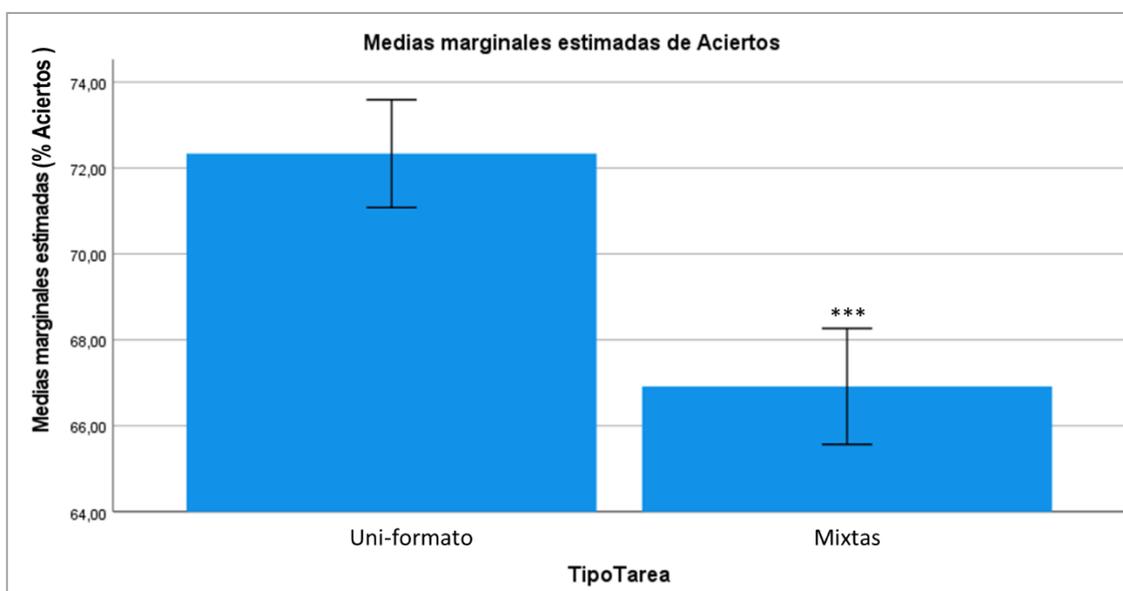


Figura 51. Porcentajes de aciertos de las tareas uni-formato y mixtas en el conjunto de la muestra. NOTA: barras de error con intervalo de confianza 95%. *** $p < 0,001$.

En cuanto a la interacción entre los tipos de tarea y los grupos de edad, el análisis muestra que dentro de cada uno de los tres grupos de edad se cumple el efecto de que las tareas

de integración (comparaciones mixtas) son más difíciles que las tareas de procesamiento (comparaciones uni-formato)(Figura 52).

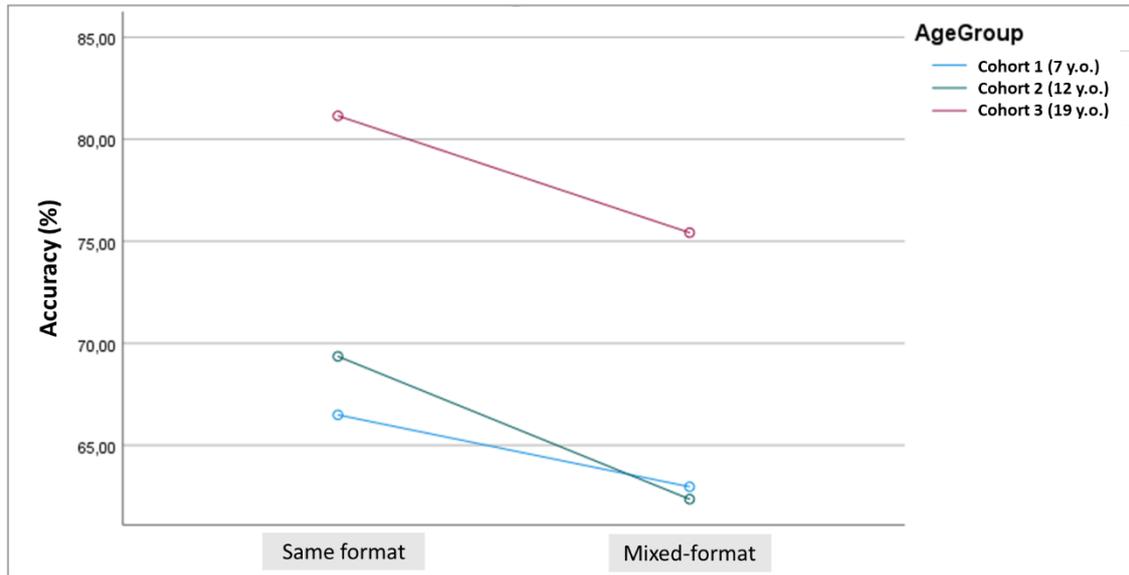


Figura 52. Porcentajes de aciertos de cada tipo de tarea en cada uno de los tres grupos de edad. Tomado de García-Sanz (2022b). NOTA: para mayor claridad en el gráfico se han omitido las barras de error, el dato se encuentra en la Tabla 15.

Las diferencias entre grupos para cada tipo de tarea se muestran en la tabla 15 (descriptivos por grupo y tarea) y la Tabla 16 (análisis múltiple con correcciones de Bonferroni). El rendimiento en las tareas mixtas es similar en los dos grupos de niños, y ambos son significativamente inferiores al rendimiento del grupo de adultos. Mientras que en las tareas uni-formato se observa una gradualidad entre el grupo 1, el 2 y el 3 (Figura 52). Sin embargo, sólo es estadísticamente significativa la diferencia entre los grupos 1 y 2 con el grupo 3.

Tabla 15. Descriptivos del rendimiento (en % de aciertos) de los tres grupos de edad en cada uno de los tipos de tareas.

		N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% de intervalo de confianza para la media	
						Límite inferior	Límite superior
Uni-formato	Grupo 1	37	66,204	6,905	1,135	63,902	68,507
	Grupo 2	42	69,772	8,262	1,274	67,197	72,346
	Grupo 3	37	80,974	4,906	0,807	79,338	82,610
	Total	116	72,207	9,235	0,857	70,509	73,906
Mixta	Grupo 1	37	62,540	6,467	1,063	60,384	64,696
	Grupo 2	42	62,989	7,994	1,233	60,497	65,480
	Grupo 3	37	75,138	7,920	1,302	72,497	77,778
	Total	116	66,720	9,435	0,876	64,985	68,456

Tabla 16. Comparaciones múltiples de las tasas de aciertos (%) entre los tres grupos de edad, en cada una de los tipos de tareas.

Tipo de tarea	(I) GrupoEdad	(J) GrupoEdad	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95% ^b	
						Límite inferior	Límite superior
Uni-Formato	Grupo 1	Grupo 2	-3,567	1,556	0,071	-7,348	0,214
		Grupo 3	-14,770*	1,604	< 0,001	-18,669	-10,871
	Grupo 2	Grupo 1	3,5672	1,556	0,071	-0,214	7,348
		Grupo 3	-11,203*	1,556	< 0,001	-14,984	-7,421
	Grupo 3	Grupo 1	14,770*	1,604	< 0,001	10,871	18,669
		Grupo 2	11,20*	1,556	< 0,001	7,421	14,984
Mixta	Grupo 1	Grupo 2	-0,449	1,695	1,000	-4,567	3,669
		Grupo 3	-12,598*	1,747	< 0,001	-16,844	-8,351
	Grupo 2	Grupo 1	0,449	1,695	1,000	-3,669	4,567
		Grupo 3	-12,149*	1,695	< 0,001	-16,267	-8,031
	Grupo 3	Grupo 1	12,598*	1,747	< 0,001	8,351	16,844
		Grupo 2	12,149*	1,695	< 0,001	8,031	16,267

NOTA: Se basa en medias marginales estimadas

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0,05.

b. Ajuste para varias comparaciones: Bonferroni.

4.3. Estudio 3: Ensayo aleatorizado de los efectos de la modulación de la excitabilidad cortical de las regiones frontoparietales sobre la capacidad para procesar e integrar información cuantitativa numérica y la espacial

Se analizó la distribución de la muestra mediante la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, la cual es adecuada para tamaños de muestra inferiores a 50, con correcciones de significación de Lilenfors. Y se realizó la prueba de esfericidad de Mauchly de la matriz de covarianzas de error de las variables dependientes. Los resultados de ambas pruebas ([Apéndice 12](#)) permiten asumir una distribución normal de las variables de estudio en las tres condiciones de estimulación, así como el cumplimiento del criterio de esfericidad; por lo tanto, se realizó un análisis estadístico mediante pruebas paramétricas.

4.3.1. Efectos de la estimulación en el rendimiento en las tareas de comparación de magnitudes

4.3.1.1. Tiempos de reacción

Los resultados del análisis factorial (7 tareas x 3 regiones) tomando como variable los tiempos de reacción, muestran un efecto principal de la región (condición de estimulación) [$F_{(2,18)} = 7,198, p = 0,005, \eta^2 = 0,444, \text{potencia} = 0,886$], así como de la tarea [$F_{(6,54)} = 21,046, p < 0,001, \eta^2 = 0,700, \text{potencia} = 1,000$]. Pero no hay una interacción significativa entre Tarea * Región [$F_{(12,108)} = 0,374, p = 0,970, \eta^2 = 0,040, \text{potencia} = 0,202$].

Las comparaciones por parejas con ajustes de Bonferroni muestran que los TRs la estimulación prefrontal fueron más rápidos que en la estimulación placebo, mientras que no hay una diferencia significativa entre placebo y estimulación parietal (Tabla 17 y Figura 53).

Tabla 17. Comparaciones por parejas de los tiempos de respuesta según la condición de estimulación (prefrontal, parietal y sham) para el conjunto de tareas de comparación.

(I) Región	(J) Región	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig. ^b	95% de intervalo de confianza para diferencia ^b	
					Límite inferior	Límite superior
Prefrontal	Parietal	-0,096	0,035	0,068	-0,199	0,006
	Sham	-0,138*	0,036	0,011	-0,242	-0,034
Parietal	Prefrontal	0,096	0,035	0,068	-0,006	0,199
	Sham	-0,042	0,041	1,000	-0,162	0,079
Sham	Prefrontal	0,138*	0,036	0,011	0,034	0,242
	Parietal	0,042	0,041	1,000	-0,079	0,162

NOTA: Se basa en medias marginales estimadas

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0,05.

b. Ajuste para varias comparaciones: Bonferroni.

Es decir, la estimulación prefrontal afecta al conjunto de tareas, aumentando la velocidad de procesamiento -tiempos de respuestas más breves-, en comparación con la condición *sham*. Sin embargo, no hay evidencia estadística de que la estimulación prefrontal afecte específicamente a unas tareas más que a otras (la interacción Región * Tarea no fue significativa).

Por su parte, la estimulación parietal parece implicar en promedio tiempos más breves que la estimulación *sham*, pero esta diferencia no es estadísticamente significativa (Figura 53).

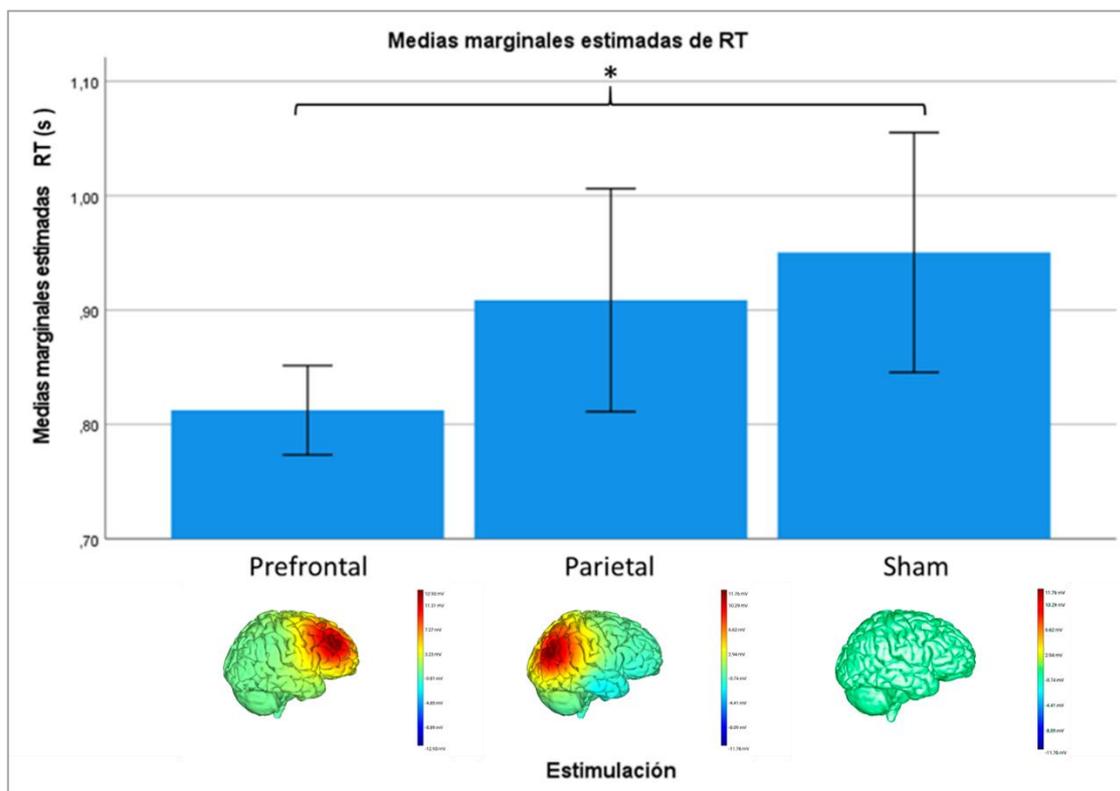


Figura 53. *Tiempos de reacción en el conjunto de tareas de comparación de magnitudes, en las condiciones de estimulación: prefrontal, parietal y sham. NOTA: * $p < 0,05$.*

4.3.1.2. Porcentaje de aciertos

Los resultados del modelo lineal (7 tareas x 3 regiones) utilizando como variable dependiente los porcentajes de aciertos mostraron un efecto principal significativo de la tarea [$F_{(6,54)} = 52,213$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,853$, potencia = 1,000]. Mientras que no hay un efecto significativo de la región (condición de estimulación) [$F_{(2,18)} = 0,450$, $p < 0,644$, $\eta^2 = 0,048$, potencia = 0,112], ni de la interacción entre Tarea * Región [$F_{(12,108)} = 0,895$, $p = 0,554$, $\eta^2 = 0,090$, potencia = 0,494]. Es decir, no hay un efecto de la estimulación en la tasa de aciertos de las tareas.

Por otro lado, las tareas difieren entre sí en la tasa de aciertos. Como se puede observar en la Figura 54, las tareas más difíciles (% de aciertos < 80%) son las tareas de comparación mixtas (numérica mixta, áreas regulares continuas/discretas, y áreas irregulares continuas/discretas); mientras que las tareas más fáciles (% aciertos > 85%)

son las tareas de comparación uni-formato (numérica simbólica, numérica no simbólica, área continua regular y área continua irregular). Este efecto se da en las tres condiciones de estimulación (Figura 54).

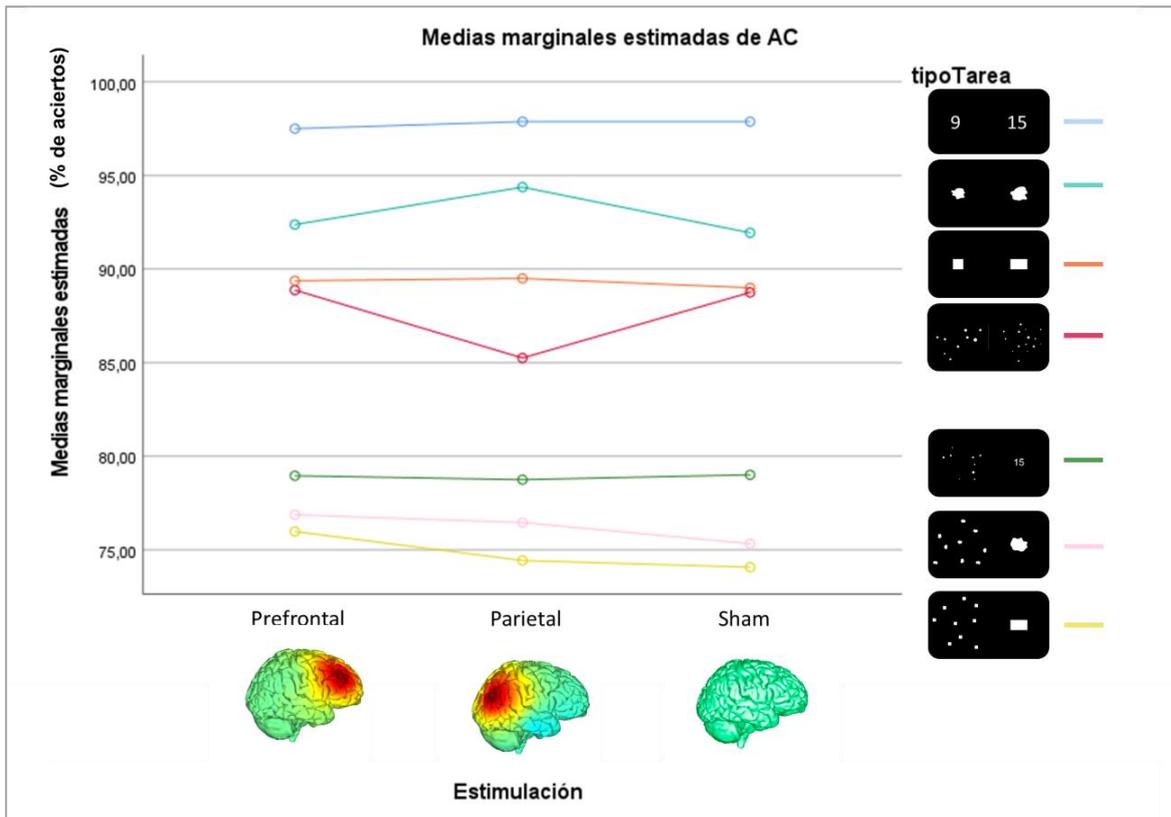


Figura 54. Porcentajes de aciertos para cada tarea en las tres condiciones de estimulación. *NOTA: para mayor claridad en el gráfico se han omitido las barras de error, el dato se encuentra en el Apéndice 13, Tabla A.*

Por su parte, el análisis por parejas con ajustes de Bonferroni para las 7 tareas de comparación (Tabla 18) muestra que hay diferencias significativas entre casi todas las tareas. Excepto entre la tarea de comparación numérica no simbólica y las tareas de comparación de áreas continuas (sean con figuras regulares o irregulares). Y tampoco entre la tarea de comparación numérica mixta y las tareas de comparación de áreas mixtas regulares, con las áreas mixtas irregulares.

Tabla 18. Comparaciones por parejas de las tasas de aciertos en cada una de las siete tareas de comparación, para el conjunto de condiciones de estimulación.

(I) Tarea	(J) Tarea	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig. ^b	95% de intervalo de confianza para diferencia ^b	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	10,125*	1,322	0,001	4,601	15,649
	3	18,844*	0,894	< 0,001	15,110	22,578
	4	8,458*	0,798	< 0,001	5,124	11,793
	5	22,922*	1,917	< 0,001	14,911	30,933
	6	4,854*	0,821	0,005	1,425	8,283
	7	21,528*	2,339	< 0,001	11,754	31,303
	2	1	-10,125*	1,322	0,001	-15,649
3		8,719*	1,506	0,006	2,427	15,011
4		-1,667	1,694	1,000	-8,746	5,413
5		12,797*	2,103	0,004	4,010	21,584
6		-5,271	1,645	0,226	-12,143	1,601
7		11,403*	2,664	0,043	0,273	22,534
3		1	-18,844*	,894	< 0,001	-22,578
	2	-8,719*	1,506	0,006	-15,011	-2,427
	4	-10,385*	1,176	< 0,001	-15,301	-5,470
	5	4,078	1,941	1,000	-4,031	12,188
	6	-13,990*	,805	< 0,001	-17,355	-10,624
	7	2,685	2,298	1,000	-6,917	12,286
	4	1	-8,458*	,798	< 0,001	-11,793
2		1,667	1,694	1,000	-5,413	8,746
3		10,385*	1,176	< 0,001	5,470	15,301
5		14,463*	1,998	0,001	6,114	22,813
6		-3,604	,998	0,118	-7,773	0,565
7		13,070*	2,316	0,007	3,394	22,747
5		1	-22,922*	1,917	< 0,001	-30,933
	2	-12,797*	2,103	0,004	-21,584	-4,010
	3	-4,078	1,941	1,000	-12,188	4,031
	4	-14,463*	1,998	0,001	-22,813	-6,114
	6	-18,068*	1,745	< 0,001	-25,360	-10,776
	7	-1,393	1,081	1,000	-5,909	3,122

(Continúa en página siguiente)

(I) Tarea	(J) Tarea	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig. ^b	95% de intervalo de confianza para diferencia ^b	
					Límite inferior	Límite superior
6	1	-4,854*	0,821	0,005	-8,283	-1,425
	2	5,271	1,645	0,226	-1,601	12,143
	3	13,990*	0,805	< 0,001	10,624	17,355
	4	3,604	0,998	0,118	-0,565	7,773
	5	18,068*	1,745	< 0,001	10,776	25,360
	6					
	7	16,674*	2,145	0,001	7,712	25,636
7	1	-21,528*	2,339	< 0,001	-31,303	-11,754
	2	-11,403*	2,664	0,043	-22,534	-0,273
	3	-2,685	2,298	1,000	-12,286	6,917
	4	-13,070*	2,316	0,007	-22,747	-3,394
	5	1,393	1,081	1,000	-3,122	5,909
	6	-16,674*	2,145	0,001	-25,636	-7,712
	7					

NOTA: Se basa en medias marginales estimadas. Tareas: 1: Comparación numérica simbólica, 2: numérica no simbólica, 3: numérica mixta, 4: áreas continuas regulares, 5: áreas regulares mixtas, 6: áreas continuas irregulares, 7: áreas irregulares mixtas.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0,05.

b. Ajuste para varias comparaciones: Bonferroni.

4.3.2. Efectos de la estimulación en el rendimiento de las tareas según la magnitud (numérica, espacial regular, espacial irregular)

4.3.2.1. Tiempos de reacción

El análisis factorial 3 x 3 correspondiente a las tres magnitudes (numérica, espacial con áreas regulares, y espacial con áreas irregulares) frente a las tres condiciones de estimulación (prefrontal, parietal y *sham*) tomando como variable los TR, mostró un efecto principal significativo de la región (condición de estimulación) [$F_{(2,18)} = 6,687$, $p = 0,007$, $\eta^2 = 0,426$, potencia = 0,881], y de la magnitud (numérica, área regular, área irregular) [$F_{(2,18)} = 20,073$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,690$, potencia = 1,000]. Pero no mostró un efecto significativo para la interacción Magnitud * Región [$F_{(4,36)} = 0,191$, $p = 0,941$, $\eta^2 = 0,021$, potencia = 0,086].

Lo cual significa que hay diferencias en los tiempos de respuesta según la magnitud que se esté comparando (numérica, espacial regular o espacial irregular). Y también hay

diferencias entre los TRs según la condición de estimulación (prefrontal, parietal o *sham*). Pero estas diferencias de estimulación no afectan específicamente a un tipo de magnitud más que a otra.

Las comparaciones por parejas con ajuste de Bonferroni para los distintos tipos de magnitudes se muestran en la Tabla 19, mientras que las comparaciones para las distintas condiciones de estimulación se encuentran en la Tabla 20.

Tabla 19. Comparaciones por parejas de los tiempos de respuesta según la magnitud (numérica, espacial regular, y espacial irregular) para el conjunto de las condiciones de estimulación.

(I) Magnitud	(J) Magnitud	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig. ^b	95% de intervalo de confianza para diferencia ^b	
					Límite inferior	Límite superior
Numérica	Áreas regulares	-0,120*	0,040	0,043	-0,236	-0,004
	Áreas irregulares	0,144*	0,044	0,027	0,016	0,272
Áreas regulares	Numérica	0,120*	0,040	0,043	0,004	0,236
	Áreas irregulares	0,264*	0,042	< 0,001	0,141	0,387
Áreas irregulares	Numérica	-0,144*	0,044	0,027	-0,272	-0,016
	Áreas regulares	-0,264*	0,042	< 0,001	-0,387	-0,141

NOTA: Se basa en medias marginales estimadas

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0,05.

b. Ajuste para varias comparaciones: Bonferroni.

Las tareas que se resuelven con más rapidez son las comparaciones de áreas irregulares, seguidas de las tareas numéricas, y finalmente las comparaciones de áreas regulares. Este efecto se repite en las tres condiciones de estimulación (Figura 55).

Tabla 20. Comparaciones por parejas de los tiempos de respuesta según la estimulación (prefrontal, parietal y sham), para el conjunto de magnitudes.

(I) Estimulación	(J) Estimulación	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig. ^b	95% de intervalo de confianza para diferencia ^b	
					Límite inferior	Límite superior
Prefrontal	Parietal	-0,098	0,039	0,100	-0,213	0,016
	Sham	-0,138*	0,036	0,013	-0,244	-0,032
Parietal	Prefrontal	0,098	0,039	0,100	-0,016	0,213
	Sham	-0,039	0,041	1,000	-0,159	0,081
Sham	Prefrontal	0,138*	0,036	0,013	0,032	0,244
	Parietal	0,039	0,041	1,000	-0,081	0,159

NOTA: Se basa en medias marginales estimadas

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0,05.

b. Ajuste para varias comparaciones: Bonferroni.

Por su parte, los tiempos de respuesta en la estimulación prefrontal son significativamente más rápidos que en la estimulación *sham*. Mientras que los tiempos de respuesta en el caso de la estimulación parietal parecen moderadamente inferiores a la condición *sham*; sin embargo, esta diferencia no es significativa¹².

¹² Hay que tener en cuenta que se han aplicado los ajustes de Bonferroni, que son muy conservativos. Hay autores como Glikman (2014) que consideran que las correcciones de Bonferroni aumentan los errores tipo II, y por tanto sugieren usar pruebas menos conservativas. En este sentido, es importante señalar que en nuestro estudio, si no se aplican los ajustes de Bonferroni, la diferencia entre los tiempos de reacción de parietal y *sham* sí son significativos.

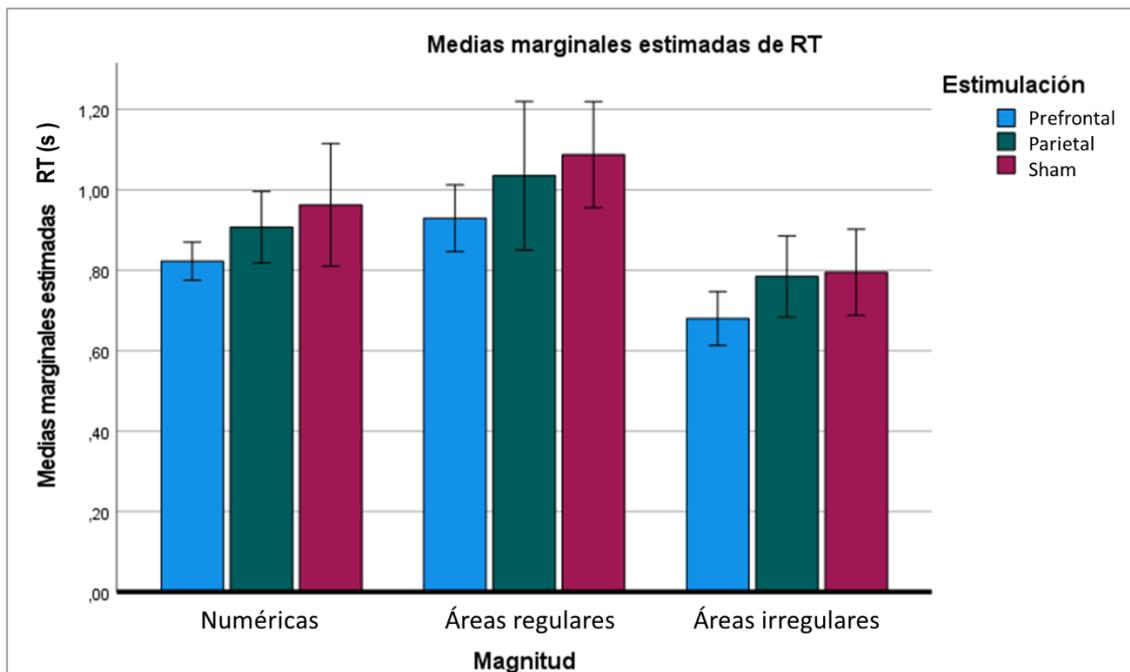


Figura 55. *Tiempos de reacción en las tareas de comparación numéricas, de áreas regulares y de áreas irregulares en las tres condiciones de estimulación. NOTA: barras de error con intervalo de confianza 95%.*

4.3.2.2. Porcentaje de aciertos

Los resultados del modelo lineal (3 magnitudes x 3 regiones) tomando como variable el porcentaje de aciertos mostró un efecto principal significativo para la magnitud [$F_{(2,18)} = 14,846$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,623$, potencia = 0,996], pero no hay efectos significativos para la región (condición de estimulación) [$F_{(2,18)} = 0,564$, $p = 0,579$, $\eta^2 = 0,059$, potencia = 0,129] ni para la interacción Magnitud * Región [$F_{(4,36)} = 0,969$, $p = 0,436$, $\eta^2 = 0,097$, potencia = 0,275].

Los análisis por parejas con ajuste de Bonferroni muestran diferencias significativas entre las tareas numéricas y las tareas de comparación de áreas irregulares, y entre éstas y las áreas regulares (Tabla 21 y Figura 56). En las tres condiciones de estimulación se cumple que las tareas numéricas son las más fáciles, seguidas de las comparaciones de áreas irregulares, y finalmente las regulares.

Tabla 21. Comparaciones por parejas de las tasas de aciertos (%) según la magnitud (numérica, espacial regular y espacial irregular) para el conjunto de las condiciones de estimulación.

(I) Magnitud	(J) Magnitud	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig. ^b	95% de intervalo de confianza para diferencia ^b	
					Límite inferior	Límite superior
Numérica	Áreas regulares	6,034*	1,122	0,001	2,742	9,326
	Áreas irregulares	3,535	1,400	0,098	-0,572	7,642
Áreas regulares	Numérica	-6,034*	1,122	0,001	-9,326	-2,742
	Áreas irregulares	-2,499*	0,703	0,019	-4,562	-0,436
Áreas irregulares	Numérica	-3,535	1,400	0,098	-7,642	0,572
	Áreas regulares	2,499*	0,703	0,019	0,436	4,562

NOTA: Se basa en medias marginales estimadas

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0,05.

b. Ajuste para varias comparaciones: Bonferroni.

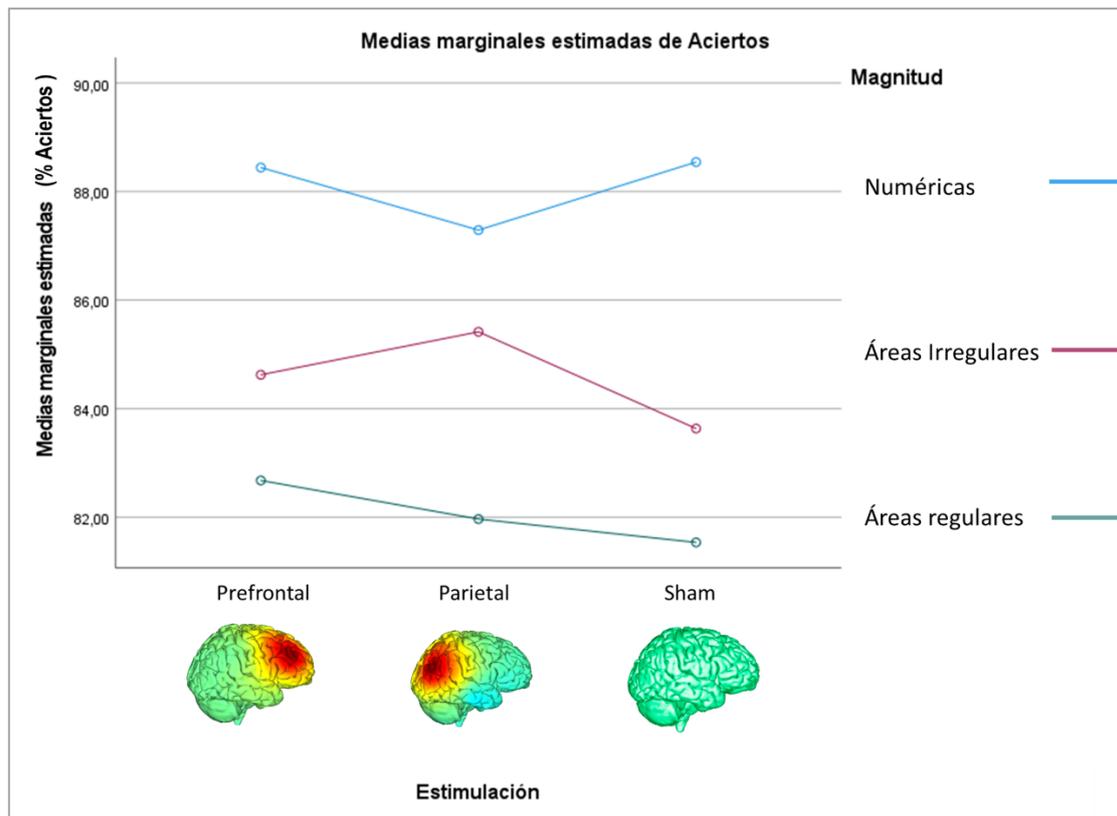


Figura 56. Porcentajes de aciertos en las tareas de comparación numéricas, de áreas regulares y de áreas irregulares en las tres condiciones de estimulación. NOTA: para mayor claridad en el gráfico se han omitido las barras de error, el dato se encuentra en el Apéndice 13, Tabla B.

4.3.3. Efecto de la estimulación en el rendimiento de las tareas según el tipo de tarea (uni-formato vs mixtas)

4.3.3.1. Tiempos de reacción

En el análisis 2 x 3 correspondiente a los dos tipos de tarea (uni-formato y mixta) frente a las 3 condiciones de estimulación (prefrontal, parietal y sham) tomando como variable dependiente los TRs mostró un efecto principal de la región (condición de estimulación) [$F_{(2,18)} = 7,258, p = 0,005, \eta^2 = 0,446, potencia = 0,889$], y del tipo de tarea [$F_{(1,9)} = 48,193, p < 0,001, \eta^2 = 0,843, potencia = 1,000$] pero no hay una interacción significativa entre el tipo de tarea y la región estimulada [$F_{(2,18)} = 0,091, p = 0,914, \eta^2 = 0,010, potencia = 0,062$]. Es decir, se cumple que las tareas uni-formato y las mixtas tienen diferentes tiempos de reacción. Además, la condición de estimulación afecta a los TR de las tareas, pero no se puede afirmar que afecte de forma diferencial a las tareas uni-formato y a las mixtas (ya que la interacción TipoTarea * Estimulación no es significativa).

La comparación entre los TRs de las tareas uni-formato (procesamiento de la misma magnitud) y las tareas mixtas (integración de diferentes magnitudes) muestra que las tareas mixtas son significativamente más lentas que las tareas uni-formato ($p < 0,001$, Figura 57).

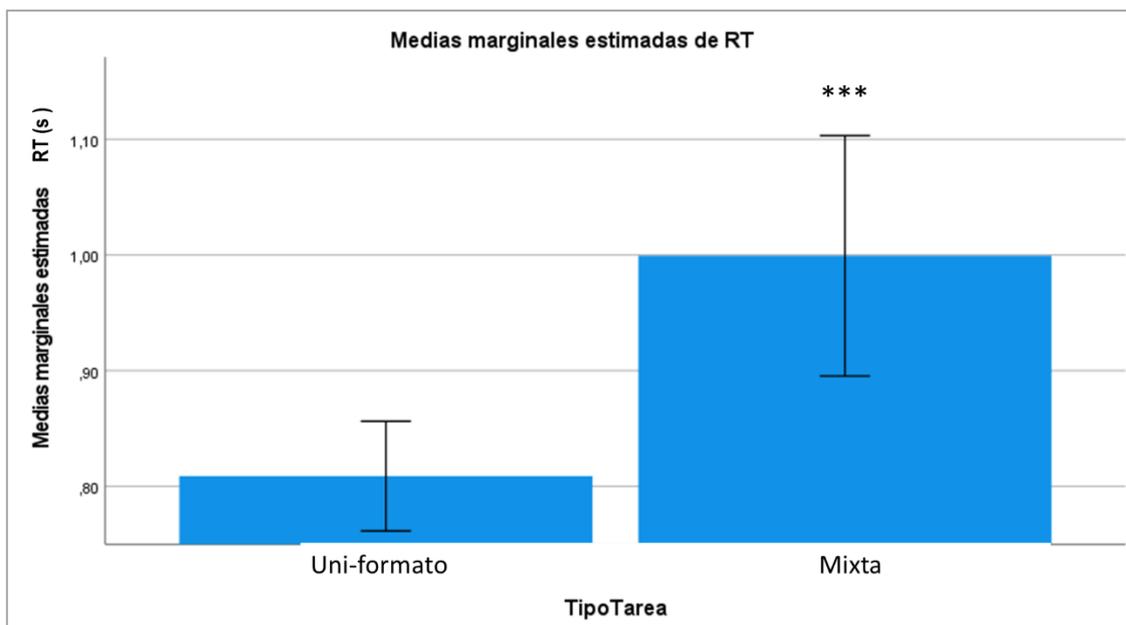


Figura 57. *Tiempos de reacción en las tareas uni-formato y mixtas, en el conjunto de las condiciones de estimulación. NOTA: barras de error con intervalo de confianza 95%. *** $p < 0,001$.*

Por su parte, las comparaciones por parejas con ajustes de Bonferroni muestran que los tiempos de reacción en la condición prefrontal fueron significativamente más rápidos que en *sham* (Tabla 22 y Figura 58). Mientras que no hay diferencias significativas entre parietal y *sham*, ni entre prefrontal y parietal.

Tabla 22. Comparaciones por parejas de los tiempos de respuesta según la condición de estimulación (prefrontal, parietal y sham) para el conjunto de tipos de tareas (uni-formato y mixtas).

(I) Estimulación	(J) Estimulación	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig. ^b	95% de intervalo de confianza para diferencia ^b	
					Límite inferior	Límite superior
Prefrontal	Parietal	-0,097	0,036	0,075	-0,204	0,009
	Sham	-0,138*	0,035	0,010	-0,240	-0,035
Parietal	Prefrontal	0,097	0,036	0,075	-0,009	0,204
	Sham	-0,040	0,040	1,000	-0,158	0,077
Sham	Prefrontal	0,138*	0,035	0,010	0,035	0,240
	Parietal	0,040	0,040	1,000	-0,077	0,158

NOTA: Se basa en medias marginales estimadas

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0,05.

b. Ajuste para varias comparaciones: Bonferroni.

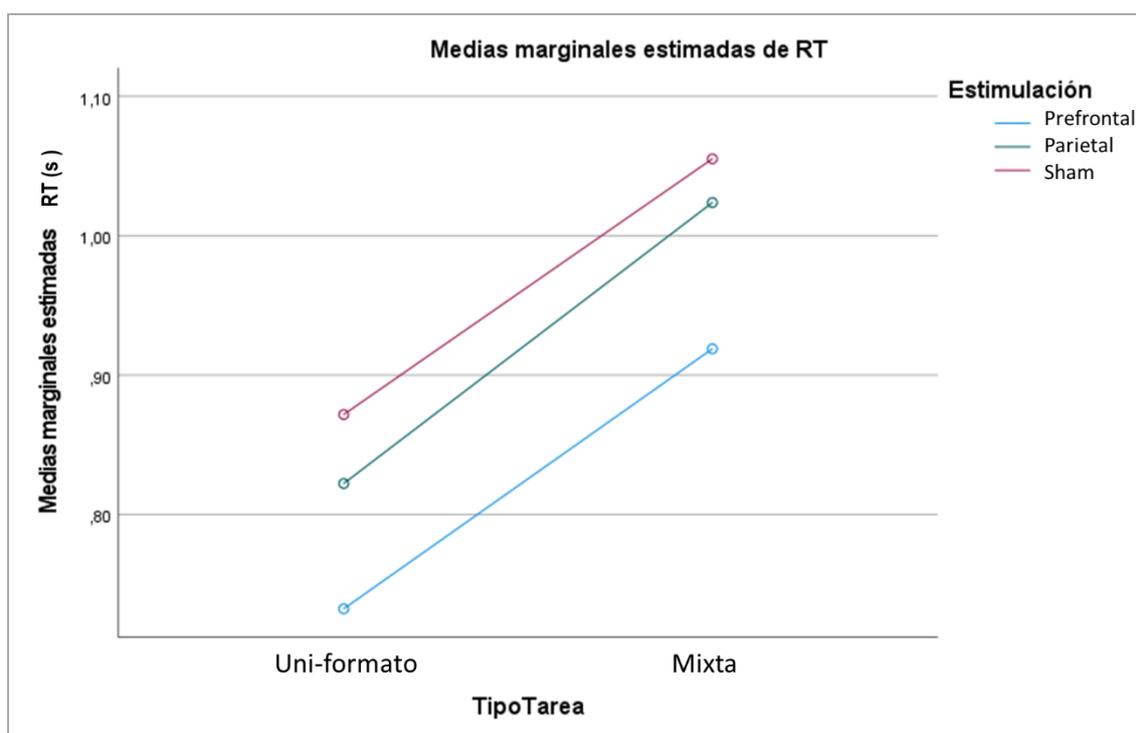


Figura 58. Tiempos de reacción en las tareas uni-formato y las mixtas, en cada una de las condiciones de estimulación. NOTA: para mayor claridad en el gráfico se han omitido las barras de error, el dato se encuentra en el Apéndice 13, Tabla C.

4.3.3.2. Porcentaje de aciertos

Los resultados del modelo lineal 2 x 3 correspondiente a los dos tipos de tareas (uni-formato y mixtas) y las tres condiciones de estimulación (prefrontal, parietal y *sham*), tomando como variable el porcentaje de aciertos, mostró un efecto principal significativo del tipo de tarea [$F_{(1,9)} = 127,107, p < 0,001, \eta^2 = 0,934, potencia = 1,000$], pero no hay efectos significativos de la región (condición de estimulación) [$F_{(2,18)} = 0,545, p = 0,589, \eta^2 = 0,057, potencia = 0,126$], ni de la interacción TipoTarea * Región [$F_{(2,18)} = 0,374, p = 0,694, \eta^2 = 0,040, potencia = 0,101$].

La comparación entre el porcentaje de aciertos de las tareas uni-formato (procesamiento de la misma magnitud) y las tareas mixtas (integración de diferentes magnitudes) muestra que las tareas uni-formato son significativamente más fáciles que las tareas mixtas ($p < 0,001$). La Tabla 23 muestra los promedios de % de aciertos en cada tipo de tarea, en el conjunto de las condiciones de estimulación. Mientras que la Figura 59 muestra que la mayor dificultad de las tareas mixtas es consistente en las tres condiciones de estimulación.

Tabla 23. *Descriptivos del rendimiento (en % de aciertos) en las tareas uni-formato y las mixtas, en el conjunto de condiciones de estimulación.*

TipoTarea	Media	Desv. Error	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
Uni-formato	91,891	0,603	90,527	93,254
Mixtas	76,652	1,501	73,258	80,046

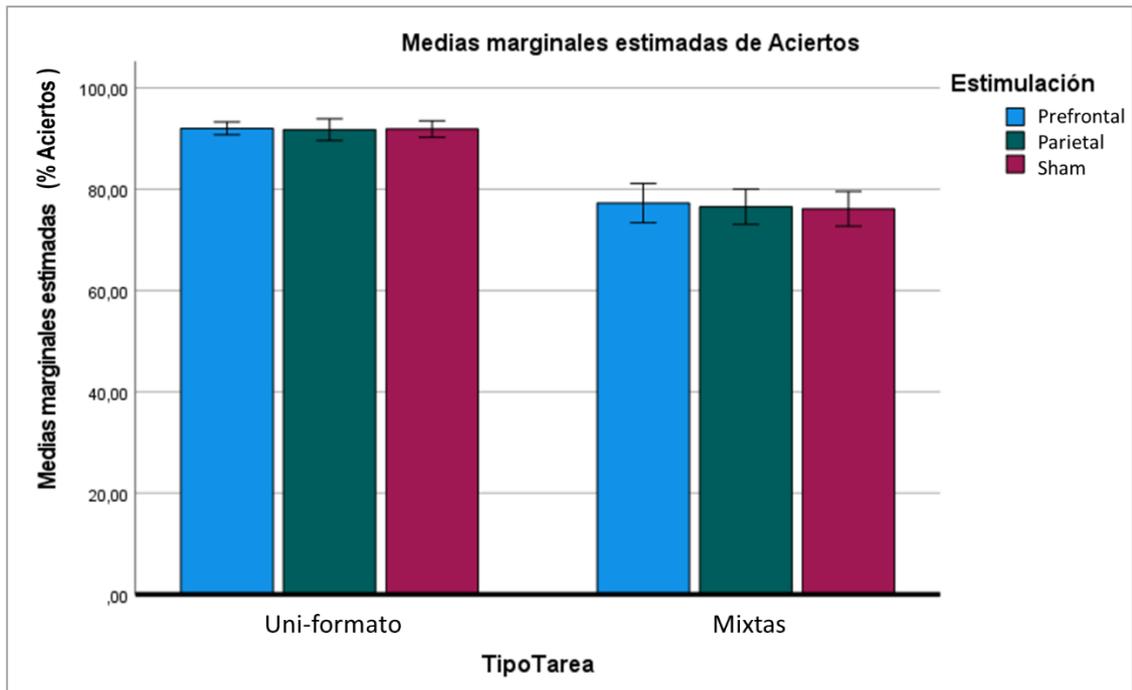


Figura 59. Porcentajes de aciertos de las tareas uni-formato y mixtas en cada una de las condiciones de estimulación. *NOTA: barras de error con intervalo de confianza 95%.*

5. Discusión y limitaciones de cada estudio

5.1. Estudio 1: El uso de las NIBS en estudios de cognición numérica

Los resultados de la revisión sistemática de literatura permiten concluir que la estimulación transcraneal no invasiva (magnética y eléctrica) aplicada a regiones de la corteza parietal y la corteza prefrontal tiene efectos neuromoduladores, que se traducen en efectos conductuales medibles que afectan a las funciones cognitivas relacionadas con el procesamiento numérico y de magnitud, y con la aritmética. Por lo tanto, las NIBS se pueden considerar unas técnicas valiosas para establecer relaciones entre estructuras cerebrales específicas y ciertas funciones cognitivas, al menos en lo que respecta a la cognición numérica (García-Sanz et al., 2022a).

Esta revisión sistemática también pone de relieve la ventaja de las NIBS sobre otras técnicas utilizadas para estudiar las bases neurales de la cognición numérica, ya que permite una resolución espacial, temporal y funcional que otras técnicas no alcanzan (Figura 60). A nivel funcional, la estimulación transcraneal, tanto eléctrica como magnética, proporciona mapas de interferencia que indican las regiones cuya implicación (directa o por redes) es crucial para la función cognitiva de interés; mientras que las técnicas de neuroimagen como la IRMf, la tomografía por emisión de positrones (TEP), y la magnetoencefalografía (MEG) aportan mapas de correlación basados en la actividad concurrente. Por tanto, las NIBS tienen una resolución funcional mayor, ya que aportan evidencia basada en mecanismos de interferencia, y este tipo de evidencia se considera más sólido que la correlación (Pitcher et al., 2021; Walsh y Cowey, 2000). En términos espaciales, la resolución espacial conductual de los efectos de la estimulación magnética varía entre 0,5-1,5 cm dependiendo del tejido estimulado (O'Shea y Walsh, 2007); mientras que la estimulación eléctrica, cuyos efectos abarcan regiones más amplias, ha logrado mejores resoluciones gracias a los protocolos de alta definición (HD-tDCS) y al uso de los modelos computacionales del campo eléctrico (Hartmann et al., 2020). En cuanto a la resolución temporal, hemos visto cómo la estimulación magnética de pulsos simples hace posible el estudio del curso temporal de procesos de cognición numérica, alcanzando una discriminación temporal del orden de varias decenas de milisegundos (por ejemplo: ~25–60 ms, en Rusconi et al., 2013). Esta resolución temporal sólo es comparable a la lograda con la de la EEG (García-Sanz et al., 2022a; Pascual-Leone et al., 2000). Podemos concluir que las NIBS son un aporte valioso por su resolución

espacial, temporal y funcional, a la investigación básica acerca de la cognición numérica (Figura 60).

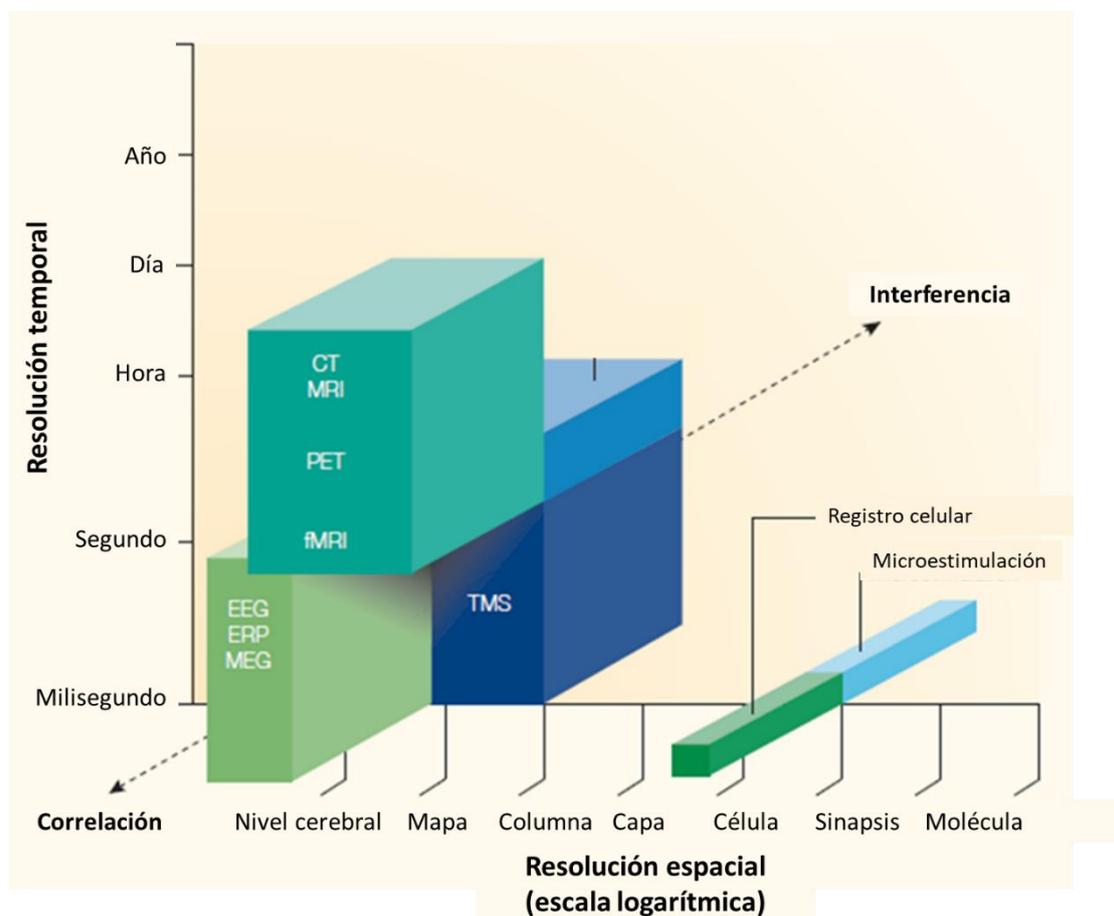


Figura 60. Representación gráfica de la resolución espacial, temporal y funcional de las diferentes técnicas empleadas para el estudio de las bases neurales de los procesos cognitivos. CT: tomografía computarizada, MRI: imagen de resonancia magnética, PET: tomografía de positrones, fMRI: imagen de resonancia magnética funcional, EEG: electroencefalografía, ERP: registro de potenciales evocados, MEG: magnetoencefalografía. Adaptada de Walsh y Cowey (2000).

En este sentido, la revisión sistemática muestra que el uso de las NIBS para abordar las bases neurales de la cognición numérica ha permitido corroborar la implicación de estructuras como el IPS (Cappelletti et al., 2009; Dormal et al., 2008; Lecce et al., 2015), el AG (Cattaneo et al., 2009a; Fresnoza et al., 2020; Montefinese et al., 2017), la DLPFC (Mosbacher et al., 2020; Popescu et al., 2016; Snowball et al., 2013) y el IFG (Hayashi et al., 2013; Rusconi et al., 2011, 2013) en el procesamiento numérico, el procesamiento

espacial y el cálculo. Esta implicación ya había sido puesta de relieve por estudios de neuroimagen basados en IRMf (Arsalidou y Taylor, 2011; Hawes, et al., 2019b; Sokolowski et al., 2017a, 2017b). Sin embargo, el uso de la estimulación transcraneal ha permitido identificar cuál de las regiones activas durante cada función cognitiva, juega un rol crucial en esa función. Por ejemplo, M. Andres et al. (2011) identificaron mediante IRMf que la porción horizontal del surco intraparietal (HIPS, del inglés *Horizontal Intraparietal Sulcus*) y el lóbulo parietal posterior superior (PSPL, del inglés *Posterior Superior Parietal Lobe*) se activaban durante tareas de cálculo mental; pero mediante TMS comprobaron que sólo el HIPS era crucial para la función cognitiva del cálculo mental.

Además, la revisión pone de manifiesto que el uso de las NIBS ha permitido establecer disociaciones y dobles disociaciones entre regiones cerebrales y funciones cognitivas relacionadas con la cognición numérica¹³. Así, G.L.F. Cheng et al. (2013) disociaron los procesos de ordinalidad y cardinalidad en el IPS izquierdo aplicando TBS. Mientras que R. Cohen Kadosh et al. (2010) probaron la disociación entre el procesamiento numérico de dígitos (por ejemplo “7”) y el procesamiento numérico verbal (“siete”) por parte de poblaciones neuronales específicas en el IPS derecho; y la doble disociación entre estos formatos en el IPS izquierdo, lo cual demuestra que ambos lóbulos parietales están dotados de grupos neuronales específicos para codificar la cantidad en uno y otro formato (dígitos y palabras). Por su parte, F. Lecce et al. (2015) probaron la disociación entre las cantidades continuas y las discretas en los lóbulos parietales derecho e izquierdo, respectivamente; mediante la aplicación de estimulación magnética disruptiva. Y P.A. Pope et al. (2015) probaron que la estimulación eléctrica anódica de la DLPFC mejora las habilidades de cálculo cuando se trata de restas seriadas, pero no cuando se trata de sumas. En definitiva, la estimulación (eléctrica y magnética) han contribuido significativamente a la investigación básica acerca de las bases neurales del procesamiento numérico y el cálculo proporcionando mapas de interferencia.

Por el contrario, en cuanto a los posibles usos aplicados de las NIBS en cognición numérica, nuestra revisión sistemática muestra que no hay evidencia suficiente para poder

¹³ Se entiende por *disociación* el hecho de que una lesión en una zona afecte a una función cognitiva pero no a otra, lo cual indica que éstas funciones son independientes. Se entiende por *doble disociación* la demostración de que una región afecta a la función “A” pero no a la función “B”, y que otra región distinta afecta a “B” pero no a “A”, lo cual permite establecer inferencias más específicas sobre la localización y las funciones (Van Orden et al., 2001).

afirmar que los efectos de la neuromodulación de regiones frontales y/o de regiones parietales, en adultos sanos, se traduzcan en mejores desempeños en tareas de cognición numérica. De hecho, en los últimos 10 años no hay ningún ensayo del uso de la estimulación magnética con fines facilitadores de la cognición numérica en sujetos sanos. Mientras que la estimulación eléctrica sí se ha ensayado tanto con fines facilitadores como disruptores en adultos sin ninguna patología. No obstante, la revisión y el metaanálisis muestran resultados heterogéneos: hay protocolos experimentales que producen una mejoría moderada de la cognición numérica (Karolis et al., 2019; Pasqualotto, 2016), otros que producen un empeoramiento (Schroeder et al., 2017a), y otros que no muestran un efecto significativo de la estimulación transcraneal prefrontal y/o parietal en la cognición numérica (Bieck et al., 2018; Clemens et al., 2013)¹⁴. El metaanálisis muestra que no hay evidencia suficiente acerca del efecto de la estimulación eléctrica sobre las capacidades aritméticas. Los protocolos tDCS anódica, tDCS catódica y tRNS muestran un efecto global no significativo de la estimulación sobre la capacidad de cálculo. Mientras que los protocolos tDCS bilaterales sí muestran un efecto mejorador significativo sobre las habilidades aritméticas. Sin embargo, este resultado del metaanálisis debe ser tomado con precaución, ya que los mismos estudios que muestran una mejoría significativa de la capacidad de cálculo con la estimulación reportan simultáneamente un empeoramiento de otros dominios cognitivos.

A este respecto, es importante señalar que la revisión sistemática ha servido para evidenciar que los efectos de la estimulación sobre la cognición numérica dependen de varios factores. Así, por ejemplo, hay investigaciones que muestran cómo un mismo protocolo de estimulación puede tener efectos contrarios según las características de los participantes, tales como su lateralización (Kasahara et al., 2013), sus niveles de ansiedad (Sarkar et al., 2014) o su edad (Cappelletti et al., 2015). Y además, hay experimentos que prueban que la estimulación sobre una región puede generar simultáneamente una mejora en una función cognitiva de dominio específico (por ejemplo, la cognición numérica) y un empeoramiento de una función de dominio general (como las funciones ejecutivas), tal es el caso del estudio de A. Sarkar et al. (2014) en el que la tDCS sobre la DLPFC bilateral (ánodo-izquierda, cátodo-derecha) mejoraba las habilidades aritméticas, pero al

¹⁴ Recordamos aquí que uno de los criterios de exclusión de la revisión sistemática eran los estudios referidos a población infantil y a sujetos con patologías o trastornos. Por lo tanto, las conclusiones de la revisión se refieren exclusivamente a la población de adultos sanos.

mismo tiempo empeoraba la habilidad de control inhibitorio (medida con la tarea de flancos).

Es decir, los efectos de las NIBS sobre la cognición numérica en sujetos sanos dependen de factores tanto *inter-* como *intra-*individuales (García-Sanz, et al., 2022a). Este hallazgo es consistente con lo encontrado en multitud de estudios en el ámbito de la neurociencia cognitiva. Así, los efectos de la estimulación transcraneal sobre los procesos cognitivos, motores y perceptuales dependen de factores *intra-individuales* (Gießing et al., 2020), tales como las variables antropométricas sexo (Pitcher et al., 2003; Turco et al., 2021) y edad (Müller-Dahlhaus et al., 2008), y determinados factores genéticos (Cheeran et al., 2008; Li Voti et al., 2011; Mori et al., 2011). Asimismo, los efectos moduladores de la estimulación transcraneal dependen de variables *inter-individuales* relacionadas con los parámetros de estimulación como la frecuencia, duración o intensidad (Parkin et al., 2015), y con la organización de las redes corticales (Cárdenas-Morales et al., 2014; Nettekoven et al., 2015). Además, esta revisión ha puesto de relieve la dependencia de los efectos de la estimulación con respecto al estado inicial de actividad neural, previo a la estimulación (Cohen Kadosh, et al., 2010; Renzi et al., 2011), tal y como muestran de forma convergente los estudios en el ámbito cognitivo. De hecho, esta dependencia con respecto al estado inicial se debe a que “cualquier actividad neuronal inducida ocurre en el contexto de la actividad neuronal de base” (Silvanto y Pascual-Leone, 2008, p. 2). Por lo tanto, los efectos de la neuromodulación pueden ser cualitativamente modulados por medio de la manipulación del estado de activación previo a la estimulación (Silvanto et al., 2008; Silvanto y Cattaneo, 2017), por ejemplo mediante la adaptación. Es lo que se conoce como paradigmas de estimulación basados en el estado de dependencia (ver García-Sanz et al., 2022a, epígrafe 3.3).

Esta revisión sistemática indica que el posible uso de las NIBS como mejorador de la cognición numérica: en primer lugar, debe ser confirmado por posteriores estudios, ya que la evidencia acumulada hasta la actualidad no es consistente. Y en segundo lugar, que el posible uso debe tener en cuenta los factores inter-e intra-individuales que determinan la dirección (facilitador o inhibidor) y la magnitud de los efectos de la estimulación.

El metaanálisis, el cual se refiere sólo a los efectos de la neuromodulación en el cálculo muestra que no hay evidencias suficientes para concluir que la estimulación eléctrica genera mejora en las habilidades aritméticas.

5.2. Estudio 2: La capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial a lo largo del desarrollo

El objetivo principal de este estudio era analizar la capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial en niños de 7 años, en niños de 12 años, y en adultos jóvenes, evaluando estas capacidades por medio de seis tareas de comparación de magnitudes: dos tareas numéricas, dos tareas espaciales con figuras regulares y dos tareas espaciales con formas amorfas. De las seis tareas, tres de ellas eran comparaciones de la misma magnitud (procesamiento de magnitudes) y tres de ellas eran tareas mixtas (integración de magnitudes).

A continuación se abordará en primer lugar, la presentación de los resultados poniéndolos en relación con las hipótesis previas; en segundo lugar, discutiremos la novedad de nuestro estudio dentro de los paradigmas de cognición numérica y, finalmente, trataremos de interpretar y discutir cada uno de los hallazgos.

Los resultados de la investigación muestran que se cumplen todas las hipótesis formuladas previamente (Epígrafe 2.2.):

- Existen diferencias en el rendimiento en las diversas tareas de comparación dentro de los 3 grupos de edad, y entre los grupos de edad. Además, las diferencias entre tareas dentro de los grupos siguen el mismo patrón: las tareas más fáciles en los tres rangos de edad (% aciertos superiores) son la tarea de comparación numérica no-simbólica y las tareas de comparación continuas y discretas con figuras regulares, mientras que las tareas más difíciles (% aciertos inferiores, en los tres grupos) son las tareas de comparación numérica mixta y las tareas de comparación de áreas continuas y discretas con formas irregulares. Por otro lado, la comparación entre grupos de edad muestra que hay diferencias significativas para el conjunto de tareas, así como para cada tarea particular, entre el grupo de adultos (rendimientos superiores) y los dos grupos de niños (rendimientos inferiores). Sin embargo, no hay diferencias significativas entre los niños de 7 y los de 12 años en ninguna de las tareas salvo en la comparación de áreas regulares continuas. Estos hallazgos serán discutidos en detalle más adelante.
- Las tareas de comparación de áreas con figuras regulares o con figuras irregulares presentan diferentes rendimientos dentro de los tres rangos de edad, siendo más difíciles las tareas irregulares que las regulares. Las tareas de comparación numérica

también difieren de las espaciales, dentro de los tres grupos de edad, con rendimientos superiores a los de las áreas irregulares, pero inferiores a las regulares. Además, entre grupos se cumple que los adultos se desempeñan significativamente mejor que los dos grupos de niños (7 y 12 años) en las tres magnitudes (espacial regular, espacial irregular, y numérica), mientras que no hay diferencias significativas de los dos grupos de niños entre sí.

- Las tareas de comparación uni-formato (procesamiento de magnitudes) y las tareas de comparación mixtas (integración de magnitudes) presentan rendimientos diferentes dentro de los tres grupos de edad, siendo más difíciles (% de aciertos inferiores) las tareas mixtas, que las uni-formato. Entre grupos, se cumple que los adultos se desempeñan significativamente mejor que los dos grupos de niños (7 y 12 años) en los dos tipos de tarea (uni-formato y mixtas), mientras que el desempeño de los dos grupos de niños en las tareas mixtas es idéntico.

Por otro lado, es importante señalar que nuestro estudio es el primero, al menos teniendo en cuenta la bibliografía consultada, en analizar la capacidad para integrar magnitudes utilizando tareas de comparación que combinen áreas continuas y discretas, tanto con formas regulares como irregulares. Existen estudios previos que usan tareas de comparación numérica mixta en niños, por ejemplo (Lyons et al., 2018). También existen estudios que utilizan tareas de comparación de áreas continuas, es decir dos áreas individuales (EA) con formas regulares (por ejemplo, Leibovich y Henik, 2014) o con formas irregulares (por ejemplo, Odic, 2018). Asimismo, hay estudios que utilizan tareas de comparación de áreas discretas que implican la estimación del CA de un conjunto (por ejemplo, Lourenco et al., 2012; Yousif y Keil, 2019). Sin embargo, no hay estudios que utilicen tareas de comparación de un área continua (EA) frente al área acumulada de un conjunto de áreas discretas (CA). Este tipo de paradigmas pueden servir para evaluar la capacidad de integrar la información cuantitativa numérica (número de áreas discretas) con la información cuantitativa espacial (tamaño de las áreas). Nuestro estudio ha mostrado que la capacidad para comparar la estimación de un área individual (EA) con la estimación del área acumulada por un conjunto (CA) es una habilidad que varía con la edad, sin embargo, la interpretación de nuestros resultados no puede ser comparada directamente con otros estudios que usan paradigmas similares, pero no equivalentes, ya que, de las seis tareas utilizadas en nuestro estudio, cuatro de ellas han sido utilizadas con

anterioridad, mientras que las dos tareas de áreas mixtas son nuevas. En cualquier caso, teniendo en cuenta la importancia del procesamiento numérico y el procesamiento espacial como predictores tempranos del futuro desempeño matemático (Atit et al., 2021; Devlin et al., 2022); se podría pensar que la habilidad para integrar la información numérica y la espacial (evaluada mediante nuestras tareas novedosas) podría ser también utilizada en futuros estudios longitudinales como un posible marcador del desarrollo matemático.

En cuanto a la discusión e interpretación de los hallazgos de la investigación, el primer hallazgo relevante es la ausencia de diferencias significativas entre los niños de 7 años y los niños de 12 años en cinco de las seis tareas evaluadas. Este hallazgo contradice lo encontrado por otros autores, como D. Odic (2018) quien evaluó el procesamiento numérico y el espacial en niños de 3, 5, 7, 9 y 11 años mediante tareas de comparación numérica no-simbólica, tareas de comparación de áreas irregulares continuas, tareas de comparación de longitudes lineales, y tareas de comparación de densidades. Y en todas ellas encontró un aumento progresivo de las tasas de acierto hasta los 11 años y luego una estabilización. Según esto, en nuestro caso deberíamos haber encontrado diferencias significativas entre los 7 y los 12 años, al menos en las tareas equivalentes a las usadas por D. Odic. En este sentido, nuestros resultados pueden interpretarse de varias formas: puede tratarse de un hallazgo fortuito (¿una limitación?) achacable al reducido tamaño de la muestra ($N=37$ en el grupo de 7 años, y $N=42$ en el grupo de 12 años), que haya generado una posible falta de homogeneidad en los grupos a pesar de haberse aplicado idénticos criterios de inclusión. Es decir, que el grupo de 12 años tuviera habilidades comparativamente inferiores a lo correspondiente para su edad, por un sesgo del muestreo. Sin embargo, también es posible que este hallazgo no se deba a las limitaciones del estudio, sino que sea indicativo de los procesos de desarrollo cognitivo entendidos desde una perspectiva neopiagetiana. Según J. Piaget, los niños de 7 años y los niños de 12 años pertenecen ambos a la misma etapa del desarrollo cognitivo, denominada etapa de las operaciones concretas, y por tanto presentan similares habilidades numéricas (Piaget, 1969; Piaget y Szeminska, 1941). De hecho, según este enfoque, entre los 6 y los 7 años ocurre un hito importante en el desarrollo de la cognición numérica que consiste en la abstracción de la información numérica con independencia del procesamiento de otras magnitudes (Papalia et al., 2012; Richmond, 1970). Utilizando el paradigma de la tarea de conservación (Figura 24, parte A, del capítulo Introducción) J. Piaget observó

que los niños antes de los 6 años tienden a creer que al separar entre sí los objetos de una fila, el número de objetos aumenta ya que ocupan mayor espacio, y que a partir de los 7 años el niño desarrolla el concepto de número y logra reconocer que el número de objetos no cambia aunque ocupen más espacio (Piaget y Szeminska, 1941). Más allá de este ejemplo concreto, la perspectiva piagetiana señala un cambio cualitativo en la cognición numérica a partir de los 6-7 años que podría ser coherente con el hecho evidenciado en nuestro estudio de que entre los 7 y los 12 años no hay diferencias en cuanto a las habilidades numéricas, pues el salto cualitativo ya se ha dado y estaríamos en una fase “meseta”. En esta línea, estudios posteriores dentro del ámbito neopiagetiano reconocen que el sentido numérico se desarrolla mucho antes de lo previsto por J. Piaget (incluso en infantes: Starkey y Cooper, 1980; Wynn, 1992)¹⁵, pero aun así señalan un cambio cualitativo en la cognición numérica en torno a los 6-7 años debido al desarrollo de las funciones ejecutivas, las cuales permiten al niño inhibir la información magnitudinal irrelevante y centrarse en la información específicamente numérica (Houdé y Guichart, 2001; Viarouge et al., 2018). De hecho, han probado mediante técnicas conductuales y estudios de neuroimagen que este cambio cualitativo entre los 5-6 años y los 7-8 años ocurre a nivel de control inhibitorio, y de orientación atencional, implicando una red frontoparietal bilateral (Houdé et al., 2011; Viarouge et al., 2019). Ello confirmaría la posibilidad de una cierta estabilidad en la cognición numérica después del salto ocurrido poco antes de los 7 años y hasta el inicio de la adolescencia. Por otro lado, nuestro estudio ha mostrado diferencias significativas entre el grupo de adultos y los dos grupos de niños, en el conjunto de las tareas así como en las agrupaciones de tareas. Este hallazgo era esperable ya que es coherente con lo reportado de forma generalizada en los estudios de cognición numérica (por ejemplo: Bonny y Lourenco, 2015; Odic et al., 2013).

Otro hallazgo importante de nuestro estudio es el hecho de que en los tres grupos de edad hay diferencias significativas entre las tareas de estimación numéricas, las tareas de estimación de áreas con figuras regulares y las tareas de estimación de áreas con figuras irregulares. De acuerdo con J.F. Cantlon (2009) y T. Leibovich y A. Henik (2014) el procesamiento de magnitudes distintas impone diferentes demandas computacionales, lo

¹⁵ Es importante recordar que la principal crítica a la teoría piagetiana de la comprensión del número, lo constituyen las numerosas evidencias acerca del sentido numérico en niños desde temprana edad. Y también es crucial resaltar que los neopiagetianos son muy críticos con su predecesor en este punto. De hecho, justifican el fenómeno conductual evidenciado con las tareas de conservación en torno a los 7 años, no basándose en la abstracción del número como decía Piaget, sino en un cambio a nivel de atención y de control inhibitorio.

cual se manifiesta en diferencias en las variables conductuales de rendimiento. En este sentido, nuestros hallazgos sugerirían que el procesamiento numérico y el procesamiento espacial implican sistemas cognitivos diversos, y que la estimación de áreas con formas regulares requiere demandas cognitivas diferentes a las estimaciones de áreas con formas irregulares. Muchos estudios han descrito diferencias en los marcadores conductuales del procesamiento numérico y el procesamiento espacial de forma consistente a lo largo de la niñez (por ejemplo: Odic et al., 2012 y Odic, 2018, encuentran diferentes tasas de aciertos y distintas fracciones de Weber para tareas de comparación numérica y tareas de comparación de áreas individuales (EA) en niños de 3 años, así como en niños de 5, 7, 9 años, y en adultos); este mismo efecto reportaron S. Lourenco y J.W. Bonny (2016) quienes utilizaron tareas de comparación numérica y tareas de estimación de áreas acumuladas (CA) tanto en niños de 5 como en niños de 6 años. Por su parte, T. Leibovich y A. Henik (2014) encontraron en adultos diferentes tasas de aciertos y distintos umbrales de discriminación para tareas de comparación numérica y las tareas de estimación de áreas individuales¹⁶. Estos últimos autores proponen un modelo explicativo para estos hallazgos (Figura 61) que se basa en una subdivisión del MPS en dos sistemas, uno dedicado al procesamiento de magnitudes discretas y otro dedicado al procesamiento de magnitudes continuas (como el área). De tal forma que el sistema de procesamiento de magnitudes continuas (área) sería más eficiente, y más antiguo evolutivamente que el sistema de magnitudes discretas (número) (Cantlon et al., 2009; Henik et al., 2012; Leibovich y Henik, 2013). Tanto este modelo, como las evidencias recién mencionadas dan cuenta de dos sistemas (o subsistemas) cognitivos relacionados: uno para el procesamiento espacial y otro para el numérico, caracterizados por diferentes desempeños en las tareas de estimación de áreas y las tareas de estimación numérica, respectivamente. Sin embargo, estos estudios difieren en la dirección de estas diferencias. Así, T. Leibovich y A. Henik (2014), y D. Odic et al. (2013, 2018) reportan mejores precisiones en la estimación de áreas que en las numéricas, en todos los rangos de edad; mientras que S.F. Lourenco et al. (2012) y S. Savelkouls y S. Cordes (2020) reportan lo contrario, mejores precisiones en las tareas de comparación numéricas que en las de áreas. En nuestro caso la precisión en las tareas numéricas (en niños de 7 años, de 12 años, y en adultos) es superior a la precisión en las tareas de estimación de áreas irregulares (figuras amorfas),

¹⁶ Es importante señalar que en todos estos estudios se usaron las mismas ratios (indicativas del nivel de dificultad) en las tareas numéricas y en las tareas espaciales.

pero inferior a la estimación de áreas regulares (figuras geométricas), lo cual sugiere estrategias diferentes para la estimación de áreas según la forma que tengan las figuras.

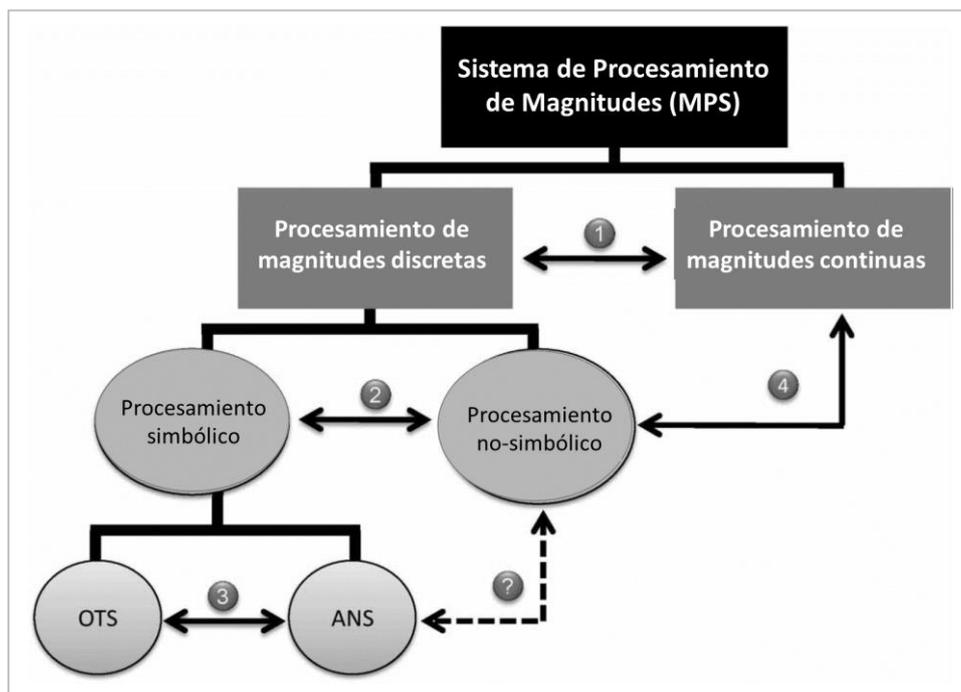


Figura 61. Modelo del Doble Sistema para el procesamiento de magnitudes: un sistema dedicado a las cantidades continuas, y otro a las discretas. El sistema de procesamiento discreto se subdivide a su vez, en un sistema simbólico (dependiente de la cultura) y un sistema no simbólico (analógico). Las flechas 1,2,3,4 indican interacciones mutuas entre los sistemas probadas en la literatura, mientras que las flechas incompletas indican interacciones probables. OTS: Sistema visual de Seguimiento de objetos; ANS: Sistema Numérico Aproximado. Adaptado de Leibovich y Henik (2014)

Nuestro estudio es el único que compara dentro del mismo experimento las precisiones en la estimación de áreas con figuras regulares y con figuras irregulares (usando las mismas ratios y los mismos tamaños para ambas tareas), y aporta evidencias contundentes de que la forma de los estímulos espaciales influye en el rendimiento en las tareas de comparación y, por tanto, debe ser tomada en cuenta a la hora de evaluar el procesamiento espacial.

Por otro lado, nuestros hallazgos se pueden poner en relación con los tres modelos teóricos acerca de la estimación de áreas, descritos en el capítulo introductorio: el modelo de la percepción directa (Savelkouls y Cordes, 2020), el modelo de computación (Barth, 2008) y el modelo de la heurística del área aditiva (Yousif y Keil, 2019). El modelo de la

percepción directa presupone que la estimación de áreas depende de procesos que ocurren directamente a nivel perceptual. Según este modelo, se puede formular la predicción de que la estimación de áreas individuales (EA) y la estimación del área acumulada por un conjunto de elementos (CA) se realizarían con un nivel de precisión similar, ya que ambas estimaciones se basan en la percepción directa del área o superficie, y por tanto el procesamiento de varias áreas no supondría una demanda cognitiva superior al procesamiento de un área sola. Si en nuestro estudio consideramos sólo las áreas regulares (comparaciones con cuadrados y rectángulos), nuestros resultados podrían ser compatibles con este modelo, ya que en ninguno de los tres grupos de edad hay diferencias significativas entre el rendimiento en las tareas de comparación de las áreas continuas (EA) y las áreas discretas (CA). De hecho, para el conjunto de la muestra, la tasa de aciertos de la comparación de áreas continuas regulares es del 78,53 %, y la de las áreas discretas regulares es del 78,15% (diferencia 0,38; $p = 1,000$). Si tenemos en cuenta sólo las áreas irregulares (figuras amorfas), tampoco hay diferencias en ningún rango de edad entre las tareas continuas y las discretas, presentando unos promedios para la muestra total del 62,17 % y el 61,46% (diferencia 0,71; $p = 1,000$). Sin embargo, si consideramos ambos resultados en conjunto, es decir, si tenemos en cuenta que los rendimientos en el conjunto de las tareas con áreas regulares (78,34 %) y las tareas con áreas irregulares (61,82 %) difieren significativamente entre sí (diferencia 16,52, $p < 0,001$), en ese caso no se puede aceptar el modelo de la percepción directa, ya que en las figuras regulares y en las irregulares, el área (en cm o en número de píxeles) es el mismo, sólo cambia la forma; y por tanto no habría diferencias a nivel perceptual en la estimación de las áreas con una forma regular o irregular, según el modelo de la percepción directa. Es decir, el hecho de haber evaluado en el mismo experimento las tareas con formas regulares y con figuras irregulares nos permite rechazar el modelo de la percepción directa, ya que según éste la estimación del área acumulada sería la misma en ambos casos, con independencia de la forma.

Por otro lado, el modelo de computación (Barth, 2008) presupone que la estimación del área acumulada por un conjunto de figuras se realiza a partir de la representación mental de cada una de las áreas individuales y luego se suman las representaciones mentales de todas las áreas. Las predicciones de este modelo tienen en cuenta que la suma mental no es un proceso completamente silencioso, sino que con cada elemento que se añade, se incorpora ruido a la representación (Cordes et al., 2007; McCrink et al., 2007), y por tanto

la estimación del área acumulada (CA) tendría un coste cognitivo frente a la estimación de un área individual (EA). Nuestros resultados no son compatibles con este modelo, ya que en ningún grupo de edad hay diferencias significativas entre el procesamiento de áreas continuas (EA) y discretas (CA). Es decir, nuestros resultados no muestran un coste cognitivo para el procesamiento de varias áreas frente al procesamiento de un área sola.

Finalmente, el modelo del área aditiva heurística presupone que las estimaciones del área no se apoyan en el área real, sino en una aproximación heurística basada en dimensiones lineales como el ancho y el largo de las figuras. Este modelo sí podría dar cuenta de nuestros resultados, ya que predice estimaciones diferentes según la forma de las figuras. Así, por ejemplo, según este modelo, el área acumulada de varios círculos o el área acumulada de varios rectángulos, que tengan idéntica área total real (en cm^2 o en píxeles) conducirían a áreas estimadas (heurísticas) diferentes. El área acumulada de los círculos se estimaría mediante una heurística aditiva que consiste en la suma de los diámetros (Yousif y Keil, 2019); mientras que el área acumulada de los rectángulos se estima de forma heurística como la suma de los anchos y los largos (Yousif et al., 2020). De esta manera, aunque las áreas acumuladas reales son las mismas, las estimaciones son diferentes para los círculos que para los rectángulos. Este modelo, por lo tanto, es el único que sería coherente con nuestro hallazgo de que la forma de la figura influye en la estimación de área acumulada. Sin embargo, este modelo no tiene una predicción específica del área heurística para las figuras amorfas; por lo tanto, en principio nuestros resultados podrían hipotéticamente ser compatibles con el modelo, pero no se puede hacer la comprobación matemática de si nuestros datos se ajustan o no al modelo, ya que éste no tiene predicciones concretas para las formas irregulares que hemos utilizado. Por tanto, podemos concluir que la hipótesis de que las estimaciones de áreas acumuladas se basan en una aproximación heurística más que en el área real, parecería una hipótesis plausible, ya que según este modelo las estimaciones de áreas dependen de la forma del estímulo utilizado.¹⁷ Apéndice 14

En último lugar analizaremos los hallazgos referentes a las diferencias en el rendimiento en las tareas uni-formato (procesamiento de magnitudes) y las tareas mixtas (integración de magnitudes). En las tareas uni-formato se comparan magnitudes del mismo tipo, por

¹⁷ No obstante, a nivel personal la autora de esta tesis considera ciertas limitaciones en cuanto a las predicciones concretas que proponen Yousif y colaboradores. Estas objeciones se exponen en el [Apéndice 14](#) por ser objeciones que requieren de un desarrollo matemático teórico que excede el alcance de esta investigación.

ejemplo dos numerosidades no simbólicas, dos áreas continuas regulares o dos áreas continuas irregulares. Dentro de los tres grupos de edad hay diferencias significativas entre el conjunto de tareas uni-formato (procesamiento de magnitudes) y el conjunto de tareas mixtas (integración de magnitudes). Mientras que la comparación entre grupos muestra que los rendimientos en las tareas uni-formato progresan del 66,20 % en los niños de 7 años, al 69,77% en los niños de 12 años, y al 80,97% en los adultos. Por su parte, las tareas mixtas implican comparar cantidades correspondientes a diferentes formatos, por ejemplo, una numerosidad simbólica y una no simbólica; un área continua regular frente a varias áreas discretas regulares; o un área continua irregular frente a varias áreas discretas irregulares. En este caso, los rendimientos para el conjunto de tareas mixtas son del 62,20 % en los niños de 7 años, el 62,99 % en los niños de 12 años (diferencia 0,79; $p = 1,000$), mientras que en adultos el rendimiento es de 75,11 % de aciertos. Estas tareas mixtas requieren el procesamiento de cantidades en diferentes formatos, e implican también procesos de integración entre esos formatos, para poder compararlos entre sí, lo cual se traduce en demandas cognitivas superiores para las tareas mixtas que para las uni-formato, y eso ocurre en todos los grupos de edad. Como es esperable, en todos los rangos de edad se cumple que las tareas uni-formato son significativamente más fáciles que las tareas mixtas.

Sin embargo, nos parece muy significativo el hallazgo de que el rendimiento en el conjunto de tareas mixtas sea idéntico en los niños de 7 años y los niños de 12 años, como si a nivel de integración tuvieran las mismas habilidades; o como si esta capacidad de integrar no se desarrollara hasta la adolescencia, y por eso sólo los adultos tienen rendimientos significativamente superiores. Si lo comparamos con la cierta gradualidad que se observa en el procesamiento de magnitudes (tareas uni-formato)¹⁸, parecería que el procesamiento se va perfeccionando con la edad, mientras que la integración presenta un salto cualitativo después de los 12 años y antes de entrar en la adultez (es decir, durante la adolescencia).

¹⁸ En las tareas uni-formato encontramos valores diferentes para los tres grupos de edad, aunque no todas las diferencias son significativas. Esto puede deberse a que los rendimientos en esas tareas son muy bajos (del orden del 60-65%) y esos rangos no son idóneos para detectar diferencias individuales, en tareas que tienen sólo dos posibles respuestas, ya que se considera que estas tasas de acierto están muy cercanas a la respuesta aleatoria, la cual se correspondería con una tasa de aciertos del 50% (Leibovich y Henik, 2014). En nuestro caso no fue posible manipular esto, ya que se usaron las mismas ratios en todas las tareas y eso condujo a tasas de acierto muy dispares en las distintas tareas.

En relación con esto, S. Lourenco y M.R. Longo (2011) proponen dos posibles modelos explicativos de las trayectorias de desarrollo del procesamiento general de magnitudes: el modelo de la diferenciación y el modelo de la integración. En el primer caso se considera que al inicio de la vida poseemos un sistema indiferenciado de representación de magnitudes, que con el desarrollo se va especializando en cada una de las magnitudes o formatos mediante representaciones diferentes. Este modelo se basa en la teoría de la magnitud ATOM (Walsh, 2003). Por otro lado, el modelo de la integración propone que el MPS surge en el curso del desarrollo gracias a la exposición a un ambiente físico donde las magnitudes correlacionan entre sí, de tal manera que aprendemos del ambiente a integrar magnitudes relacionadas (Lourenco y Longo, 2011).

Cada uno de estos modelos tiene predicciones diferentes acerca de la trayectoria evolutiva de la representación de magnitudes. Según el modelo diferenciador, la transferencia entre unas magnitudes y otras ocurriría sobre todo en las fases iniciales del desarrollo, es decir en los primeros años de vida (Mix, Huttenlocher y Levine, 2002). Mientras que el modelo de integración predice que la transferencia entre unas magnitudes y otras se logra de forma precisa en fases más avanzadas del desarrollo. Cada una de estas visiones se relaciona con un enfoque del aprendizaje perceptual (Gibson, 1963, 1955): el aprendizaje entendido como diferenciación (a partir de una representación inicial monolítica) y el aprendizaje entendido como *enriquecimiento* (las dimensiones inicialmente dispares se integran cada vez más). A este respecto, desde un punto de vista neural existen evidencias tanto de la especialización de grupos neuronales o estructuras específicas para el procesamiento de las diversas magnitudes (Cohen Kadosh et al., 2005); y también hay evidencias de circuitos y estructuras neurales que se comparten para procesar distintas magnitudes (Johnson, 2001).

Nuestros resultados parecerían compatibles con el modelo de diferenciación en etapas tempranas, y con el modelo de integración en etapas tardías. Es decir, serían compatibles con la hipótesis de un modelo de diferenciación que tuviera lugar al inicio del desarrollo (entre la infancia y la niñez) y un modelo de integración que operara en las fases finales (en la adolescencia). De tal manera que a los 7 años ya hay una diferenciación en el procesamiento de las magnitudes, pero la integración intencional de diversos formatos en función de la exigencia de la tarea no se desarrollaría sino hasta después de la adolescencia.

De hecho, nuestros resultados muestran un procesamiento diferenciado de magnitudes ya evidente a los 7 años (en este grupo de edad hay diferencias significativas entre las tareas espaciales y las numéricas), este procesamiento diferenciado seguiría presente en niños de 12 años y en adultos (en estos rangos de edad, también hay diferencias en el rendimiento de las distintas magnitudes). Además, este procesamiento diferenciado se perfeccionaría a lo largo del desarrollo, como muestran las tasas de acierto crecientes con la edad, en el conjunto de tareas uni-formato (procesamiento de magnitudes) a lo largo de los tres grupos de edad.

Por otro lado, nuestros resultados muestran que la capacidad para integrar intencionalmente diversos formatos, evaluada por medio de las tareas mixtas, presenta idénticos rendimientos a los 7 y a los 12 años (tasas de acierto 62,20% y 62,99%, respectivamente), mientras que el salto cualitativo en esta capacidad para integrar se da después de la adolescencia (tasa de acierto en adultos 75,11%).

En conclusión, nuestros resultados son compatibles con un modelo de desarrollo del procesamiento de magnitudes basado en la diferenciación, que opere en las primeras fases del desarrollo, es decir desde la infancia a la niñez; y son asimismo compatibles con un modelo de desarrollo basado en la integración, que tenga lugar en fases más tardías, en la adolescencia. Esta suposición es coherente con los hallazgos previos que muestran un sistema de procesamiento de magnitudes indiferenciado en bebés (por ejemplo: Brannon et al., 2006; VanMarle y Wynn, 2006; Xu y Spelke, 2000) y un sistema de procesamiento ya especializado para las distintas magnitudes en la niñez (con marcadores conductuales claramente diferenciados para magnitudes espaciales y numéricas, Lourenco y Bonny, 2017; Odic, 2018; Odic et al., 2013). Mientras que la capacidad para resolver tareas que exijan la integración intencional de magnitudes, se desarrollaría más tarde, en la adolescencia, por medio de procesos cognitivos de orden superior que requieren la maduración de la corteza prefrontal. A este respecto, los estudios de S. Blakemore, (2012;) E.R. Sowell et al., (2003); A.W. Toga et al., (2006) muestran de forma convergente que la maduración de la corteza parietal estaría bastante avanzada durante la niñez, mientras que los procesos madurativos de la corteza prefrontal son más tardíos y llegan hasta la adolescencia (Figura 62, Gogtay et al., 2004)¹⁹. La figura muestra cómo

¹⁹ Este estudio utiliza como marcador de maduración cerebral el volumen de sustancia gris; sin embargo, en el ámbito del neurodesarrollo también se han utilizado otros indicadores de maduración cerebral como la densidad sináptica (como los estudios post-mortem de Huttenlocher y Dabholkar, 1997), el aumento de

las regiones prefrontales: DLPFC y VLPFC (regiones marcadas como D y E en la figura) culminan su maduración en la adolescencia; mientras que las regiones parietales como el AG y el SMG (I y J en la figura) ya tienen al final de la niñez niveles de sustancia gris similares a los de los adultos. Esta evidencia del neurodesarrollo justificaría porqué el procesamiento de magnitudes (dependiente del lóbulo parietal) estaría ya desarrollado al final de la niñez, mientras que la integración de magnitudes (dependiente de redes fronto-parietales) no se lograría hasta la adolescencia.

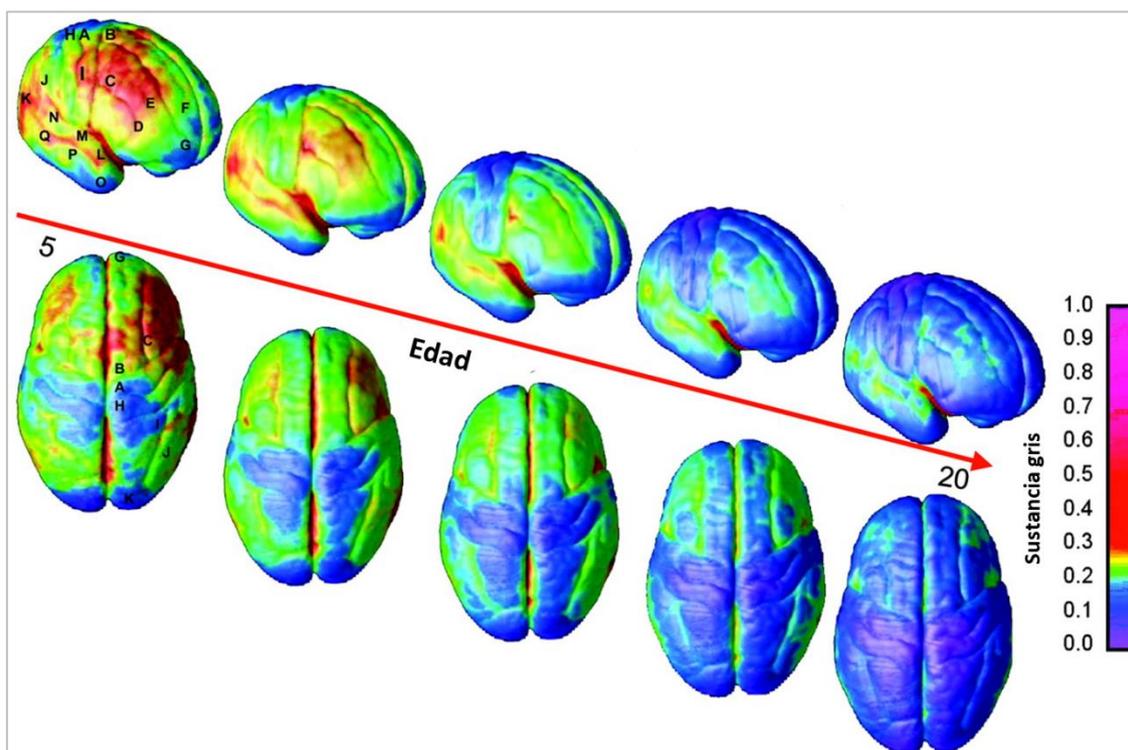


Figura 62. *Secuencia dinámica de la maduración cortical a lo largo del desarrollo, utilizando como indicador el volumen de sustancia gris. Vista lateral derecha y vista superior. Las letras indican las zonas donde los autores midieron en el volumen de materia gris, A: corteza motora primaria; B: SFG; C: IFG; D: VLPFC; E: DLPFC; F: límite anterior del SFG; G: polo frontal; H: corteza somatosensorial; I: SMG; J: AG; K: polo occipital; L-N: Adaptado de Gogtay (2004)*

En conclusión, las evidencias del neurodesarrollo serían compatibles con nuestra propuesta de una evolución del procesamiento de magnitudes basada en el modelo de

la mielinización (Thompson y Nelson, 2001) y los cambios en la proporción de sustancia gris-sustancia blanca (estudios in vivo, por IRM estructural, Giedd et al., 1999).

diferenciación al inicio del desarrollo, y basada en el modelo de integración en etapas tardías. Sin embargo, para confirmar esta hipótesis nuestros resultados son claramente insuficientes. Se requieren estudios cognitivo-conductuales que aborden el procesamiento y la integración de magnitudes con tamaños de muestra superiores, así como estudios longitudinales que analicen estas habilidades a lo largo del desarrollo utilizando los mismos sujetos experimentales, y no usando grupos diferentes (como en nuestro estudio de tipo transversal). Asimismo, consideramos que se lograría una mayor sensibilidad en evaluación de la capacidad para procesar e integrar magnitudes, si los estímulos usados en las tareas de comparación de magnitudes se ajustan a ratios que conlleven tasas de aciertos entre el 70% y el 90% (aproximadamente), ya que estos rangos son más idóneos para detectar diferencias individuales, debido a que se alejan del rango de respuesta aleatoria (considerado del 50% en tareas con sólo dos opciones de respuesta), y también distan del techo de la habilidad cognitiva (considerado del 100% de respuestas correctas).²⁰

Finalmente, señalamos otra limitación de nuestro estudio, debido a las restricciones ocasionadas por la pandemia COVID-19 tuvimos un acceso restringido a las instituciones educativas. Por este motivo con cada participante se aplicaron todas las tareas de comparación de magnitudes en una única sesión, con dos breves descansos. En estudios posteriores sería preferible evaluarlas en sesiones diferentes para evitar posibles efectos derivados del cansancio. Asimismo, por tratarse de un estudio exploratorio (que incluye dos tareas novedosas, que no han sido usadas previamente) decidimos aplicar todas las tareas en el mismo orden, con la idea de poder comparar todos los participantes en las mismas condiciones. Sin embargo, para estudios posteriores, consideramos que quizá sería preferible aleatorizar o contrabalancear el orden de las tareas entre participantes.

²⁰ Esta argumentación está presente en Carlson (2005), quien propuso una serie de medidas sensibles para evaluar las funciones ejecutivas en preescolares mediante el uso de tareas.

5.3. Estudio 3: Efectos de la neuromodulación frontal y parietal sobre el procesamiento y la integración numérico-espacial

El objetivo principal de este estudio era analizar los efectos de la neuromodulación de la corteza prefrontal derecha y la corteza parietal derecha, mediante estimulación eléctrica transcraneal excitatoria (anódica), sobre la capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial, en adultos sanos.

Los resultados de nuestro estudio muestran que la estimulación de la corteza prefrontal derecha mediante una única sesión de tDCS multifocal anódica de 20 minutos con una intensidad de 2mA, genera efectos neuromodulatorios sobre la DLPFC derecha, los cuales se traducen en una mejora moderada de la capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial, evaluadas de forma simultánea a la estimulación; esta mejora se manifiesta en una disminución generalizada de los tiempos de respuestas en tareas de comparación de magnitudes²¹, comparado con la estimulación placebo y con la estimulación parietal.

Este efecto indica que, durante la ejecución de las tareas de comparación numérico-espaciales, la actividad neuronal de la DLPFC derecha se ve afectada por la estimulación eléctrica anódica, la cual implica un aumento de la excitabilidad celular en esta zona, que se traduce en un aumento de la velocidad de respuesta en dichas tareas. Sin embargo, con los datos de que disponemos, no se puede concluir si el aumento de la velocidad en las respuestas se debe a un aumento de la velocidad en el procesamiento numérico-espacial, a un aumento en la velocidad de integración o a un aumento en la velocidad con que se coordina y efectúa la respuesta motora (pulsar la tecla correcta).

En este orden de ideas, nuestros resultados muestran que no hay una interacción significativa entre el tipo de estimulación (prefrontal, parietal o *sham*) y el rendimiento en cada una de las tareas de comparación de magnitudes, bien sea consideradas individualmente o agrupadas según la magnitud (numérica, espacial regular, espacial irregular) o agrupadas según el tipo de tarea (uni-formato o mixtas). Lo cual significa que la estimulación no afecta de forma diferencial al rendimiento de unas tareas más que a otras. Por lo tanto, el efecto significativo encontrado para la neuromodulación de la

²¹ Es importante señalar que, tanto en nuestro estudio como en los otros que hemos mencionado, los tiempos de respuesta se refieren sólo a los tiempos de las respuestas acertadas. Es por ello que una mejora de los TRs se interpreta como una mejora de la función cognitiva evaluada.

corteza prefrontal derecha se interpreta como una mejora generalizada o inespecífica de la velocidad de respuesta para tareas que implican el procesamiento e integración de magnitudes espacio-numéricas. Por el contrario, nuestras hipótesis previas apuntaban hacia una posible disociación o doble disociación del IPS derecho y la DLPFC derecha en el procesamiento y la integración de magnitudes, de forma que la estimulación parietal (IPS derecho) afectara específicamente a las tareas relacionadas con el procesamiento de magnitudes -tareas uni-formato-, y la estimulación prefrontal (DLPFC derecha) a la integración de magnitudes -tareas mixtas-. Sin embargo, nuestros resultados no muestran ninguna disociación, sino más bien un efecto generalizado de la estimulación prefrontal derecha (DLPFC) sobre la velocidad con la que se generan las respuestas a las tareas de comparación de magnitudes, y un efecto nulo o muy bajo de la estimulación parietal derecha (IPS)²².

La revisión sistemática de literatura, realizada en el primer estudio de esta tesis, muestra que se han logrado más disociaciones y dobles disociaciones de determinadas regiones corticales y específicos aspectos de la cognición numérica, usando paradigmas disruptores que paradigmas mejoradores. Y ello puede deberse a que las funciones cognitivas en general dependen de la integridad de redes corticales, más que depender de una región sola. Y las NIBS afectan de forma específica a la región que está bajo el campo electromagnético. De tal manera que es más fácil interrumpir el funcionamiento global de la red cortical (paradigmas disruptores) alterando el funcionamiento de una región, que mejorar el funcionamiento global de la red neuronal aumentando la excitabilidad de sólo una zona (paradigmas mejoradores). En nuestro caso, la intencionalidad del experimento era doble: una finalidad de ciencia básica (indagar la implicación prefrontal y parietal en el procesamiento e integración de magnitudes) y una finalidad aplicada (testar el posible uso de la tDCS como mejorador cognitivo); por este motivo se eligió utilizar un paradigma mejorador como es la tDCS anódica. Para futuras investigaciones, sería interesante analizar el efecto de la estimulación tDCS catódica, la cual disminuye la excitabilidad neuronal, y ver de qué manera esta disrupción del IPS derecho y la DLPFC derecha afecta al procesamiento y la integración de magnitudes numérico-espaciales. Es

²² Una posible limitación de nuestro análisis estadístico se deriva de haber utilizado los ajustes de Bonferroni los cuales son muy conservativos. Con este análisis, las diferencias entre la estimulación parietal y placebo no han sido significativas, a pesar de que en los gráficos se observe una tendencia constante en todos los análisis a mostrar una leve mejoría en parietal respecto a sham. Quizá con otro tipo de análisis como el FDR (*False Discovery Rate*) que tiene unos ajustes para la *p* menos conservadores, estas diferencias hubieran podido resultar significativas.

decir, para abordar una posible disociación o doble disociación (finalidad de ciencia básica) quizá hubiera sido preferible utilizar un paradigma de estimulación disruptor (es decir, estimulación catódica).

Por otro lado, los resultados de nuestro estudio referidos al efecto significativo de la estimulación prefrontal derecha sobre la cognición numérica muestran que se trata de una mejoría discreta de la capacidad para procesar e integrar magnitudes espacio-numéricas. Este resultado está en línea con los hallazgos de J. Mosbacher et al. (2020) y de P.A. Pope et al. (2015) quienes estimularon también la DLPFC mediante tDCS anódica, y encontraron asimismo efectos moderados de la estimulación sobre la cognición numérica. Por su parte, S.M. Bieck et al. (2018) también aplicaron estimulación eléctrica (en este caso, RNS) sobre la corteza parietal y sobre la corteza prefrontal, y encontraron resultados similares a los nuestros: la estimulación prefrontal producía una mejora muy baja de la cognición numérica, y la estimulación parietal no tenía un efecto significativo. El metaanálisis que hicimos también apunta en esta línea, ya que pone de manifiesto que no hay evidencia consistente para afirmar que la estimulación eléctrica puede mejorar la habilidad del cálculo. Lo cual es coherente con la revisión de P.A. Schroeder et al. (2017) quienes concluyen que la estimulación eléctrica transcraneal puede mejorar las habilidades numéricas y de cálculo, al tiempo que advierten de la provisionalidad de las conclusiones debido a la enorme heterogeneidad de los enfoques. Por otro lado, el hecho de que hayamos encontrado un efecto moderado de la estimulación prefrontal sobre el rendimiento en las tareas de comparación de magnitudes, es consistente con el metaanálisis realizado por B. Simonsmeier et al. (2018) quienes mostraron que los efectos mejoradores de la estimulación eléctrica sobre la cognición en general, son más evidentes en el aprendizaje que en el rendimiento en sí. Es decir, la estimulación eléctrica transcraneal tiene más efecto cuando se realiza simultánea al aprendizaje que cuando es simultánea a la evaluación. Estos autores analizaron 246 efectos de la estimulación sobre las habilidades lingüísticas y matemáticas de un total de 885 participantes, diferenciando entre la estimulación aplicada durante la fase de aprendizaje y la estimulación aplicada durante la fase de evaluación, en experimentos realizados entre 2008 y 2016. Los resultados del metaanálisis les permitieron concluir que la estimulación eléctrica es más efectiva en la fase de aprendizaje que en la de evaluación, y por tanto, se puede sostener la hipótesis de que la estimulación eléctrica tiene un efecto mayor sobre los procesos que implican codificación de nueva información -fase de aprendizaje-; que sobre los procesos

que suponen recuperación y uso de información previamente consolidada en la memoria a largo plazo -fase de evaluación- (Simonsmeier et al., 2018). De acuerdo con esto, nuestro estudio se sumaría a esta evidencia preexistente de que la estimulación eléctrica afecta al rendimiento y al aprendizaje de procesos cognitivos, pero presenta un menor potencial mejorador sobre el rendimiento que sobre el aprendizaje; ya que nuestro estudio muestra un efecto moderado sobre el rendimiento en tareas de cognición numérica (procesamiento e integración de magnitudes).

Estos hallazgos son consistentes con el doble efecto fisiológico propuesto para la estimulación eléctrica: un efecto neuromodulador y un efecto neuroplástico. Los efectos neuromoduladores de la estimulación eléctrica se deben a la modificación de los potenciales de membrana que afectan la excitabilidad celular, aumentándola o disminuyéndola (según la polaridad de la estimulación eléctrica), pero sin llegar a generar directamente potenciales de acción; mientras que los efectos neuroplásticos se originan mediante cambios en las conexiones neuronales como los que ocurren en procesos de potenciación a largo plazo -LTP- (García Sanz y Hedmont Rojas, 2023; Bestmann y Walsh, 2017; Hartwigsen et al., 2015; Huang et al., 2017). De tal manera que la acción de mejora cognitiva de la estimulación eléctrica durante los procesos de aprendizaje podría deberse a mecanismos de plasticidad sináptica similares a la LTP (Paulus et al., 2016; Stagg y Nitsche, 2011), tal y como se ha comprobado no sólo para la cognición sino también para el aprendizaje motor (Krause y Cohen Kadosh, 2013). Mientras que los efectos mejoradores del rendimiento serían achacables a procesos neuromodulatorios, los cuales son altamente dependientes del estado de activación de los grupos neuronales previamente a la estimulación (Bradley et al., 2022). Esta alta dependencia respecto al estado inicial podría ser la causa del moderado efecto de la estimulación eléctrica en el rendimiento de tareas cognitivas, reportado en el metaanálisis de B. Simonsmeier et al. (2018), y confirmado en nuestro estudio.

Por otro lado, nuestros resultados muestran que el efecto de la neuromodulación prefrontal derecha sobre la cognición numérica no afecta a las tasas de acierto en las tareas de comparación de magnitudes, sino solamente a los tiempos de respuesta. También J. Mosbacher et al. (2020) aplicaron estimulación eléctrica a la corteza prefrontal y parietal (en este caso izquierda) con un protocolo similar al nuestro, y evaluaron su incidencia en tareas relacionadas con el cálculo mental. Encontraron efectos análogos a los nuestros: la tDCS prefrontal anódica generaba una mejora de los tiempos de respuesta en tareas de

cálculo, pero ningún efecto significativo en los porcentajes de acierto; y la tDCS parietal anódica no tenía efectos significativos sobre ninguna de las dos variables. Otros estudios de estimulación eléctrica transcraneal aplicada sobre las cortezas prefrontal y parietal muestran que los efectos neuromodulatorios se manifiestan en mejoras en las velocidades de procesamiento, pero no en las tasas de acierto en tareas relacionadas con la cognición numérica: así en estudios de tDCS (Kasahara et al., 2013; Sarkar et al., 2014) como en experimentos con RNS (Popescu et al., 2016; Snowball et al., 2013), quienes reportan efectos significativos para la variable TR, pero efectos no significativos para las tasas de acierto. Por lo tanto, se puede pensar que el efecto neuromodulatorio de una o pocas sesiones de estimulación eléctrica afecta a las velocidades de procesamiento, pero no al rendimiento en cuanto a porcentajes de acierto. Por otro lado, el experimento de R. Cohen Kadosh, et al. (2010b) muestra cómo la aplicación de varias sesiones de tDCS durante la fase de aprendizaje, genera cambios que implican mejores tasas de acierto, y que estos cambios permanecen a largo plazo (6 meses después), lo cual hace pensar en posibles efectos fisiológicos relacionados con la plasticidad sináptica.

Finalmente, en cuanto a las limitaciones de nuestro estudio, podemos señalar, en primer lugar, el reducido tamaño de la muestra ($N = 12$), debido a la ausencia total de financiación para este experimento y a las dificultades ocasionadas por las restricciones durante la pandemia Covid-19. Los investigadores somos conscientes de que el reducido tamaño de la muestra y la posible disminución de la potencia estadística, podrían poner en compromiso los resultados (Lazic, 2018). Sin embargo, constatamos que, a pesar del reducido tamaño de la muestra, la potencia observada en los análisis factoriales 3×7 (3 condiciones de estimulación \times 7 tareas), 3×3 (3 condiciones de estimulación \times 3 magnitudes) y 3×2 (3 condiciones de estimulación \times 2 tipos de tarea, uniformato vs mixta), con la variable tiempos de reacción, fueron superiores a 0.8 para los efectos de la tarea y de la condición de estimulación. No así, los análisis con la variable porcentaje de aciertos, los cuales, en su mayoría, muestran efectos no significativos. Este fenómeno (no evidencias de efecto de la estimulación sobre los porcentajes de acierto, y sí sobre los tiempos de reacción) se constata de forma reiterada en la literatura científica del ámbito de la cognición numérica. Adicionalmente, señalamos que otros estudios similares al nuestro han utilizado tamaños de muestra pequeños y encontrado resultados significativos con una potencia estadística suficiente, por ejemplo: Cohen Kadosh et al., 2010b ($N = 15$,

tres grupos $n = 5$ cada uno)²³. Esta limitación nos lleva a tomar con precaución los resultados de nuestro estudio, y tener en cuenta sólo aquellos efectos que cuentan con una potencia estadística suficiente. En nuestro caso, aunque se han reportado de forma completa todos los análisis factoriales, sólo se han realizado los análisis *post hoc* de los efectos significativos, y se han discutido los efectos significativos obtenidos con una potencia superior a 0.8.

Por otro lado, en el estudio se han tenido en cuenta las variables porcentaje de aciertos y TRs correspondientes a los 96 ensayos de cada una de las tareas de comparación, sin embargo, no se han medido los porcentajes de acierto y los TRs de cada una de la *ratio* (niveles de dificultad) por separado dentro de cada tarea. Esta diferenciación quizá hubiera podido mostrar efectos específicos de la estimulación sobre las comparaciones fáciles o las difíciles, como en el estudio de P.A. Pope et al. (2015) quienes encontraron que la estimulación eléctrica prefrontal izquierda afectaba a las tareas aritméticas difíciles, pero no a las fáciles. Además, en el estudio de estimulación se utilizaron las mismas ratios para todas las tareas, con la finalidad de poder comparar los rendimientos de las diferentes tareas entre sí. Lo cual condujo a niveles de dificultad muy variables entre las tareas, así por ejemplo la tarea de comparación numérica simbólica tuvo unas de acierto entre el 96,52 % y el 98,99% muy cercanas al techo de la capacidad; mientras que la comparación de áreas irregulares discretas tuvo unos porcentajes de acierto entre el 69,11% y el 81,55%. Sin embargo, para la comparación entre las distintas condiciones de estimulación hubiera sido preferible ajustar los niveles de dificultad en cada tarea (con las ratios correspondientes) para que todas las tareas estuvieran en un rango promedio entre el ~70% y el ~90%, y de esta forma quizá se hubieran detectado más diferencias significativas entre unas condiciones de estimulación y otras. Ya que en los estudios cognitivo-conductuales la mayor sensibilidad de los paradigmas para encontrar diferencias individuales se encuentra cuando las tareas se aplican con un nivel de dificultad cuyos rendimientos se muevan en un rango distante del techo (100% de respuestas correctas en el promedio de la población) y de la respuesta aleatoria (50% de aciertos, para tareas con sólo dos posibles opciones de respuesta) (Bogacz et al., 2006).

²³ Otros estudios de cognición numérica por medio de tDCS con tamaños de muestra similares: Clemens et al., 2013 (N = 10); Kasahara et al., 2013 (N = 16); Snowball et al., 2013 (grupos $n = 13$, $n = 12$); Cappelletti et al., 2013 (grupos $n = 10$); Javadí et al., 2014 (grupos $n = 12$, $n = 13$); Li et al., 2015 (N = 18); Houser et al., 2015 (grupos $n = 10$, $n = 9$, $n = 13$); Popescu et al., 2016 (grupos $n = 16$); Brezis et al., 2016 (N = 12); Arshad et al., 2016 (grupos $n = 10$); Dormal et al., 2016 (grupos $n = 13$); To et al., 2018 (grupos $n = 15$); Karolis et al., 2019 (grupos $n = 18$); Hartmann et al., 2019 (N = 18). (Tabla 7)

Por otro lado, nuestro estudio se realizó en modalidad de simple ciego: los participantes desconocían el protocolo de estimulación aplicado en cada sesión, pero el experimentador sí lo conocía, ya que debía seleccionarlo mediante el programa informático acoplado al aparato de estimulación. Por el contrario, los protocolos de doble ciego se consideran más fiables, pues evitan un posible sesgo ocasionado por el experimentador. Además, en los últimos años se ha puesto en duda la efectividad de la estimulación *sham* como placebo, ya que las sensaciones cutáneas de este protocolo no son del todo idénticas a la estimulación activa, lo cual podría condicionar el desconocimiento real de los participantes acerca de la condición de estimulación (Fassi y Cohen Kadosh, 2020).

También es importante tener en cuenta la influencia que tienen las posibles diferencias en las habilidades de base de los participantes. En este sentido, aunque aplicamos unos criterios de inclusión muy restrictivos, nunca se puede garantizar la homogeneidad absoluta de la muestra. Sin embargo, al tratarse de un experimento intra-sujeto, las comparaciones entre condiciones de estimulación tienen por objeto los mismos participantes.

Por último, como ya se ha mencionado, el análisis estadístico *post-hoc* se realizó utilizando los ajustes de Bonferroni, los cuales pueden aumentar la tasa de falsos negativos (Voelkl, 2019), y por ello para el ámbito de las ciencias médicas se sugiere el uso de ajustes como el de Benjamini-Hochberg, que están basados en la tasa FDR (del inglés *False Discovery Rate*) (Glickman et al., 2014).

6. Discusión general

En primer lugar, nuestra revisión sistemática de literatura aporta evidencia contundente acerca de que el uso de las NIBS para estudios básicos y aplicados de cognición numérica es un área investigativa consolidada, la cual ha permitido establecer asociaciones causales entre regiones corticales y funciones cognitivas con una resolución espacial, temporal y funcional que otras técnicas de neuroimagen no poseen. En consecuencia, se propone el uso de las NIBS como una estrategia valiosa para los estudios cognitivos²⁴.

Por otro lado, el metaanálisis muestra que actualmente no hay evidencia suficiente acerca del efecto mejorador de la estimulación eléctrica transcraneal sobre las habilidades aritméticas, en sujetos sanos. Este hallazgo es importante para la sociedad en general y más específicamente para la comunidad educativa, ya que en algunos contextos se está difundiendo el uso indiscriminado de estas técnicas. Así, en Colombia existen varias instituciones que están aplicando la estimulación eléctrica y magnética en niños para mejorar su rendimiento académico (por ejemplo: <https://emtcolumbia.com/index.html>, <https://neurocomgroup.com/servicios/>). Además, los resultados de nuestra revisión sistemática muestran que los efectos de la estimulación dependen en gran medida de las características individuales, llegando incluso a producir efectos contrarios en distintas personas. Es decir, la eficacia de las NIBS depende del ajuste individualizado de los parámetros de estimulación, ya que con un mismo protocolo se pueden producir efectos mejoradores en unas personas y efectos disruptores en otras; por lo que se desaconseja la aplicación masificada de estas técnicas. En conclusión, aunque el uso de las NIBS como mejorador cognitivo es un campo que tiene un enorme potencial, se requieren más investigaciones que prueben su eficacia, y sobre todo que identifiquen qué protocolos son eficaces para qué tipo de personas y bajo qué condiciones, al menos en lo que respecta a la cognición numérica.

Por otro lado, los resultados de nuestro estudio cognitivo-conductual pueden tener un impacto en la comunidad científica relacionada con la cognición numérica. En primer lugar, el hallazgo de que las estimaciones de áreas dependen de la forma (geométrica o irregular) de los estímulos utilizados, es un factor que debe ser tenido en cuenta a la hora de diseñar paradigmas para evaluar las habilidades relacionadas con el procesamiento

²⁴ En esta línea, autores como D. Pitcher et al. (2021) señalan que el aporte de las NIBS a la investigación básica de los procesos cognitivos (entre ellos la cognición numérica) puede verse potenciado en los próximos años gracias a la combinación de las NIBS con las otras técnicas como la EEG, IRM, etc.

espacial, y al momento de extrapolar conclusiones. Asimismo, nuestro estudio se suma a la evidencia acumulada acerca de la utilidad de las tareas de comparación numéricas y espaciales como un paradigma idóneo para abordar el procesamiento numérico y el procesamiento espacial a lo largo del desarrollo. Además, las tareas mixtas de comparación (tareas novedosas en nuestro estudio) se presentan como una potencial estrategia útil para el estudio de la integración intencional de diversas magnitudes.

Adicionalmente, los resultados de nuestro estudio referentes al procesamiento de magnitudes, si bien son provisionales y requieren ser probados en investigaciones longitudinales a gran escala, han contribuido a la discusión académica en torno a los modelos cognitivos para la estimación de áreas, aportando evidencias a favor del uso de estrategias heurísticas y en contra de los modelos relacionados con la percepción directa o la representación sumativa. Este avance en el conocimiento de los procesos cognitivos relacionados con las habilidades espaciales es importante para el ámbito educativo, ya que está demostrado que el desarrollo temprano de estas habilidades guarda relación con el futuro desempeño matemático (Atit et al., 2021).

De igual modo, los resultados acerca del procesamiento y la integración de magnitudes también han contribuido conceptualmente a la construcción de conocimiento en torno al desarrollo ontogenético del sistema cognitivo general de magnitudes. En este sentido, la combinación de los resultados de nuestro estudio cognitivo-conductual, y el estudio de neuromodulación, unido a los modelos de desarrollo del MPS de T. Leibovich y A. Henik (2013) y de S.F. Lourenco y M.R. Longo (2011), junto con el estado del arte acerca de las bases neurales del procesamiento numérico y el procesamiento espacial, y los datos relativos al neurodesarrollo, nos permiten avanzar una posible propuesta de un modelo explicativo del desarrollo de la capacidad para procesar e integrar las magnitudes.

Este modelo, que podríamos llamar *Modelo ecológico de desarrollo del sistema de procesamiento e integración de magnitudes*²⁵, estaría regido por los siguientes postulados:

Primer postulado: el sistema cognitivo de magnitudes estima las cantidades de una forma heurística dependiente de las demandas ecológicas. Así, por ejemplo, a la hora de

²⁵ El modelo que proponemos no existe como tal en la literatura, sino que es una elaboración propia que tiene como precedentes diferentes trabajos (Leibovich et al., 2013; Piazza et al., 2018; Viarouge et al., 2018; Von Aster y Shalev, 2007, Hamamouche y Cordes, 2019).

determinar la mayor cantidad de alimento, se integra el número de piezas y el tamaño de estas, mediante la aproximación (heurística) más simple y rápida, que puede ser el área envolvente, la regla sumativa de los anchos y largos, etc. Esta heurística no es siempre la misma, sino que se va afinando con la experiencia.

Segundo postulado: este sistema cognitivo de procesamiento e integración de magnitudes evoluciona a lo largo del desarrollo en tres etapas (Figura 63). Una primera etapa indiferenciada, durante la infancia, en la que la detección de la cantidad se lleva a cabo mediante una combinación de magnitudes continuas y discretas de naturaleza espacial, numérica y temporal. Una segunda etapa, durante la niñez, en la que se desarrolla la diferenciación de los subsistemas de procesamiento específicos para cada una de las magnitudes: número, longitud, masa, duración, etc. Esta diferenciación es dependiente del contexto, y por tanto de la escolarización. Y una tercera etapa, durante la adolescencia, en la que se desarrolla la capacidad para integrar intencionalmente diversas magnitudes en función de la finalidad de la tarea, poniendo el foco atencional en la magnitud de interés, e inhibiendo la información irrelevante de otras magnitudes.

Tercer postulado: la base neural del sistema cognitivo de magnitudes es una red frontoparietal que evoluciona de acuerdo con el desarrollo. Durante la fase cognitiva de diferenciación (entre la infancia y la niñez) se produce una progresiva parietalización del procesamiento de magnitudes, que se manifiesta en un perfeccionamiento de la detección automática de cada una de las magnitudes (dependiente del lóbulo parietal). Mientras que en la fase de diferenciación (durante la adolescencia) las interacciones bidireccionales entre la corteza parietal y la corteza prefrontal permiten una articulación del foco atencional hacia la magnitud de interés según la tarea y la inhibición del procesamiento de otras magnitudes. De forma que, la maduración de la corteza prefrontal hace posible la integración de magnitudes mediante el control intencional (*top-down*) de la actividad parietal (*bottom-up*), según las demandas del contexto o los requerimientos de la tarea.

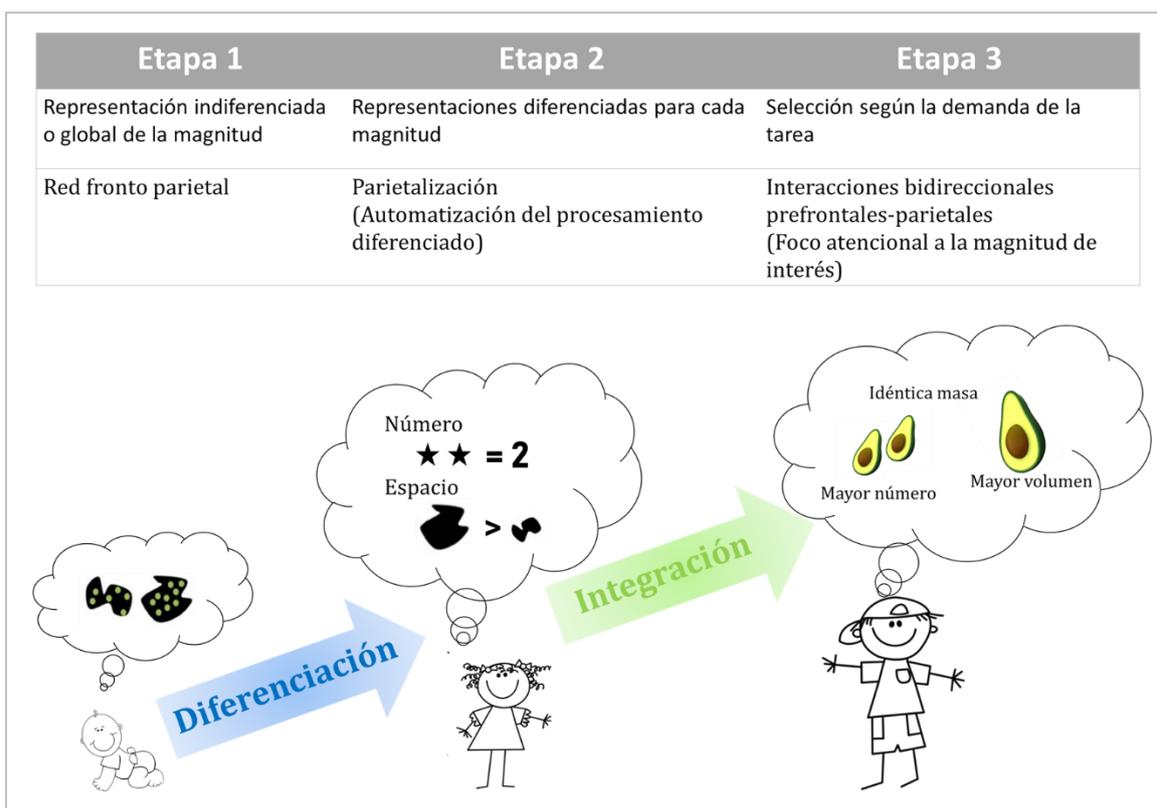


Figura 63. Modelo Ecológico del desarrollo de la capacidad para procesar e integrar magnitudes. Fuente: Elaboración propia.

Esta propuesta está avalada por las evidencias cognitivo-conductuales acerca de un procesamiento indiferenciado durante los primeros años de vida (Brannon et al., 2006; VanMarle y Wynn, 2006; Xu y Spelke, 2000; Lourenco y Longo, 2010), y un procesamiento diferenciado en la niñez (Hamamouche y Cordes, 2019). Así como por el modelo de desarrollo del sentido numérico de M. Von Aster y R.S. Shalev (2007) quienes plantean que la detección específica de la cantidad numérica se adquiere mediante un proceso dependiente de la cultura, en el que se pasa de un sistema central de magnitudes presente en la infancia a un sistema específicamente numérico en la edad escolar (los cuatro pasos de este proceso están especificados en el [Apéndice 15](#)). Asimismo, el modelo de desarrollo del MPS de T. Leibovich y A. Henik (2013) presupone que al inicio del ciclo vital se da un procesamiento indiferenciado de magnitudes que se va especializando a lo largo del desarrollo en la detección diferenciada de magnitudes ([Apéndice 16](#)).

Por otra parte, el segundo momento (fase de integración) estaría avalado por la propuesta neopiagetiana que resalta la importancia del control inhibitorio y la modulación del foco atencional en la magnitud de interés (Houdé et al., 2011; Viarouge et al., 2018, 2019).

Así como en la propuesta de E. Piazza et al. (2018) en el artículo titulado *Learning to focus on number*, según la cual el desarrollo de la cognición numérica consistiría en aprender a focalizarse en la información cuantitativa de interés, ignorando otra información irrelevante. Además, la mayor implicación de los procesos cognitivos superiores estaría sustentada por los estudios de M. Fornaciai et al. (2019) quienes demostraron que las instrucciones específicas de la tarea influyen en los mecanismos cognitivos de procesamiento de magnitudes implicados.

A nivel neuro-cognitivo nuestro modelo estaría soportado por las evidencias de una progresiva parietalización de la cognición numérica en la niñez (Serra-Grabulosa et al., 2010; Serra-Grabulosa, 2014), por la implicación de redes fronto-parietales bilaterales en el procesamiento y la integración de magnitudes (Hawes et al., 2019b; Moeller et al., 2015; Sokolowski et al., 2017b), y por la constatación del tardío neurodesarrollo de la corteza prefrontal (Huttenlocher y Dabholkar, 1997; Mix et al., 2002; Sowell et al., 2003).

Finalmente podemos añadir que desde una perspectiva evolutiva la idea de un funcionamiento heurístico del MPS es altamente parsimoniosa ya que supondría que la evolución ha seleccionado los sistemas/mecanismos cognitivos que estiman la cantidad de la forma más aproximada a la realidad posible con el menor gasto de recursos cognitivos.

Si tenemos en cuenta de forma conjunta los resultados de los tres estudios que componen esta tesis, junto con sus limitaciones, podríamos proponer un estudio futuro que sirviera para probar la validez de los postulados propuestos en el modelo. Esta investigación consistiría en un estudio longitudinal acerca de la capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial, utilizando las tareas de nuestro experimento; acompañado de un estudio de neuromodulación mediante un paradigma inhibitorio (tDCS catódica), el cual serviría para probar la implicación de la corteza prefrontal y parietal en el procesamiento y la integración de magnitudes en los diferentes momentos del desarrollo ontogenético. De esta manera se conseguiría evidencia acerca de las dos principales hipótesis futuras cuya formulación surge esta tesis: (1) la diferente implicación de la corteza parietal y la prefrontal en el procesamiento e integración de magnitudes, respectivamente; y (2) la transición de un modelo diferenciador a uno integrador a lo largo del desarrollo del sistema general de procesamiento de magnitudes.

First, our systematic literature review provides strong evidence that the use of NIBS for basic and applied studies of numerical cognition is a consolidated research area, which has allowed us to establish causal associations between cortical regions and cognitive functions with a spatial, temporal and functional resolution that other neuroimaging techniques do not possess. Consequently, the use of NIBS is proposed as a valuable strategy for cognitive studies.

On the other hand, the meta-analysis shows that there is currently insufficient evidence about the enhancing effect of transcranial electrical stimulation on numerical cognition in healthy subjects. This finding is important for society in general and more specifically for the educational community, since in some contexts the indiscriminate use of these techniques is spreading. Thus, in Colombia there are several institutions that are applying electrical and magnetic stimulation in children to improve their academic performance (e.g. <https://emtcolumbia.com/index.html> , <https://neurocomgroup.com/servicios/>). Furthermore, the results of our systematic review show that the effects of stimulation depend to a large extent on individual characteristics, even producing opposite effects in different people. In other words, the efficacy of NIBS depends on the individualised adjustment of the stimulation parameters, as the same protocol can produce enhancing effects in some people and disruptive effects in others; therefore, the mass application of these techniques is not recommended. In conclusion, although the use of NIBS as a cognitive enhancer is a field that has enormous potential, more research is needed to prove its efficacy, and above all to identify which protocols are effective for which types of people and under which conditions, at least in terms of numerical cognition.

On the other hand, the results of our cognitive-behavioural study may have an impact on the scientific community related to numerical cognition. First, the finding that area estimates depend on the shape (geometric or irregular) of the stimuli used is a factor that should be taken into account when designing paradigms for assessing spatial processing skills, and when extrapolating conclusions. Furthermore, our study adds to the accumulating evidence for the usefulness of numerical and spatial comparison tasks as a suitable paradigm for addressing numerical processing and spatial processing across development. Moreover, mixed comparison tasks (novel tasks in our study) are presented as a potentially useful strategy for the study of the intentional integration of different magnitudes.

In addition, the results of our study concerning magnitude processing, although tentative and needing to be tested in large-scale longitudinal research, have contributed to the academic discussion on cognitive models for area estimation, providing evidence in favour of the use of heuristic strategies and against models related to direct perception or summative representation. This advance in the knowledge of cognitive processes related to spatial skills is important for education, as it has been shown that the early development of these skills is related to future mathematical performance (Atit et al., 2021).

Similarly, findings on magnitude processing and integration have also contributed conceptually to the construction of knowledge about the ontogenetic development of the general cognitive system of magnitudes. In this sense, the combination of the results of our cognitive-behavioural study, and the neuromodulation study, together with the MPS developmental models of T. Leibovich and A. Henik (2013) and S.F. Lourenco and M.R. Longo (2011), together with the state of the art about the neural bases of numerical processing and spatial processing, and the neurodevelopmental data, allow us to advance a possible proposal for an explanatory model of the development of the ability to process and integrate magnitudes.

This model, which we could call the Ecological model of the development of the system for processing and integrating magnitudes, would be governed by the following postulates:

First postulate: the cognitive quantity system estimates quantities in a heuristic way depending on ecological demands. Thus, for example, when determining the largest amount of food, the number of pieces and their size are integrated by means of the simplest and quickest approximation (heuristic), which can be the enveloped area, the sum rule of widths and lengths, etc. This heuristic is not always the same but is refined with experience.

Second postulate: this cognitive system of processing and integrating magnitudes evolves throughout development in three stages (Figure 63). A first undifferentiated stage, during infancy, in which quantity detection is carried out through a combination of continuous and discrete magnitudes of a spatial, numerical and temporal nature. A second stage, during childhood, in which the differentiation of specific processing subsystems for each of the quantities: number, length, mass, duration, etc., develops. This differentiation is context-dependent, and therefore dependent on schooling. And a third stage, during

adolescence, in which the ability to intentionally integrate different magnitudes according to the purpose of the task is developed, placing the attentional focus on the magnitude of interest, and inhibiting irrelevant information from other magnitudes.

Third postulate: the neural basis of the cognitive magnitude system is a frontoparietal network that evolves developmentally. During the cognitive differentiation phase (between infancy and childhood) there is a progressive parietalisation of magnitude processing, which is manifested in a refinement of automatic detection of individual magnitudes (parietal lobe-dependent). Whereas in the differentiation phase (during adolescence) the bidirectional interactions between the parietal cortex and the prefrontal cortex allow an articulation of the attentional focus towards the magnitude of interest according to the task and the inhibition of the processing of other magnitudes. Thus, the maturation of the prefrontal cortex makes possible the integration of magnitudes through the intentional control (top-down) of the parietal activity (bottom-up), according to the demands of the context or the requirements of the task.

This proposal is supported by cognitive-behavioural evidence of undifferentiated processing during the first years of life (Brannon et al., 2006; Van Marle and Wynn, 2006; Xu and Spelke, 2000; Lourenco and Longo, 2010), and differentiated processing in childhood (Hamamouche and Cordes, 2019). As well as by the number sense development model of M. Von Aster and R.S. Shalev (2007) who propose that the specific detection of number quantity is acquired through a culture-dependent process, in which one moves from a central magnitude system present in infancy to a specifically numerical system at school age (the four steps of this process are specified in Appendix 13). Similarly, the MPS developmental model of T. Leibovich and A. Henik (2013) assumes that at the beginning of the life cycle there is undifferentiated magnitude processing that specialises over the course of development in differentiated magnitude detection (Appendix 14).

On the other hand, the second moment (integration phase) would be supported by the neo-Piagetian proposal that highlights the importance of inhibitory control and modulation of the attentional focus on the magnitude of interest (Houdé et al., 2011; Viarouge et al., 2018, 2019). As well as in the proposal by E. Piazza et al. (2018) in the article entitled Learning to focus on number, according to which the development of numerical cognition would consist of learning to focus on the quantitative information of interest, ignoring

other irrelevant information. Furthermore, the greater involvement of higher cognitive processes would be supported by the studies of M. Fornaciai et al. (2019) who showed that task-specific instructions influence the cognitive mechanisms of magnitude processing involved.

At the neuro-cognitive level our model would be supported by the evidence of a progressive parietalisation of numerical cognition in childhood (Serra-Grabulosa et al., 2010; Serra-Grabulosa, 2014), by the involvement of bilateral fronto-parietal networks in the processing and integration of magnitudes (Hawes et al., 2019b; Moeller et al., 2015; Sokolowski et al., 2017b), and by the finding of late neurodevelopment of the prefrontal cortex (Huttenlocher and Dabholkar, 1997; Mix et al., 2002; Sowell et al., 2003).

Finally, we can add that from an evolutionary perspective the idea of a heuristic functioning of the MPS is highly parsimonious as it would imply that evolution has selected cognitive systems/mechanisms that estimate quantity as close to reality as possible with the least expenditure of cognitive resources.

If we take into account the results of the three studies that make up this thesis, together with their limitations, we could propose a future study that would serve to test the validity of the postulates proposed in the model. This research would consist of a longitudinal study of the ability to process and integrate numerical and spatial quantitative information, using the tasks of our experiment; accompanied by a neuromodulation study using an inhibitory paradigm (cathodal tDCS), which would serve to test the involvement of the prefrontal and parietal cortex in the processing and integration of magnitudes at different times of ontogenetic development. This would provide evidence for the two main future hypotheses for which this thesis arises: (1) the different involvement of the parietal and prefrontal cortex in magnitude processing and integration, respectively; and (2) the transition from a differentiation to an integration model throughout the development of the general magnitude processing system.

7. Conclusiones

Las principales conclusiones de los tres estudios llevados a cabo en esta tesis son:

- En los últimos diez años se ha probado que las NIBS aplicadas sobre la corteza prefrontal y la parietal tienen efectos neuromodulatorios, los cuales se traducen en cambios medibles en la cognición numérica.
- La evidencia actual acerca del posible efecto mejorador de la estimulación eléctrica transcraneal sobre las habilidades del cálculo no es concluyente.
- Las habilidades de procesamiento numérico y de procesamiento espacial ya están diferenciadas en niños de 7 años, como lo evidencian los marcadores de desempeño en tareas de comparación de magnitudes. Esta diferenciación sigue presente en niños de 12 años, y se perfecciona en la edad adulta.
- La integración intencional de magnitudes espacio-numéricas, dependiente de las instrucciones de la tarea, parecería una habilidad tardía que se desarrolla durante la adolescencia, como lo evidencia el idéntico desempeño en niños de 7 y 12 años, y el salto cualitativo que se da en los adultos.
- La estimación de áreas con formas regulares (geométricas) o con figuras irregulares (amorfas) parecerían implicar sistemas cognitivos diferentes tanto en niños como en adultos, como se evidencia por el diferente rendimiento en las tareas de comparación de áreas según la forma de las figuras, aun cuando éstas tengan idéntica superficie.
- La neuromodulación de la DLPFC derecha mediante estimulación eléctrica transcraneal anódica produce una mejora moderada de la cognición numérica consistente en un aumento generalizado de la velocidad de respuesta en tareas de procesamiento e integración numérico-espaciales.
- La evaluación simultánea mediante tareas de comparación numéricas y espaciales, con cantidades continuas y discretas propuestas en nuestra investigación, pueden servir para futuros estudios que analicen las bases neurales y el desarrollo ontogenético de la capacidad para procesar e integrar la información cuantitativa numérica y la espacial.

Cada una de estas conclusiones tiene implicaciones relacionadas con la generación del conocimiento, así como a nivel de su aplicabilidad en el ámbito educativo e incluso en el ámbito terapéutico.

The main conclusions of the three studies carried out in this thesis are:

- In the last ten years it has been proven that NIBS applied on the prefrontal and parietal cortex have neuromodulatory effects, which translate into measurable changes in numerical cognition.
- Current evidence about the possible enhancing effect of transcranial electrical stimulation on numeracy skills is inconclusive.
- Numerical processing and spatial processing skills are already differentiated in 7-year-olds, as evidenced by performance markers in magnitude comparison tasks. This differentiation is still present in 12-year-olds, and is refined in adulthood.
- The intentional integration of spatial-numerical magnitudes, dependent on task instructions, would seem to be a late skill that develops during adolescence, as evidenced by the identical performance in 7- and 12-year-olds, and the qualitative leap in adults.
- The estimation of areas with regular (geometric) shapes or with irregular (amorphous) figures would seem to involve different cognitive systems in children and adults, as evidenced by the different performance in area comparison tasks according to the shape of the figures, even when these have identical surface areas.
- Neuromodulation of the right DLPFC by anodal transcranial electrical stimulation produces a moderate improvement in numerical cognition consisting of a generalised increase in response speed in numerical-spatial processing and integration tasks.
- The simultaneous assessment by means of numerical and spatial comparison tasks, with continuous and discrete quantities proposed in our research, may serve for future studies analysing the neural basis and the ontogenetic development of the abilities to process and integrate numerical and spatial quantitative information.

Each of these findings has implications for knowledge generation, as well as for educational and even therapeutic applicability.

8. Referencias bibliográficas

- Agrillo, C., Dadda, M., Serena, G. y Bisazza, A. (2008). Do fish count? Spontaneous discrimination of quantity in female mosquitofish. *Animal Cognition*, *11*(3), 495–503. <https://doi.org/10.1007/s10071-008-0140-9>
- Agrillo, C., Miletto Petrazzini, M. E. y Bisazza, A. (2017). Numerical abilities in fish: A methodological review. *Behavioural Processes*, *141*, 161–171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.beproc.2017.02.001>
- Alam, M. , Truong, D. Q. , Khadka, N. , & Bikson, M. (2016). Spatial and polarity precision of concentric high-definition transcranial direct current stimulation (HD-tDCS). *Physics in Medicine and Biology*, *61*(12), 4506 <https://doi.org/10.1088/0031-9155/61/12/4506>
- Albajes-Eizagirre, A., Solanes, A. & Radua, J. (2019). Meta-analysis of non-statistically significant unreported effects. *Statistical Methods in Medical Research*, *28*(12), 3741–3754. <https://doi.org/10.1177/0962280218811349>
- Albayay, J., Villarroel-Gruner, P., Bascour-Sandoval, C., Parma, V. y Gálvez-García, G. (2019). Psychometric properties of the Spanish version of the Edinburgh Handedness Inventory in a sample of Chilean undergraduates. *Brain and Cognition*, *137*, 103618. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bandc.2019.103618>
- Amalric, M. y Dehaene, S. (2018). Cortical circuits for mathematical knowledge: evidence for a major subdivision within the brain's semantic networks. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, *373*(1740), 20160515. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0515>
- Amaro, E. y Barker, G. J. (2006). Study design in fMRI: Basic principles. *Brain and Cognition*, *60*(3), 220–232. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bandc.2005.11.009>
- Anderson, N. H. y Cuneo, D. O. (1978). The height + width rule in children's judgments of quantity. *Journal of Experimental Psychology*, *107*(4), 335–378.
- Andres, M., Pelgrims, B., Michaux, N., Olivier, E. y Pesenti, M. (2011). Role of distinct parietal areas in arithmetic: An fMRI-guided TMS study. *NeuroImage*, *54*(4), 3048–3056. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.11.009>

- Ansari, D. (2008). Effects of development and enculturation on number representation in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(4), 278–291. <https://doi.org/10.1038/nrn2334>
- Antal, A., Alekseichuk, I., Bikson, M., Brockmüller, J., Brunoni, A. R., Chen, R., Cohen, L. G., Douthwaite, G., Ellrich, J., Flöel, A., Fregni, F., George, M. S., Hamilton, R., Haueisen, J., Herrmann, C. S., Hummel, F. C., Lefaucheur, J. P., Liebetanz, D., Loo, C. K., ... Paulus, W. (2017). Low intensity transcranial electric stimulation: Safety, ethical, legal regulatory and application guidelines. *Clinical Neurophysiology*, 128(9), 1774–1809. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2017.06.001>
- Arsalidou, M., Pawliw-Levac, M., Sadeghi, M. y Pascual-Leone, J. (2018). Brain areas associated with numbers and calculations in children: Meta-analyses of fMRI studies. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30, 239–250. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.08.002>
- Arsalidou, M. y Taylor, M. J. (2011). Is $2+2=4$? Meta-analyses of brain areas needed for numbers and calculations. *NeuroImage*, 54(3), 2382–2393. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.10.009>
- Arshad, Q., Nigmatullina, Y., Nigmatullin, R., Asavarut, P., Goga, U., Khan, S., Sander, K., Siddiqui, S., Roberts, R. E., Cohen Kadosh, R., Bronstein, A. M. y Malhotra, P. A. (2016). Bidirectional Modulation of Numerical Magnitude. *Cerebral Cortex*, 26(5), 2311–2324. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv344>
- Artemenko, C., Moeller, K., Huber, S. y Klein, E. (2015). Differential influences of unilateral tDCS over the intraparietal cortex on numerical cognition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00110>
- Ashkenazi, S. (2018). Intentional and automatic processing of numerical information in mathematical anxiety: testing the influence of emotional priming. *Cognition y Emotion*, 32(8), 1700–1707. <https://doi.org/10.1080/02699931.2018.1435504>
- Ashkenazi, S., Rubinsten, O. y Henik, A. (2009). Attention, Automaticity, and Developmental Dyscalculia. *Neuropsychology*, 23(4), 535–540. <https://doi.org/10.1037/a0015347>
- Atit, K., Power, J. R., Pigott, T., Lee, J., Geer, E. A., Uttal, D. H., Ganley, C. M. y Sorby, S. A. (2022). Examining the relations between spatial skills and mathematical

- performance: A meta-analysis. *Psychonomic Bulletin and Review*, 29(3), 699–720.
<https://doi.org/10.3758/s13423-021-02012-w>
- Aulet, L. S., Chiu, V. C., Prichard, A., Spivak, M., Lourenco, S. F. y Berns, G. S. (2019). Canine sense of quantity: Evidence for numerical ratio-dependent activation in parietotemporal cortex. *Biology Letters*, 15(12).
<https://doi.org/10.1098/rsbl.2019.0666>
- Aulet, L. S. y Lourenco, S. F. (2021). The relative salience of numerical and non-numerical dimensions shifts over development: A re-analysis of Tomlinson, DeWind, and Brannon (2020). *Cognition*, 210, 104610.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cognition.2021.104610>
- Aunio, P. & Räsänen, P. (2016). Core numerical skills for learning mathematics in children aged five to eight years – a working model for educators. *European Early Childhood Education Research Journal*, 24(5), 684–704.
<https://doi.org/10.1080/1350293X.2014.996424>
- Barth, H. C. (2008). Judgments of discrete and continuous quantity: An illusory Stroop effect. *Cognition*, 109(2), 251–266.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.09.002>
- Bartrés Faz, D., Junqué Plaja, C., Tormos Muñoz, J. M. & Pascual Leone, Á. (2000). Aplicación de la estimulación magnética transcraneal a la investigación neuropsicológica. *Revista de Neurología*, 30(12).
<https://doi.org/10.33588/rn.3012.99498>
- Bennette, E., Keil, F. C. y Yousif, S. R. (2021). A Ubiquitous Illusion of Volume: Are Impressions of 3D Volume Captured by an “Additive Heuristic”? *Perception*, 50(5), 462–469. <https://doi.org/10.1177/03010066211003746>
- Beran, M. J. (2007). Rhesus monkeys (*Macaca mulatta*) enumerate large and small sequentially presented sets of items using analog numerical representations. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 33(1), 42–54.
<https://doi.org/10.1037/0097-7403.33.1.42>
- Bergmann, T. O., Karabanov, A., Hartwigsen, G., Thielscher, A. y Siebner, H. R. (2016). Combining non-invasive transcranial brain stimulation with neuroimaging and electrophysiology: Current approaches and future perspectives. *NeuroImage*, 140,

- 4–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.02.012>
- Bestmann, Sven y Walsh, V. (2017). Transcranial electrical stimulation. *Current Biology*, 27(23), R1258-R1262. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.11.001>
- Bieck, S. M., Artemenko, C., Moeller, K. y Klein, E. (2018). Low to no effect: Application of tRNS during two-digit addition. *Frontiers in Neuroscience*, 12. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00176>
- Bikson, M., Grossman, P., Thomas, C., Zannou, A. L., Jiang, J., Adnan, T., Mourdoukoutas, A. P., Kronberg, G., Truong, D., Boggio, P., Brunoni, A. R., Charvet, L., Fregni, F., Fritsch, B., Gillick, B., Hamilton, R. H., Hampstead, B. M., Jankord, R., Kirton, A., ... Woods, A. J. (2016). Safety of Transcranial Direct Current Stimulation: Evidence Based Update 2016. *Brain Stimulation*, 9(5), 641–661. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.06.004>
- Bikson, M., Inoue, M., Akiyama, H., Deans, J. K., Fox, J. E., Miyakawa, H. y Jefferys, J. G. R. (2004). Effect of uniform extracellular DC electric fields on excitability in rat hippocampal slices in vitro. *Journal of Physiology*, 557(1), 175-190 <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.055772>
- Blakemore, S.-J. (2012). Imaging brain development: the adolescent brain. *NeuroImage*, 61(2), 397–406. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.11.080>
- Bogacz, R., Brown, E., Moehlis, J., Holmes, P., & Cohen, J. D. (2006). The physics of optimal decision making: A formal analysis of models of performance in two-alternative forced-choice tasks. *Psychological Review*, 113(4), 700–765. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.113.4.700>
- Bonny, J. W. y Lourenco, S. F. (2015). Individual differences in children's approximations of area correlate with competence in basic geometry. *Learning and Individual Differences*, 44, 16–24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lindif.2015.11.001>
- Boresntein, M. , Hedges, L.V., Higgins, J.P.T., Rothstein, H.R. (2009) Fixed-effect model. Introduction to meta-analysis. John Wiley & Sons.
- Borghesani, V., de Hevia, M. D., Viarouge, A., Pinheiro-Chagas, P., Eger, E. y Piazza, M. (2019). Processing number and length in the parietal cortex: Sharing resources,

- not a common code. *Cortex*, 114, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.07.017>
- Boysen, S. T., Berntson, G. G. y Mukobi, K. L. (2001). Size matters: Impact of item size and quantity on array choice by chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Journal of Comparative Psychology*, 115(1), 106–110. <https://doi.org/10.1037/0735-7036.115.1.106>
- Bradley, C., Nydam, A. S., Dux, P. E. y Mattingley, J. B. (2022). State-dependent effects of neural stimulation on brain function and cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 23(8), 459–475. <https://doi.org/10.1038/s41583-022-00598-1>
- Brannon, E. M., Abbott, S. y Lutz, D. J. (2004). Number bias for the discrimination of large visual sets in infancy. *Cognition*, 93(2), B59–B68. <https://doi.org/10.1016/J.COGNITION.2004.01.004>
- Brannon, E. M., Lutz, D. y Cordes, S. (2006). The development of area discrimination and its implications for number representation in infancy. *Developmental Science*, 9(6), 59–64. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00530.x>
- Brannon, E. M. y Roitman, J. D. (2003). Nonverbal representations of time and number in animals and human infants. In: *Functional and Neural Mechanisms of Interval Timing.*, 143–182. <https://doi.org/10.1201/9780203009574.ch6>
- Brannon, E. M., Suanda, S. y Libertus, K. (2007). Temporal discrimination increases in precision over development and parallels the development of numerosity discrimination. *Developmental Science*, 10(6), 770–777. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2007.00635.x>
- Brezis, N., Bronfman, Z. Z., Jacoby, N. y Lavidor Michaland Usher, M. (2016). Transcranial Direct Current Stimulation over the Parietal Cortex Improves Approximate Numerical Averaging. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 28(11), 1700–1713. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00991
- Buetti, D. y Walsh, V. (2009). The parietal cortex and the representation of time, space, number and other magnitudes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1525), 1831–1840. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0028>
- Burr, D. C., Anobile, G. y Arrighi, R. (2018). Psychophysical evidence for the number

- sense. In *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 373(1740), 1-11. The Royal Society. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0045>
- Butterworth, B. (2005). The development of arithmetical abilities. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 43(1), 3–18. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2004.00374.x>
- Calmet, J. y Tjandra, I. A. (1991). Representation of mathematical knowledge. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 542 LNAI P, 469–478. https://doi.org/10.1007/3-540-54563-8_110
- Camacho, A., Grau, S., Mateu, R. y Serra-Grabulosa, J. M. (2017). 6th Scientific Meeting of the Federation of the European Societies of Neuropsychology (FESN). *Di-Calc: Spanish Digital Test to Evaluate Mathematics Learning Disabilities (MLDs) in Primary School*.
- Cantlon, J. F. y Brannon, E. M. (2006). Shared System for Ordering Small and Large Numbers in Monkeys and Humans. *Psychological Science*, 17(5), 401–406. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01719.x>
- Cantlon, J. F., Davis, S. W., Libertus, M. E., Kahane, J., Brannon, E. M. y Pelphrey, K. A. (2011). Inter-parietal white matter development predicts numerical performance in young children. *Learning and Individual Differences*, 21(6), 672–680. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2011.09.003>
- Cantlon, J. F., Platt, M. L. y Brannon, E. M. (2009). Beyond the number domain. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(2), 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.11.007>
- Cappelletti, M., Gessaroli, E., Hithersay, R., Mitolo, M., Didino, D., Kanai, R., Kadosh, R. C. y Walsh, V. (2013). Transfer of Cognitive Training across Magnitude Dimensions Achieved with Concurrent Brain Stimulation of the Parietal Lobe. *Journal of Neuroscience*, 33(37), 14899–14907. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1692-13.2013>
- Cappelletti, M., Lee, H. L., Freeman, E. D. y Price, C. J. (2010). The role of right and left parietal lobes in the conceptual processing of numbers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(2), 331-346 <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21246>

- Cappelletti, M., Muggleton, N. y Walsh, V. (2009). Quantity without numbers and numbers without quantity in the parietal cortex. *Neuroimage*, 46(2), 522–529. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.02.016>
- Cappelletti, M., Pikkat, H., Upstill, E., Speekenbrink, M. y Walsh, V. (2015). Learning to integrate versus inhibiting information is modulated by age. *The Journal of Neuroscience : The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 35(5), 2213–2225. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1018-14.2015>
- Cárdenas-Morales, L., Volz, L. J., Michely, J., Rehme, A. K., Pool, E.-M., Nettekoven, C., Eickhoff, S. B., Fink, G. R. y Grefkes, C. (2014). Network Connectivity and Individual Responses to Brain Stimulation in the Human Motor System. *Cerebral Cortex*, 24(7), 1697–1707. <https://doi.org/10.1093/cercor/bht023>
- Carlson, S. M. (2005). Developmentally sensitive measures of executive function in preschool children. *Developmental Neuropsychology*, Vol. 28, pp. 595–616. https://doi.org/10.1207/s15326942dn2802_3
- Casey, M. B., Nuttall, R., Pezaris, E. y Benbow, C. P. (1995). The Influence of Spatial Ability on Gender Differences in Mathematics College Entrance Test Scores Across Diverse Samples. *Developmental Psychology*, 31(4), 697–705. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.31.4.697>
- Castaldi, E., Vignaud, A. y Eger, E. (2020). Mapping subcomponents of numerical cognition in relation to functional and anatomical landmarks of human parietal cortex. *NeuroImage*, 221, 117210. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117210>
- Cattaneo, Z., Fantino, M., Silvanto, J., Vallar, G. y Vecchi, T. (2011). Tapping effects on numerical bisection. *Experimental Brain Research*, 208(1), 21–28. <https://doi.org/10.1007/s00221-010-2451-8>
- Cattaneo, Z., Silvanto, J., Pascual-Leone, A. y Battelli, L. (2009). The role of the angular gyrus in the modulation of visuospatial attention by the mental number line. *Nuroimage*, 44(2), 563–568. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.09.003>
- Cheeran, B., Talelli, P., Mori, F., Koch, G., Suppa, A., Edwards, M., Houlden, H., Bhatia, K., Greenwood, R. y Rothwell, J. C. (2008). A common polymorphism in the brain-derived neurotrophic factor gene (BDNF) modulates human cortical plasticity and

- the response to rTMS. *The Journal of Physiology*, 586(23), 5717–5725.
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.2008.159905>
- Chen, Q. y Li, J. (2014). Association between individual differences in non-symbolic number acuity and math performance: A meta-analysis. *Acta Psychologica*, 148, 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2014.01.016>
- Cheng, G. L. F., Tang, J., Walsh, V., Butterworth, B. y Cappelletti, M. (2013). Differential effects of left parietal theta-burst stimulation on order and quantity processing. *Brain Stimulation*, 6(2), 160–165.
<https://doi.org/10.1016/j.brs.2012.04.005>
- Chesney, D. L. y Matthews, P. G. (2018). Task Constraints Affect Mapping From Approximate Number System Estimates to Symbolic Numbers. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01801>
- Church, R. M. y Meek, W. H. (1984). The numerical attribute of stimuli. In H. L. Roitblat, T. G. Terrace y H. S. Beaver (Eds.), *Animal Cognition* (pp. 445–464). Erlbaun.
- Clemens, B., Jung, S., Zvyagintsev, M., Domahs, F. y Willmes, K. (2013). Modulating arithmetic fact retrieval: A single-blind, sham-controlledtDCS study with repeated fMRI measurements. *Neuropsychologia*, 51(7), 1279–1286.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.03.023>
- Cohen Kadosh, R. (2014). *The Stimulated Brain: Cognitive Enhancement Using Non-Invasive Brain Stimulation*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-02602-6>
- Cohen Kadosh, R. y Elliott, P. (2013). Brain stimulation has a long history. *Nature*, 500(7464), 529. <https://doi.org/10.1038/500529d>
- Cohen Kadosh, R., Henik, A., Rubinsten, O., Mohr, H., Dori, H., van de Ven, V., Zorzi, M., Hendler, T., Goebel, R. y Linden, D. E. J. (2005). Are numbers special?: The comparison systems of the human brain investigated by fMRI. *Neuropsychologia*, 43(9), 1238–1248.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2004.12.017>
- Cohen Kadosh, R., Bien, N. y Sack, A. T. (2012). Automatic and intentional number processing both rely on intact rightparietal cortex: a combined fMRI and neuronavigated TMS study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6.

<https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00002>

- Cohen Kadosh, R., Cohen Kadosh, K., Schuhmann, T., Kaas, A., Goebel, R., Henik, A. y Sack, A. T. (2007). Virtual dyscalculia induced by parietal-lobe TMS impairs automatic magnitude processing. *Current Biology*, 17(8), 689–693. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.02.056>
- Cohen Kadosh, R., Muggleton, N., Silvanto, J. y Walsh, V. (2010a). Double Dissociation of Format-Dependent and Number-Specific Neurons in Human Parietal Cortex. *Cerebral Cortex*, 20(9), 2166–2171. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhp273>
- Cohen Kadosh, R., Soskic, S., Iuculano, T., Kanai, R. y Walsh, V. (2010b). Modulating Neuronal Activity Produces Specific and Long-Lasting Changes in Numerical Competence. *Current Biology*, 20(22), 2016–2020. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.10.007>
- COLCIENCIAS. (2017). *Política de ética, Bioética e Integridad Científica* (Documento de Polític Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación. N° 1501) Colciencias, Colombia
- Colegio Colombiano de Psicólogos. (2009). *Deontología y Bioética del Ejercicio de la Psicología en Colombia*.
- Cordes, S. y Brannon, E. M. (2008). The Difficulties of Representing Continuous Extent in Infancy: Using Number Is Just Easier. *Child Development*, 79(2), 476–489. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01137.x>
- Cordes, S., Williams, C. L. y Meck, W. H. (2007). Common Representations of Abstract Quantities. *Current Directions in Psychological Science*, 16(3), 156–161. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2007.00495.x>
- Crollen, V., Grade, S., Pesenti, M. y Dormal, V. (2013). A common metric magnitude system for the perception and production of numerosity, length, and duration. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00449>
- Dadon, G. y Henik, A. (2017). Adjustment of control in the numerical Stroop task. *Memory y Cognition*, 45(6), 891–902. <https://doi.org/10.3758/s13421-017-0703-6>
- Dakin, S. C., Tibber, M. S., Greenwood, J. A., Kingdom, F. A. A. y Morgan, M. J. (2011). A common visual metric for approximate number and density. *Proceedings of the*

National Academy of Sciences, 108(49), 19552–19557.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1113195108>

Dayan, E., Censor, N., Buch, E. R., Sandrini, M. y Cohen, L. G. (2013). Noninvasive brain stimulation: From physiology to network dynamics and back. *Nature Neuroscience*, 16(7), 838–844. <https://doi.org/10.1038/nn.3422>

de Hevia, M. D. y Spelke, E. S. (2009). Spontaneous mapping of number and space in adults and young children. *Cognition*, 110(2), 198–207.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.11.003>

de Hevia, M.D., Girelli, L. y Vallar, G. (2006). Numbers and space: a cognitive illusion? *Experimental Brain Research*, 168(1), 254–264. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0084-0>

De Smedt, B., Noël, M.-P. P., Gilmore, C. y Ansari, D. (2013). How do symbolic and non-symbolic numerical magnitude processing skills relate to individual differences in children's mathematical skills? A review of evidence from brain and behavior. *Trends in Neuroscience and Education*, 2(2), 48–55.
<https://doi.org/10.1016/J.TINE.2013.06.001>

De Smedt, B., Verschaffel, L. y Ghesquière, P. (2009). The predictive value of numerical magnitude comparison for individual differences in mathematics achievement. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(4) 469-479
<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.01.010>

Dehaene, S y Brannon, E. (2011). *Space, Time and Number in the Brain*. Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/C2010-0-66570-9>

Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44(1–2), 1–42.
[https://doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90049-N](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90049-N)

Dehaene, S. (1997). *The number sense*. Oxford University Press.

Dehaene, S. (2003). The neural basis of the Weber-Fechner law: A logarithmic mental number line. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(4), 145–147.
[https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00055-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00055-X)

Dehaene, S. y Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1(1), 83–120.

- Dehaene, S. y Cohen, L. (2007). Cultural recycling of cortical maps. *Neuron*, 56(2), 384–398. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.10.004>
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P. y Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3), 487–506. <https://doi.org/10.1080/02643290244000239>
- Delgado, A. R. y Prieto, G. (2004). Cognitive mediators and sex-related differences in mathematics. *Intelligence*, 32(1), 25–32. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0160-2896\(03\)00061-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0160-2896(03)00061-8)
- Devlin, D., Moeller, K. y Sella, F. (2022). The structure of early numeracy: Evidence from multi-factorial models. *Trends in Neuroscience and Education*, 26, 100171. <https://doi.org/10.1016/J.TINE.2022.100171>
- Dewind, N. K. y Brannon, E. M. (2012). Malleability of the approximate number system: effects of feedback and training. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 68. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00068>
- Di Martino, A., Fair, D. A., Kelly, C., Satterthwaite, T. D., Castellanos, F. X., Thomason, M. E., Craddock, R. C., Luna, B., Leventhal, B. L., Zuo, X.-N. y Milham, M. P. (2014). Unraveling the Miswired Connectome: A Developmental Perspective. *Neuron*, 83(6), 1335–1353. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neuron.2014.08.050>
- Di Lazzaro, V., Bella, R., Benussi, A., Bologna, M., Borroni, B., Capone, F., Chen, K. H. S., Chen, R., Chistyakov, A. V., Classen, J., Kiernan, M. C., Koch, G., Lanza, G., Lefaucheur, J. P., Matsumoto, H., Nguyen, J. P., Orth, M., Pascual-Leone, A., Rektorova, I., ... Ranieri, F. (2021). Diagnostic contribution and therapeutic perspectives of transcranial magnetic stimulation in dementia. *Clinical Neurophysiology*, 132(10), 2568–2607. <https://doi.org/10.1016/J.CLINPH.2021.05.035>
- Di Rosa, E., Bardi, L., Umiltà, C., Masina, F., Forgiione, M. y Mapelli, D. (2017). Transcranial direct current stimulation (tDCS) reveals a dissociation between SNARC and MARC effects: Implication for the polarity correspondence account. *CORTEX*, 93, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.05.002>
- Ditz, H. M. y Nieder, A. (2015). Neurons selective to the number of visual items in the

- corvid songbird endbrain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(25), 7827–7832. <https://doi.org/10.1073/pnas.1504245112>
- Dmochowski, J. P., Datta, A., Bikson, M., Su, Y. y Parra, L. C. (2011). Optimized multi-electrode stimulation increases focality and intensity at target. *Journal of Neural Engineering*, 8(4), 046011 <https://doi.org/10.1088/1741-2560/8/4/046011>
- Dormal, V., Andres, M. y Pesenti, M. (2008). Dissociation of numerosity and duration processing in the left intraparietal sulcus: A transcranial magnetic stimulation study. *Cortex*, 44(4), 462–469. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.011>
- Dormal, V., Andres, M. y Pesenti, M. (2012a). Contribution of the right intraparietal sulcus to numerosity and length processing: An fMRI-guided TMS study. *Cortex*, 48(5), 623–629. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.05.019>
- Dormal, V., Dormal, G., Joassin, F. y Pesenti, M. (2012b). A common right frontoparietal network for numerosity and duration processing: An fMRI study. *Human Brain Mapping*, 33(6), 1490-1501. <https://doi.org/10.1002/hbm.21300>
- Dormal, V., Javadi, A.-H., Pesenti, M., Walsh, V. y Cappelletti, M. (2016). Enhancing duration processing with parietal brain stimulation. *Neuropsychologia*, 85, 272–277. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.03.033>
- Dormal, V. y Pesenti, M. (2007). Numerosity-length interference: a Stroop experiment. *Experimental Psychology*, 54(4), 289–297. <https://doi.org/10.1027/1618-3169.54.4.289>
- Dormal, V. y Pesenti, M. (2009). Common and specific contributions of the intraparietal sulci to numerosity and length processing. *Human Brain Mapping*, 30(8), 1490-1501 <https://doi.org/10.1002/hbm.20677>
- Dormal, V., Seron, X. y Pesenti, M. (2006). Numerosity-duration interference: A Stroop experiment. *Acta Psychologica*, 121(2), 109–124. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2005.06.003>
- Droit-Volet, S., Turrett, S. y Wearden, J. (2004). Perception of the Duration of Auditory and Visual Stimuli in Children and Adults. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 57(5), 797–818. <https://doi.org/10.1080/02724980343000495>

- Edwards, C. J., Alder, T. B. y Rose, G. J. (2002). Auditory midbrain neurons that count. *Nature Neuroscience*, 5(10), 934–936. <https://doi.org/10.1038/nn916>
- Edwards, C. J., Leary, C. J. y Rose, G. J. (2007). Counting on Inhibition and Rate-Dependent Excitation in the Auditory System. *Journal of Neuroscience*, 27(49), 13384–13392. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2816-07.2007>
- Eger, E., Sterzer, P., Russ, M. O., Giraud, A. L. y Kleinschmidt, A. (2003). A supramodal number representation in human intraparietal cortex. *Neuron*, 37(4), 719-726. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(03\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(03)00036-9)
- Emerson, R. W. y Cantlon, J. F. (2012). Early math achievement and functional connectivity in the fronto-parietal network. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2(1), S139–S151. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2011.11.003>
- Escobar-Magariño, D., Turel, O. y He, Q. (2022). Bilateral Intraparietal Activation for Number Tasks in Studies Using Adaptation Paradigm: A Meta-analysis. *Neuroscience*, 490, 296–308. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2022.02.024>
- Fassi, L. y Cohen Kadosh, R. (2020). Is it all in our head? When subjective beliefs about receiving an intervention are better predictors of experimental results than the intervention itself. *BioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2020.12.06.411850>
- Faye, A., Jacquin-Courtois, S., Reynaud, E., Lesourd, M., Besnard, J. y Osiurak, F. (2019). Numerical cognition: A meta-analysis of neuroimaging, transcranial magnetic stimulation and brain-damaged patients studies. *NeuroImage: Clinical*, 24(102053). <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2019.102053>
- Feigenson, L. (2007). The equality of quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(5), 185–187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.01.006>
- Feigenson, L., Dehaene, S., Spelke, E., Cantlon, J. F., Platt, M. L., Brannon, E. M. y Piazza, M. (2004). Beyond the number domain. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.09.008>
- Fertonani, A., Pirulli, C. y Miniussi, C. (2011). Random noise stimulation improves neuroplasticity in perceptual learning. *Journal of Neuroscience*, 31(43), 15416-15423. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2002-11.2011>

- Fias, W., Lammertyn, J., Reynvoet, B., Dupont, P. y Orban, G. A. (2003). Parietal representation of symbolic and nonsymbolic magnitude. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(1), 47–56. <https://doi.org/10.1162/089892903321107819>
- Fink, G. R., Marshall, J. C., Shah, N. J., Weiss, P. H., Halligan, P. W., Grosse-Ruyken, M., Ziemons, K., Zilles, K. y Freund, H.-J. (2000). Line bisection judgments implicate right parietal cortex and cerebellum as assessed by fMRI. *Neurology*, 54(6), 1324–1331. <https://doi.org/10.1212/WNL.54.6.1324>
- Fornaciai, M., Farrell, A. y Park, J. (2019). Looking for more food or more people? Task context influences basic numerosity perception. *Cortex*, 114, 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.05.021>
- Fresnoza, S., Christova, M., Purgstaller, S., Jehna, M., Zaar, K., Hoffermann, M., Ali, K. M., Koerner, C., Gallasch, E., von Campe, G. y Ischebeck, A. (2020). Dissociating Arithmetic Operations in the Parietal Cortex Using 1 Hz Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation: The Importance of Strategy Use. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00271>
- Fulbright, R. K., Manson, S. C., Skudlarski, P., Lacadie, C. M. y Gore, J. C. (2003). Quantity determination and the distance effect with letters, numbers, and shapes: A functional MR imaging study of number processing. *American Journal of Neuroradiology*, 24(2), 193–200.
- Gallistel y I, G. (2000). Non-verbal numerical cognition: from reals to integers. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(2), 59–65. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(99\)01424-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(99)01424-2)
- Gandiga, P. C., Hummel, F. C. y Cohen, L. G. (2006). Transcranial DC stimulation (tDCS): A tool for double-blind sham-controlled clinical studies in brain stimulation. *Clinical Neurophysiology*, 117(4), 845-850. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2005.12.003>
- Garcia-Sanz, S., Ghotme, K. A., Hedmont, D., Arévalo-Jaimes, M. Y., Cohen Kadosh, R., Serra-Grabulosa, J. M. y Redolar-Ripoll, D. (2022a). Use of transcranial magnetic stimulation for studying the neural basis of numerical cognition: A systematic review. *Journal of Neuroscience Methods*, 369, 109485. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2022.109485>

- García-Sanz, S., Arévalo Jaimes, M.Y., Muñoz Aguilar, N. (2022b) The ability to integrate spatial and numerical quantitative information in children and young adults: a cross-sectional study. *Proceedings Mathematical Cognition and Learning Conference*, Antwerp, 220-231.
- García-Sanz, S., Redolar Ripoll, D., Serra Grabulosa, J.M., (2022c) The effects of anodal transcranial direct current stimulation over right parietal and prefrontal cortices on numerical cognition. *Neuromodulation*, 25 (7) S16. <https://doi.org/10.1016/j.neurom.2022.08.020>
- García Sanz, S. y Hedmont Rojas, D. (2023). Estrategias para la mejora cognitiva. En D. Redolar, *Neurociencia Cognitiva* (2^a Ed.), pp. 837-858. Editorial Médica Panamericana.
- Geary, D. C. y Moore, A. M. (2016). Cognitive and brain systems underlying early mathematical development. *Progress in Brain Research*, 75-103. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2016.03.008>
- Gebuis, T. y Gevers, W. (2011). Numerosities and space; indeed a cognitive illusion! A reply to de Hevia and Spelke (2009). *Cognition*, 121(2), 248–252. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.09.008>
- Gebuis, T., Cohen Kadosh, R. y Gevers, W. (2016). Sensory-integration system rather than approximate number system underlies numerosity processing: A critical review. *Acta Psychologica*, 171, 17–35. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2016.09.003>
- Gebuis, T. y Reynvoet, B. (2011). Generating nonsymbolic number stimuli. *Behavior Research Methods*, 43(4), 981–986. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0097-5>
- Gebuis, T. y Reynvoet, B. (2012a). The Role of Visual Information in Numerosity Estimation. *PLOS ONE*, 7(5), e37426. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0037426>
- Gebuis, T. y Reynvoet, B. (2012b). The interplay between nonsymbolic number and its continuous visual properties. *Journal of Experimental Psychology: General*, 141(4), 642–648. <https://doi.org/10.1037/A0026218>
- Geer, E. A., Quinn, J. M. y Ganley, C. M. (2019). Relations between spatial skills and math performance in elementary school children: A longitudinal investigation.

- Developmental Psychology*, 55(3), 637–652. <https://doi.org/10.1037/DEV0000649>
- Gibson, E. J. (1963). Perceptual Learning. *Annual Review of Psychology*, 14(1), 29–56. <https://doi.org/10.1146/annurev.ps.14.020163.000333>
- Gibson, Eleanor J. (1955). Perceptual learning: Differentiation or enrichment? *Psychological Review*, 62(1), 32–41. <https://doi.org/10.1037/h0048826>
- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., Paus, T., Evans, A. C. y Rapoport, J. L. (1999). Brain development during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. *Nature Neuroscience*, 2(10), 861–863. <https://doi.org/10.1038/13158>
- Gießing, C., Alavash, M., Herrmann, C. S., Hilgetag, C. C. y Thiel, C. M. (2020). Individual differences in local functional brain connectivity affect TMS effects on behavior. *Scientific Reports*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67162-8>
- Giurfa, M. (2019). Honeybees foraging for numbers. *Journal of Comparative Physiology A*, 205(3), 439–450. <https://doi.org/10.1007/s00359-019-01344-2>
- Glickman, M. E., Rao, S. R. y Schultz, M. R. (2014). False discovery rate control is a recommended alternative to Bonferroni-type adjustments in health studies. *Journal of Clinical Epidemiology*, 67(8), 850–857. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2014.03.012>
- Göbel, S. M., Johansen-Berg, H., Behrens, T. y Rushworth, M. F. S. (2004). Response-selection-related parietal activation during number comparison. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(9), 1536–1551. <https://doi.org/10.1162/0898929042568442>
- Göbel, S., Walsh, V. y Rushworth, M. F. (2001). The mental number line and the human angular gyrus. *NeuroImage*, 14(6), 1278–1289. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0927>
- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., Nugent, T. F., Herman, D. H., Clasen, L. S., Toga, A. W., Rapoport, J. L. y Thompson, P. M. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(21), 8174–8179. <https://doi.org/10.1073/pnas.0402680101>

- Gray, S. A. y Reeve, R. A. (2014). Preschoolers' Dot Enumeration Abilities Are Markers of Their Arithmetic Competence. *PLOS ONE*, 9(4), 1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094428>
- Grotheer, M., Ambrus, G. G. y Kovacs, G. (2016). Causal evidence of the involvement of the number form area in the visual detection of numbers and letters. *NEUROIMAGE*, 132, 314–319. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.02.069>
- Guillaume, M., Schiltz, C. y Van Rinsveld, A. (2020). NASCO: A New Method and Program to Generate Dot Arrays for Non-Symbolic Number Comparison Tasks. *Journal of Numerical Cognition*, 6, 129–147. <https://doi.org/10.5964/jnc.v6i1.231>
- Guillaume, M. y Van Rinsveld, A. (2018). Comparing Numerical Comparison Tasks: A Meta-Analysis of the Variability of the Weber Fraction Relative to the Generation Algorithm. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01694>
- Gunderson, E. A., Ramirez, G., Beilock, S. L. y Levine, S. C. (2012). The relation between spatial skill and early number knowledge: the role of the linear number line. *Developmental Psychology*, 48(5), 1229–1241. <https://doi.org/10.1037/a0027433>
- Guzmán, R. J. y García Sanz, S. (2022). *La observacion del desarrollo infantil orientacion para educadores*. Universidad de La Sabana. ISBN: 9789581206100.
- Halberda, J. y Feigenson, L. (2008). Developmental Change in the Acuity of the “Number Sense”: The Approximate Number System in 3-, 4-, 5-, and 6-Year-Olds and Adults. *Developmental Psychology*, 44(5), 1457–1465. <https://doi.org/10.1037/A0012682>
- Halberda, J., Ly, R., Wilmer, J. B., Naiman, D. Q. y Germine, L. (2012). Number sense across the lifespan as revealed by a massive Internet-based sample. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1200196109>
- Halberda, J., Mazocco, M. M. M. y Feigenson, L. (2008). Individual differences in non-verbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, 475 (7213) 665–668. <https://doi.org/10.1038/nature07246>
- Hamamouche, K. y Cordes, S. (2019). Number, time, and space are not singularly represented: Evidence against a common magnitude system beyond early childhood.

Psychonomic Bulletin and Review, 26(3), 833–854). <https://doi.org/10.3758/s13423-018-1561-3>

Harris, J. A., Clifford, C. W. G. y Miniussi, C. (2008). The Functional Effect of Transcranial Magnetic Stimulation: Signal Suppression or Neural Noise Generation? *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(4), 734–740. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20048>

Hartmann, M., Singer, S., Savic, B., Muri, R. M. y Mast, F. W. (2020). Anodal High-definition Transcranial Direct Current Stimulation over the Posterior Parietal Cortex Modulates Approximate Mental Arithmetic. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 32(5), 862–876. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01514

Hartwigsen, G., Bergmann, T. O., Herz, D. M., Angstmann, S., Karabanov, A., Raffin, E., Thielscher, A. y Siebner, H. R. (2015a). Modeling the effects of noninvasive transcranial brain stimulation at the biophysical, network, and cognitive Level. In S Bestmann (Ed.), *COMPUTATIONAL NEUROSTIMULATION* (Vol. 222, pp. 261–287). ELSEVIER SCIENCE BV. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2015.06.014>

Hauser, M. D., Carey, S. y Hauser, L. B. (2000). Spontaneous number representation in semi-free ranging rhesus monkeys. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 267(1445), 829–833. <https://doi.org/10.1098/rspb.2000.1078>

Hauser, T. U., Rotzer, S., Grabner, R. H., Merillat, S. y Jaencke, L. (2013). Enhancing performance in numerical magnitude processing and mental arithmetic using transcranial Direct Current Stimulation (tDCS). *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00244>

Hauser, T. U., Rutsche, B., Wurmitzer, K., Brem, S., Ruff, C. C. y Grabner, R. H. (2016). Neurocognitive Effects of Transcranial Direct Current Stimulation in Arithmetic Learning and Performance: A Simultaneous tDCS-fMRI Study. *Brain Stimulation*, 9(6), 850–858. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.07.007>

Hawes, Z. y Ansari, D. (2020). What explains the relationship between spatial and mathematical skills? A review of evidence from brain and behavior. *Psychonomic Bulletin and Review*, 27(3), 465–482. <https://doi.org/10.3758/s13423-019-01694-7>

Hawes, Z., Moss, J., Caswell, B., Seo, J. y Ansari, D. (2019a). Relations between

- numerical, spatial, and executive function skills and mathematics achievement: A latent-variable approach. *Cognitive Psychology*, *109*, 68–90. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2018.12.002>
- Hawes, Z., Sokolowski, H. M., Ononye, C. B. y Ansari, D. (2019b). Neural Underpinnings of Numerical and Spatial Cognition: An fMRI Meta-Analysis of Brain Regions Associated with Symbolic Number, Arithmetic, and Mental Rotation. *Neuroscience y Biobehavioral Reviews*, *103*, 316–336. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.05.007>
- Hayashi, M. J., Kanai, R., Tanabe, H. C., Yoshida, Y., Carlson, S., Walsh, V. y Sadato, N. (2013). Interaction of Numerosity and Time in Prefrontal and Parietal Cortex. *Journal of Neuroscience*, *33*(3), 883–893. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.6257-11.2013>
- Henik, A., Gliksman, Y., Kallai, A. y Leibovich, T. (2017). Size Perception and the Foundation of Numerical Processing. *Current Directions in Psychological Science*, *26*(1), 45–51. <https://doi.org/10.1177/0963721416671323>
- Henik, A., Leibovich, T., Naparstek, S., Diesendruck, L. y Rubinsten, O. (2012). Quantities, amounts, and the numerical core system. *Frontiers in Human Neuroscience*, *5*(186). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00186>
- Henik, A. y Tzelgov, J. (1982). Is three greater than five: The relation between physical and semantic size in comparison tasks. *Memory y Cognition*, *10*(4), 389–395. <https://doi.org/10.3758/BF03202431>
- Hinault, T., Larcher, K., Zazubovits, N., Gotman, J. y Dagher, A. (2019). Spatio-temporal patterns of cognitive control revealed with simultaneous electroencephalography and functional magnetic resonance imaging. *Human Brain Mapping*, *40*(1), 80–97. <https://doi.org/10.1002/hbm.24356>
- Holloway, I. D. y Ansari, D. (2009). Mapping numerical magnitudes onto symbols: The numerical distance effect and individual differences in children's mathematics achievement. *Journal of Experimental Child Psychology*, *103*(1), 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.04.001>
- Holloway, I. D., Price, G. R. y Ansari, D. (2010). Common and segregated neural pathways for the processing of symbolic and nonsymbolic numerical magnitude: an

- fMRI study. *NeuroImage*, 49(1), 1006–1017.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.07.071>
- Honey, C. J., Sporns, O., Cammoun, L., Gigandet, X., Thiran, J. P., Meuli, R. y Hagmann, P. (2009). Predicting human resting-state functional connectivity from structural connectivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(6), 2035–2040.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0811168106>
- Houdé, O. y Guichart, E. (2001). Negative priming effect after inhibition of number/length interference in a Piaget-like task. *Developmental Science*, 4(1), 119–123. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1467-7687.00156>
- Houdé, O., Pineau, A., Leroux, G., Poirel, N., Perchey, G., Lanoë, C., Lubin, A., Turbelin, M.-R., Rossi, S., Simon, G., Delcroix, N., Lamberton, F., Vigneau, M., Wisniewski, G., Vicet, J.-R. y Mazoyer, B. (2011). Functional magnetic resonance imaging study of Piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children: A neo-Piagetian approach. *Journal of Experimental Child Psychology*, 110(3), 332–346. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.04.008>
- Houser, R., Thoma, S., Fonseca, D., O'Conner, E. y Stanton, M. (2015). Enhancing statistical calculation with transcranial direct current stimulation (tDCS) to the left intra-parietal sulcus (IPS). *Trends in Neuroscience and Education*, 4(4), 98–101.
<https://doi.org/10.1016/j.tine.2015.07.002>
- Huang, H.-W., Nascimben, M., Fong, D.-Y., Tzeng, O. J. L. y Huang, C.-M. (2019). Brain signature of subjective performance during numerical Stroop tasks. *Psychophysiology*, 56(1), S73.
- Huang, Y.-Z., Lu, M.-K., Antal, A., Classen, J., Nitsche, M., Ziemann, U., Ridding, M., Hamada, M., Ugawa, Y., Jaberzadeh, S., Suppa, A., Paulus, W. y Rothwell, J. (2017). Plasticity induced by non-invasive transcranial brain stimulation: A position paper. *Clinical Neurophysiology*, 128(11), 2318–2329.
<https://doi.org/10.1016/j.clinph.2017.09.007>
- Huang, Y. Z., Edwards, M. J., Rounis, E., Bhatia, K. P. y Rothwell, J. C. (2005). Theta burst stimulation of the human motor cortex. *Neuron*, 45(2), 201–206
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.12.033>
- Hubbard, E. M., Piazza, M., Pinel, P. y Dehaene, S. (2005). Interactions between number

- and space in parietal cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(6), 435–448. <https://doi.org/10.1038/nrn1684>
- Huettel, S. A. (2012). Event-related fMRI in cognition. *NeuroImage*, 62(2), 1152–1156. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.08.113>
- Hurewitz, F., Gelman, R. y Schnitzer, B. (2006). Sometimes area counts more than number. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(51), 19599–19604. <https://doi.org/10.1073/pnas.0609485103>
- Hurst, M., Anderson, U. y Cordes, S. (2017). Mapping Among Number Words, Numerals, and Nonsymbolic Quantities in Preschoolers. *Journal of Cognition and Development*, 18(1), 41–62. <https://doi.org/10.1080/15248372.2016.1228653>
- Huttenlocher, P. R. y Dabholkar, A. S. (1997). Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *The Journal of Comparative Neurology*, 387(2), 167–178.
- Hyde, D. C. y Spelke, E. S. (2011). Neural signatures of number processing in human infants: evidence for two core systems underlying numerical cognition. *Developmental Science*, 14(2), 360–371. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.00987.x>
- Izard, V. R., Sann, C., Spelke, E. S. y Streri, A. (2009). Newborn infants perceive abstract numbers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(25), 10382–10385. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812142106>
- Jang, S. y Cho, S. (2018). The mediating role of number-to-magnitude mapping precision in the relationship between approximate number sense and math achievement depends on the domain of mathematics and age. *Learning and Individual Differences*, 64, 113–124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lindif.2018.05.005>
- Javadi, A. H., Brunec, I. K., Walsh, V., Penny, W. D. y Spiers, H. J. (2014). Transcranial electrical brain stimulation modulates neuronal tuning curves in perception of numerosity and duration. *NeuroImage*, 102(2), 451–457. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.08.016>
- Jiménez Lira, C., Carver, M., Douglas, H. y LeFevre, J.-A. (2017). The integration of symbolic and non-symbolic representations of exact quantity in preschool children.

- Cognition*, 166, 382–397.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cognition.2017.05.033>
- Johnson, M. H. (2001). Functional brain development in humans. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(7), 475–483. <https://doi.org/10.1038/35081509>
- Karolis, V. R., Grinyaev, M., Epure, A., Tsoy, V., Du Rietz, E., Banissy, M. J., Cappelletti, M. y Kovas, Y. (2019). Probing the architecture of visual number sense with parietal tRNS. *Cortex*, 114(SI), 54–66.
<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.08.030>
- Kasahara, K., Tanaka, S., Hanakawa, T., Senoo, A. y Honda, M. (2013). Lateralization of activity in the parietal cortex predicts the effectiveness of bilateral transcranial direct current stimulation on performance of a mental calculation task. *Neuroscience Letters*, 545, 86–90. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2013.04.022>
- Kaufmann, L., Ischebeck, A., Weiss, E., Koppelstaetter, F., Siedentopf, C., Vogel, S. E., Gotwald, T., Marksteiner, J. y Wood, G. (2008b). An fMRI study of the numerical Stroop task in individuals with and without minimal cognitive impairment. *Cortex*, 44(9), 1248–1255. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.11.009>
- Kaufmann, L., Koppelstaetter, F., Delazer, M., Siedentopf, C., Rhomberg, P., Golaszewski, S., Felber, S. y Ischebeck, A. (2005). Neural correlates of distance and congruity effects in a numerical Stroop task: an event-related fMRI study. *NeuroImage*, 25(3), 888–898.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.12.041>
- Kaufmann, L., Kucian, K. y von Aster, M. (2015). Development of the numerical brain. In *The Oxford handbook of numerical cognition*. OUP.
<https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199642342.013.008>
- Kaufmann, L. y Nuerk, H.-C. (2006). Interference effects in a numerical stroop paradigm in 9-to 12-year-old children with ADHD-C. *Child Neuropsychology*, 12(3), 223–243. <https://doi.org/10.1080/09297040500477483>
- Kaufmann, L., Vogel, S. E., Wood, G., Kremser, C., Schocke, M., Zimmerhackl, L.-B. y Koten, J. W. (2008a). A developmental fMRI study of nonsymbolic numerical and spatial processing. *Cortex*, 44(4), 376–385.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.003>

- Kersey, A. J. y Cantlon, J. F. (2017). Neural tuning to numerosity relates to perceptual tuning in 3– 6-year-old children. *Journal of Neuroscience*, 37(3), 512–522. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0065-16.2016>
- Kim, N., Jang, S. y Cho, S. (2018). Testing the Efficacy of Training Basic Numerical Cognition and Transfer Effects to Improvement in Children's Math Ability. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01775>
- Klein, E., Mann, A., Huber, S., Bloechle, J., Willmes, K., Karim, A. A., Nuerk, H.-C. y Moeller, K. (2013). Bilateral Bi-Cephalic Tdcs with Two Active Electrodes of the Same Polarity Modulates Bilateral Cognitive Processes Differentially. *PloS One*, 8(8), e71607. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071607>
- Klichowski, M. y Krolczak, G. (2020). Mental shopping calculations: A transcranial magnetic stimulation study. *Frontiers in Psychology*, 11(1930), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01930>
- Knops, A. (2019). *Numerical cognition. The basics*. Routledge.
- Krause, B. y Cohen Kadosh, R. (2013). Can transcranial electrical stimulation improve learning difficulties in atypical brain development? A future possibility for cognitive training. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 6, 176–194. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dcn.2013.04.001>
- Kucian, K., Ashkenazi, S. S. chwize., Hänggi, J., Rotzer, S., Jäncke, L., Martin, E. y von Aster, M. (2014). Developmental dyscalculia: a dysconnection syndrome? *Brain Structure y Function*, 219, 1721–1733. <https://doi.org/10.1007/s00429-013-0597-4>
- Kuo, H.-I., Bikson, M., Datta, A., Minhas, P., Paulus, W., Kuo, M.-F. y Nitsche, M. A. (2013). Comparing Cortical Plasticity Induced by Conventional and High-Definition 4 × 1 Ring tDCS: A Neurophysiological Study. *Brain Stimulation*, 6(4), 644–648. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.brs.2012.09.010>
- Kuo, M.-F. y Nitsche, M. A. (2012). Effects of Transcranial Electrical Stimulation on Cognition. *Clinical EEG and Neuroscience*, 43(3), 192–199. <https://doi.org/10.1177/1550059412444975>
- Lazic, S.E. (2018) Four simple ways to increase power without increasing the sample size. *Laboratory Animals*, 52(6),621-629. <https://doi:10.1177/0023677218767478>

- Lecce, F., Walsh, V., Didino, D. y Cappelletti, M. (2015). 'How many' and 'how much' dissociate in the parietal lobe. *Cortex*, 73, 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.08.007>
- LeFevre, J.-A. (2016). Numerical cognition: Adding it up. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 70(1), 3–11. <https://doi.org/10.1037/cep0000062>
- Lefevre, J. A., Fast, L., Skwarchuk, S. L., Smith-Chant, B. L., Bisanz, J., Kamawar, D. y Penner-Wilger, M. (2010). Pathways to Mathematics: Longitudinal Predictors of Performance. *Child Development*, 81(6), 1753-1767. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01508.x>
- Leibovich, T., Diesendruck, L., Rubinsten, O. y Henik, A. (2013). The importance of being relevant: modulation of magnitude representations. *Frontiers in Psychology*, 4, 369. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00369>
- Leibovich, T. y Henik, A. (2013). Magnitude processing in non-symbolic stimuli. *Frontiers in Psychology*, 4, 375. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00375>
- Leibovich, T. y Henik, A. (2014). Comparing performance in discrete and continuous comparison tasks. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67(5), 899–917. <https://doi.org/10.1080/17470218.2013.837940>
- Leibovich, T., Kadhim, S. A.-R. y Ansari, D. (2017b). Beyond comparison: The influence of physical size on number estimation is modulated by notation, range and spatial arrangement. *Acta Psychologica*, 175, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2017.02.004>
- Leibovich, T., Katzin, N., Harel, M. y Henik, A. (2017a). From “sense of number” to “sense of magnitude”: The role of continuous magnitudes in numerical cognition. *Behavioral and Brain Sciences*, 40, e164 <https://doi.org/10.1017/S0140525X16000960>
- Leon, M. I. y Shadlen, M. N. (2003). Representation of Time by Neurons in the Posterior Parietal Cortex of the Macaque. *Neuron*, 38(2), 317–327. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(03\)00185-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0896-6273(03)00185-5)
- Li, L. M., Leech, R., Scott, G., Malhotra, P., Seemungal, B. y Sharp, D. J. (2015). The

- effect of oppositional parietal transcranial direct current stimulation on lateralized brain functions. *European Journal of Neuroscience*, 42(11), 2904–2914. <https://doi.org/10.1111/ejn.13086>
- Li Voti, P., Conte, A., Suppa, A., Iezzi, E., Bologna, M., Aniello, M. S., Defazio, G., Rothwell, J. C. y Berardelli, A. (2011). Correlation between cortical plasticity, motor learning and BDNF genotype in healthy subjects. *Experimental Brain Research*, 212(1), 91–99. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2700-5>
- Libertus, M. E., Feigenson, L., Halberda, J. y Landau, B. (2014). Understanding the mapping between numerical approximation and number words: Evidence from Williams syndrome and typical development. *Developmental Science*, 17(6), 905–919. <https://doi.org/10.1111/desc.12154>
- Libertus, M. E., Odic, D., Feigenson, L. y Halberda, J. (2016). The precision of mapping between number words and the approximate number system predicts children's formal math abilities. *Journal of Experimental Child Psychology*, 150, 207–226. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2016.06.003>
- Liebetanz, D., Nitsche, M. A., Tergau, F. y Paulus, W. (2002). Pharmacological approach to the mechanisms of transcranial DC-stimulation-induced after-effects of human motor cortex excitability. *Brain*, 125(10), 2238–2247. <https://doi.org/10.1093/brain/awf238>
- Lipton, J. S. y Spelke, E. S. (2003). Origins of Number Sense: Large-Number Discrimination in Human Infants. *Psychological Science*, 14(5), 396–401. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.01453>
- Looi, C. Y. y Kadosh, R. C. (2016). Brain stimulation, mathematical, and numerical training: Contribution of core and noncore skills. In M Cappelletti y W. Fias (Eds.), *Mathematical Brain Across the Lifespan* (Vol. 227, pp. 353–388). ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2016.04.009>
- Lourenco, S.F., Bonny, J.W., Fernandez, E. P. y Rao, S. (2012). Nonsymbolic number and cumulative area representations contribute shared and unique variance to symbolic math competence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(46), 18737–18742. <https://doi.org/10.1073/pnas.1207212109>

- Lourenco, S.F. y Bonny, J. W. (2017). Representations of numerical and non-numerical magnitude both contribute to mathematical competence in children. *Developmental Science*, 20(4), e12418. <https://doi.org/10.1111/desc.12418>
- Lourenco, S.F y Longo, M. R. (2009). Multiple spatial representations of number: evidence for co-existing compressive and linear scales. *EXPERIMENTAL BRAIN RESEARCH*, 193(1), 151–156. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1698-9>
- Lourenco, S.F y Longo, M. R. (2011). Chapter 15 - Origins and Development of Generalized Magnitude Representation. In Stanislas Dehaene y E. M. Brannon (Eds.), *Space, Time and Number in the Brain* (pp. 225–244). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385948-8.00015-3>
- Luft, C. D. B., Zioga, I., Banissy, M. J. y Bhattacharya, J. (2017). Relaxing learned constraints through cathodal tDCS on the leftdorsolateral prefrontal cortex. *Scientific Reports*, 7(1) 1224-1237. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03022-2>
- Lyons, I M, Vogel, S. E. y Ansari, D. (2016). On the ordinality of numbers: A review of neural and behavioral studies. *Progress in Brain Research*, 227, 187–221. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2016.04.010>
- Lyons, I.M. y Ansari, D. (2015). Foundations of Children’s Numerical and Mathematical Skills. *Advances in child development and behavior*, 48, 93–116. <https://doi.org/10.1016/bs.acdb.2014.11.003>
- Lyons, I. M., Bugden, S., Zheng, S., De Jesus, S. y Ansari, D. (2018). Symbolic number skills predict growth in nonsymbolic number skills in kindergarteners. *Developmental Psychology*, 54(3), 440–457. <https://doi.org/10.1037/dev0000445>
- Lyons, Ian M, Ansari, D. y Beilock, S. L. (2012). Symbolic estrangement: Evidence against a strong association between numerical symbols and the quantities they represent. *Journal of Experimental Psychology*, 141(4), 635–641. A <https://doi.org/10.1037/a0027248>
- MaBouDi, H., Galpayage Dona, H. S., Gatto, E., Loukola, O. J., Buckley, E., Onoufriou, P. D., Skorupski, P. y Chittka, L. (2020). Bumblebees Use Sequential Scanning of Countable Items in Visual Patterns to Solve Numerosity Tasks. *Integrative and Comparative Biology*, 60(4), 929–942. <https://doi.org/10.1093/icb/icaa025>

- Madsen, K. H., Ewald, L., Siebner, H. R. y Thielscher, A. (2015). Transcranial Magnetic Stimulation: An Automated Procedure to Obtain Coil-specific Models for Field Calculations. *Brain Stimulation*, 8(6), 1205–1208. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2015.07.035>
- Malone, S. A., Heron-Delaney, M., Burgoyne, K. y Hulme, C. (2019). Learning correspondences between magnitudes, symbols and words: Evidence for a triple code model of arithmetic development. *Cognition*, 187, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.11.016>
- Marchant, A. P., Simons, D. J. y de Fockert, J. W. (2013). Ensemble representations: Effects of set size and item heterogeneity on average size perception. *Acta Psychologica*, 142(2), 245–250. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2012.11.002>
- Marinova, M., Sasanguie, D. y Reynvoet, B. (2018). Symbolic estrangement or symbolic integration of numerals with quantities: Methodological pitfalls and a possible solution. *PLoS ONE*, 13(7), 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200808>
- Maurer, S., Tanigawa, N., Sollmann, N., Hauck, T., Ille, S., Boeckh-Behrens, T., Meyer, B. y Krieg, S. M. (2016). Non-invasive mapping of calculation function by repetitive navigated transcranial magnetic stimulation. *Brain Structure y Function*, 221(8), 3927–3947. <https://doi.org/10.1007/s00429-015-1136-2>
- Mazzocco, M. , Feigenson, L. y Halberda, J. (2011). Impaired acuity of the approximate number system underlies mathematical learning disability (dyscalculia). *Child Development*, 82(4) 1224-1237. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2011.01608.x>
- McCloskey, M. (1992). Cognitive mechanisms in numerical processing: evidence from acquired dyscalculia. *Cognition*, 44(1–2), 107–157. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90052-j](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90052-j)
- McCrink, K., Dehaene, S. y Dehaene-Lambertz, G. (2007). Moving along the number line: Operational momentum in nonsymbolic arithmetic. *Perception y Psychophysics*, 69(8), 1324–1333. <https://doi.org/10.3758/BF03192949>
- Menon, V. (2016). Memory and cognitive control circuits in mathematical cognition and learning. *Progress in Brain Research*, 227, 159–186. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2016.04.026>

- Merkley, R. y Ansari, D. (2016). Why numerical symbols count in the development of mathematical skills: Evidence from brain and behavior. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *10*, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.04.006>
- Messina, A., Potrich, D., Schiona, I., Sovrano, V. A., Fraser, S. E., Brennan, C. H. y Vallortigara, G. (2020). Response to change in the number of visual stimuli in zebrafish: A behavioural and molecular study. *Scientific Reports*, *10*(1), 5769. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62608-5>
- Messina, A., Potrich, D., Schiona, I., Sovrano, V. A., Fraser, S. E., Brennan, C. H. y Vallortigara, G. (2022). Neurons in the dorso-central division of zebrafish pallium respond to change in visual numerosity. *Cerebral Cortex*, *32*(2), 418–428. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/cercor/bhab218>
- Mishkin, M., Ungerleider, L. G. y Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in Neurosciences*, *6*, 414–417. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0166-2236\(83\)90190-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0166-2236(83)90190-X)
- Mix, K. S., Huttenlocher, J., y Levine, S. C. (2002). *Quantitative development in infancy and early childhood*. Oxford University Press.
- Mix, K. S. y Cheng, Y.-L. (2012). Chapter 6 - *The Relation Between Space and Math: Developmental and Educational Implications* (In J. B. Benson (ed.); Vol. 42, pp. 197–243). JAI. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394388-0.00006-X>
- Moeller, K., Willmes, K. y Klein, E. (2015). A review on functional and structural brain connectivity in numerical cognition. *Frontiers in Human Neuroscience*, *9*, 227. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00227>
- Montefinese, M., Turco, C., Piccione, F. y Semenza, C. (2017). Causal role of the posterior parietal cortex for two-digit mental subtraction and addition: A repetitive TMS study. *NeuroImage*, *155*, 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.04.058>
- Mori, F., Ljoka, C., Magni, E., Codecà, C., Kusayanagi, H., Monteleone, F., Sancesario, A., Bernardi, G., Koch, G., Foti, C. y Centonze, D. (2011). Transcranial magnetic stimulation primes the effects of exercise therapy in multiple sclerosis. *Journal of Neurology*, *258*(7), 1281–1287. <https://doi.org/10.1007/s00415-011-5924-1>

- Mosbacher, J. A., Brunner, C., Nitsche, M. A. y Grabner, R. H. (2020). Effects of Anodal tDCS on Arithmetic Performance and Electrophysiological Activity. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00017>
- Mosbacher, J. A., Halverscheid, S., Pustelnik, K., Danner, M., Prassl, C., Brunner, C., Vogel, S. E., Nitsche, M. A. y Grabner, R. H. (2021). Theta Band Transcranial Alternating Current Stimulation Enhances Arithmetic Learning: A Systematic Comparison of Different Direct and Alternating Current Stimulations. *Neuroscience*, 477, 89–105. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2021.10.006>
- Müller-Dahlhaus, J. F. M., Orekhov, Y., Liu, Y. y Ziemann, U. (2008). Interindividual variability and age-dependency of motor cortical plasticity induced by paired associative stimulation. *Experimental Brain Research*, 187(3), 467–475. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1319-7>
- Mundy, E. y Gilmore, C. K. (2009). Children’s mapping between symbolic and nonsymbolic representations of number. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(4), 490-502. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.02.003>
- Nettekoven, C., Volz, L. J., Leimbach, M., Pool, E.-M., Rehme, A. K., Eickhoff, S. B., Fink, G. R. y Grefkes, C. (2015). Inter-individual variability in cortical excitability and motor network connectivity following multiple blocks of rTMS. *NeuroImage*, 118, 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.06.004>
- Nieder, A. (2020). The Adaptive Value of Numerical Competence. *Trends in Ecology y Evolution*, 35(7), 605–617. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tree.2020.02.009>
- Nieder, A. (2021). Neuroethology of number sense across the animal kingdom. *Journal of Experimental Biology*, 224(6), 1–15. <https://doi.org/10.1242/jeb.218289>
- Nieder, A. y Miller, E. K. (2004). A parieto-frontal network for visual numerical information in the monkey. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(19), 7457–7462. <https://doi.org/10.1073/pnas.0402239101>
- Nitsche, M. A., Doemkes, S., Karaköse, T., Antal, A., Liebetanz, D., Lang, N., Tergau, F. y Paulus, W. (2007). Shaping the effects of transcranial direct current stimulation of the human motor cortex. *Journal of Neurophysiology*, 97(4), 3109-3117.

<https://doi.org/10.1152/jn.01312.2006>

- Nitsche, M. A., Niehaus, L., Hoffmann, K. T., Hengst, S., Liebetanz, D., Paulus, W. y Meyer, B. U. (2004). MRI study of human brain exposed to weak direct current stimulation of the frontal cortex. *Clinical Neurophysiology*, 115(10), 2419-2423. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2004.05.001>
- Nitsche, M. A. y Paulus, W. (2000). Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation. *Journal of Physiology*, 527, 633–639. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2000.t01-1-00633.x>
- Nitsche, M.A., Nitsche, M. S., Klein, C. C., Tergau, F., Rothwell, J. C. y Paulus, W. (2003). Level of action of cathodal DC polarisation induced inhibition of the human motor cortex. *Clinical Neurophysiology*, 114(4) 600-604. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(02\)00412-1](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00412-1)
- Nitsche, Michael A., Seeber, A., Frommann, K., Klein, C. C., Rochford, C., Nitsche, M. S., Fricke, K., Liebetanz, D., Lang, N., Antal, A., Paulus, W. y Tergau, F. (2005). Modulating parameters of excitability during and after transcranial direct current stimulation of the human motor cortex. *Journal of Physiology*, 568(1), 291-303. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2005.092429>
- Nitsche, Michael A, Cohen, L. G., Wassermann, E. M., Priori, A., Lang, N., Antal, A., Paulus, W., Hummel, F., Boggio, P. S., Fregni, F. y Pascual-Leone, A. (2008). Transcranial direct current stimulation: State of the art 2008. *Brain Stimulation*, 1(3), 206-223. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2008.06.004>
- Norris, J. E., Clayton, S., Gilmore, C., Inglis, M. y Castronovo, J. (2018). The measurement of approximate number system acuity across the lifespan is compromised by congruency effects. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 72(5), 1037–1046. <https://doi.org/10.1177/1747021818779020>
- Nosworthy, N., Bugden, S., Archibald, L., Evans, B. y Ansari, D. (2013). A Two-Minute Paper-and-Pencil Test of Symbolic and Nonsymbolic Numerical Magnitude Processing Explains Variability in Primary School Children’s Arithmetic Competence. *PLOS ONE*, 8(7), e67918. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0067918>
- Núñez, R. E. (2017). Is There Really an Evolved Capacity for Number? *Trends in*

- Cognitive Sciences*, 21(6), 409–424. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2017.03.005>
- Nys, J., Ventura, P., Fernandes, T., Querido, L., Leybaert, J. y Content, A. (2013). Does math education modify the approximate number system? A comparison of schooled and unschooled adults. *Trends in Neuroscience and Education*, 2(1), 13–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tine.2013.01.001>
- O'Shea, J. y Walsh, V. (2007). Transcranial magnetic stimulation. *Current Biology*, 17(6), R196-R199. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.01.030>
- Obeso, I., Robles, N., Marrón, E. M. y Redolar-Ripoll, D. (2013). Dissociating the Role of the pre-SMA in Response Inhibition and Switching: A Combined Online and Offline TMS Approach. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 150. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00150>
- OCDE. (2015). *PISA 2015 Resultados Clave*. OCDE. OCDE.
- Odic, D. (2018). Children's intuitive sense of number develops independently of their perception of area, density, length, and time. *Developmental Science*, 21(2), e12533. <https://doi.org/10.1111/desc.12533>
- Odic, D., Lisboa, J. V., Eisinger, R., Olivera, M. G., Maiche, A. & Halberda, J. (2016). Approximate number and approximate time discrimination each correlate with school math abilities in young children. *Acta Psychologica*, 163, 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.10.010>
- Odic, D., Le Corre, M. y Halberda, J. (2015). Children's mappings between number words and the approximate number system. *Cognition*, 138, 102–121. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.01.008>
- Odic, D., Libertus, M. E., Feigenson, L. y Halberda, J. (2013). Developmental change in the acuity of approximate number and area representations. *Developmental Psychology*, 49(6), 1103–1112. <https://doi.org/10.1037/a0029472>
- OECD. (2003). *The PISA 2003 assessment framework. Mathematics, reading, science and problem solving knowledge and skills*. OECD.
- OECD. (2019). *Mathematics performance (PISA) (indicator)*. <https://doi.org/doi:%0A10.1787/04711c74-en>

- Okamoto, M., Dan, H., Sakamoto, K., Takeo, K., Shimizu, K., Kohno, S., Oda, I., Isobe, S., Suzuki, T., Kohyama, K. y Dan, I. (2004). Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10–20 system oriented for transcranial functional brain mapping. *NeuroImage*, 21(1), 99–111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.08.026>
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97–113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Oliveri, M., Vicario, C. M., Salerno, S., Koch, G., Turriziani, P., Mangano, R., Chillemi, G. y Caltagirone, C. (2008). Perceiving numbers alters time perception. *Neuroscience Letters*, 438(3), 308–311. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2008.04.051>
- Oudgenoeg-Paz, O. y Mulder, H. (2021). A perception-action approach to the early development of spatial cognition: The importance of active exploration. *Enfance*, 1, 37–50.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372(71), 1–9. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pahl, M., Si, A. y Zhang, S. (2013). Numerical Cognition in Bees and Other Insects. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00162>
- Papalia, D. E., Feldman, R. D. y Martorell, G. (2012). *Desarrollo Humano*. McGraw-Hill.
- Park, J. (2021). Flawed stimulus design in additive-area heuristic studies. *Cognition*, 104919. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cognition.2021.104919>
- Park, J., Li, R. y Brannon, E. M. (2014). Neural connectivity patterns underlying symbolic number processing indicate mathematical achievement in children. *Developmental Science*, 17(2), 187-202. <https://doi.org/10.1111/desc.12114>

- Park, J., Park, D. C. y Polk, T. A. (2013). Parietal functional connectivity in numerical cognition. *Cerebral Cortex*, 23(9) 2127-2135. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs193>
- Parkin, B. L., Ekhtiari, H. y Walsh, V. F. (2015). Non-invasive Human Brain Stimulation in Cognitive Neuroscience: A Primer. *Neuron*, 87(5), 932–945. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.07.032>
- Pascual-Leone, A., Bartres-Faz, D. y Keenan, J. P. (1999). Transcranial magnetic stimulation: Studying the brain-behaviour relationship by induction of “virtual lesions.” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 354(1387), 1229–1238. <https://doi.org/10.1098/rstb.1999.0476>
- Pascual-Leone, A., Walsh, V. y Rothwell, J. (2000). Transcranial magnetic stimulation in cognitive neuroscience - Virtual lesion, chronometry, and functional connectivity. *Current Opinion in Neurobiology*, 10(2), 232–237. [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(00\)00081-7](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(00)00081-7)
- Pasqualotto, A. (2016). Transcranial random noise stimulation benefits arithmetic skills. *Neurobiology of Learning and Memory*, 133, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2016.05.004>
- Paulus, W. (2011). Transcranial electrical stimulation (tES - tDCS; tRNS, tACS) methods. *Neuropsychological Rehabilitation*, 21(5), 602–617. <https://doi.org/10.1080/09602011.2011.557292>
- Paulus, W., Nitsche, M. A. y Antal, A. (2016). Application of Transcranial Electric Stimulation (tDCS, tACS, tRNS). *European Psychologist*, 21(1), 4–14. <https://doi.org/10.1027/1016-9040/a000242>
- Peña, J., Sampedro, A., Gomez-Gastiasoro, A., Ibarretxe-Bilbao, N., Zubiaurre-Elorza, L., Aguiar, C. y Ojeda, N. (2021). The effect of changing the balance between right and left dorsolateralprefrontal cortex on different creativity tasks: A transcranial random noise stimulation study. *Journal of Creative Behavior*, 55(4), 899–915. <https://doi.org/10.1002/jocb.496>
- Pereira, J. B., Junqué, C., Bartrés-Faz, D., Martí, M. J., Sala-Llonch, R., Compta, Y., Falcón, C., Vendrell, P., Pascual-Leone, Á., Valls-Solé, J. & Tolosa, E. (2013). Modulation of verbal fluency networks by transcranial direct current stimulation (tDCS) in Parkinson’s disease. *Brain Stimulation*, 6(1), 16–24.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.brs.2012.01.006>

- 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>
- Piaget, J. (1969). *El nacimiento de la inteligencia en el niño*. Aguilar.
- Piaget, J. y Szeminska, A. (1941). *La genèse du nombre chez l'enfant*. Neuchatel.
- Piazza, M. (2010). Neurocognitive start-up tools for symbolic number representations. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(12), 542–551. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.09.008>
- Piazza, M., De Feo, V., Panzeri, S. y Dehaene, S. (2018). Learning to focus on number. *Cognition*, 181, 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.07.011>
- Piazza, M., Facoetti, A., Trussardi, A. N., Berteletti, I., Conte, S., Lucangeli, D., Dehaene, S. y Zorzi, M. (2010). Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia. *Cognition*, 116(1), 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.03.012>
- Piazza, M. y Izard, V. (2009). How Humans Count: Numerosity and the Parietal Cortex. *Neuroscientist*, 15(3), 261–273. <https://doi.org/10.1177/1073858409333073>
- Piazza, M., Izard, V., Pinel, P., Le Bihan, D. y Dehaene, S. (2004). Tuning curves for approximate numerosity in the human intraparietal sulcus. *Neuron*, 44(3), 547–555. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.10.014>
- Piazza, M., Pica, P., Izard, V., Spelke, E. S. y Dehaene, S. (2013). Education Enhances the Acuity of the Nonverbal Approximate Number System. *Psychological Science*, 24(6), 1037–1043. <https://doi.org/10.1177/0956797612464057>
- Pica, P., Lemer, C., Izard, V. y Dehaene, S. (2004). Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group. *Science*, 306(5695), 499–503. <https://doi.org/10.1126/science.1102085>
- Pinel, P., Piazza, M., Le Bihan, D. y Dehaene, S. (2004). Distributed and Overlapping Cerebral Representations of Number, Size, and Luminance during Comparative Judgments. *Neuron*, 41(6), 983–993. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0896->

6273(04)00107-2

- Pitcher, D., Parkin, B. y Walsh, V. (2021). Transcranial Magnetic Stimulation and the Understanding of Behavior. *Annual Review of Psychology*, *72*(1), 97–121. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-081120-013144>
- Pitcher, J. B., Ogston, K. M. y Miles, T. S. (2003). Age and sex differences in human motor cortex input–output characteristics. *The Journal of Physiology*, *546*(2), 605. <https://doi.org/10.1113/JPHYSIOL.2002.029454>
- Platt, J. R. y Johnson, D. M. (1971). Localization of position within a homogeneous behavior chain: Effects of error contingencies. *Learning and Motivation*, *2*(4), 386–414. [https://doi.org/10.1016/0023-9690\(71\)90020-8](https://doi.org/10.1016/0023-9690(71)90020-8)
- Pope, P. A., Brenton, J. W. y Miall, R. C. (2015). Task-Specific Facilitation of Cognition by Anodal Transcranial DirectCurrent Stimulation of the Prefrontal Cortex. *Cerebral Cortex*, *25*(11), 4551–4558. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv094>
- Pope, P. A., Brenton, J. W. y Miall, R. C. (2015c). Task-Specific Facilitation of Cognition by Anodal Transcranial Direct Current Stimulation of the Prefrontal Cortex. *Cerebral Cortex*, *25*(11), 4551–4558. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv094>
- Popescu, T., Krause, B., Terhune, D. B., Twose, O., Page, T., Humphreys, G. y Kadosh, R. C. (2016). Transcranial random noise stimulation mitigates increased difficulty in an arithmetic learning task. *Neuropsychologia*, *81*, 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.12.028>
- Price, G. R. y Wilkey, E. D. (2017). Cognitive mechanisms underlying the relation between nonsymbolic and symbolic magnitude processing and their relation to math. *Cognitive Development*, *44*, 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2017.09.003>
- Radua, J., Schmidt, A., Borgwardt, S., Heinz, A., Schlagenhauf, F., McGuire, P., & Fusar-Poli, P. (2015). Ventral Striatal Activation During Reward Processing in Psychosis: A Neurofunctional Meta-Analysis. *JAMA psychiatry*, *72*(12), 1243–1251. <https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2015.2196>
- Ranzini, M., Dehaene, S., Piazza, M. y Hubbard, E. M. (2009). Neural mechanisms of attentional shifts due to irrelevant spatial and numerical cues. *Neuropsychologia*, *47*(12), 2615–2624. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.05.011>

- Ranzini, M., Scarpazza, C., Radua, J., Cutini, S., Semenza, C. y Zorzi, M. (2022). A common neural substrate for number comparison, hand reaching and grasping: A SDM-PSI meta-analysis of neuroimaging studies. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 148, 31–67. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2021.12.007>
- Rapin, I. (2016). Dyscalculia and the Calculating Brain. *Pediatric Neurology*, 61, 11–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pediatrneurol.2016.02.007>
- Ratcliff, R. (1978). A theory of memory retrieval. *Psychological Review*, 85, 59-108.
- Ratcliff, R. (2002). A diffusion model account of response time and accuracy in a brightness discrimination task: Fitting real data and failing to fit fake but plausible data. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9, 278-291.
- Renzi, C., Vecchi, T., Silvanto, J. y Cattaneo, Z. (2011). Overlapping representations of numerical magnitude and motion direction in the posterior parietal cortex: A TMS-adaptation study. *Neuroscience Letters*, 490(2), 145–149. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2010.12.045>
- Richmond, P. G. (1970). *Introducción a Piaget*. Editorial Fundamentos.
- Ridding, M. C. y Rothwell, J. C. (2007). Is there a future for therapeutic use of transcranial magnetic stimulation? *Nature Reviews. Neuroscience*, 8(7), 559–567. <https://doi.org/10.1038/nrn2169>
- Ried, K. (2006). Interpreting and understanding meta-analysis graphs-a practical guide. *Australian family physician*, 35(8), 635–638.
- Riemer, M., Diersch, N., Bublatzky, F. y Wolbers, T. (2016). Space, time, and numbers in the right posterior parietal cortex: Differences between response code associations and congruency effects. *NeuroImage*, 129, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.01.030>
- Robertson, E. M., Théoret, H. y Pascual-Leone, A. (2003). Studies in Cognition: The Problems Solved and Created by Transcranial Magnetic Stimulation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(7), 948-960. <https://doi.org/10.1162/089892903770007344>
- Roitman, J. D., Brannon, E. M. y Platt, M. L. (2007). Monotonic coding of numerosity in

- macaque lateral intraparietal area. *Plos Biology*, 5(8), 1672–1682. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0050208>
- Rossetti, Y., Jacquin-Courtois, S., Rode, G., Ota, H., Michel, C. y Boisson, D. (2004). Does Action Make the Link Between Number and Space Representation?: Visuo-Manual Adaptation Improves Number Bisection in Unilateral Neglect. *Psychological Science*, 15(6), 426–430. <https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2004.00696.x>
- Rusconi, E., Bueti, D., Walsh, V. y Butterworth, B. (2011). Contribution of frontal cortex to the spatial representation of number. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 47(1), 2–13. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2009.08.005>
- Rusconi, E., Dervinis, M., Verbruggen, F. y Chambers, C. D. (2013). Critical time course of right frontoparietal involvement in mental number space. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(3), 465–483. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00330
- Ruzzoli, M., Marzi, C. A. y Miniussi, C. (2010). The Neural Mechanisms of the Effects of Transcranial Magnetic Stimulation on Perception. *Journal of Neurophysiology*, 103(6), 2982–2989. <https://doi.org/10.1152/jn.01096.2009>
- Salillas, E., Basso, D., Baldi, M., Semenza, C. y Vecchi, T. (2009). Motion on numbers: Transcranial magnetic stimulation on the ventral intraparietal sulcus alters both numerical and motion processes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(11), 2129–2138. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.21157>
- Salillas, E., Semenza, C., Basso, D., Vecchi, T. y Siegal, M. (2012). Single pulse TMS induced disruption to right and left parietal cortex on addition and multiplication. *NeuroImage*, 59(4) 3159-3165. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.10.093>
- Sandrini, M. y Rusconi, E. (2009). A brain for numbers. *Cortex*, 45(7), 796–803. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2008.09.002>
- Sandrini, M., Umilta, C. y Rusconi, E. (2011). The use of transcranial magnetic stimulation in cognitive neuroscience: A new synthesis of methodological issues. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 35(3), 516–536. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2010.06.005>

- Santarnecci, E., Brem, A.-K., Levenbaum, E., Thompson, T., Kadosh, R. C. y Pascual-Leone, A. (2015). Enhancing cognition using transcranial electrical stimulation. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 4, 171–178. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2015.06.003>
- Sarkar, A., Dowker, A. y Kadosh, R. C. (2014). Cognitive Enhancement or Cognitive Cost: Trait-Specific Outcomes of Brain Stimulation in the Case of Mathematics Anxiety. *Journal of Neuroscience*, 34(50), 16605–16610. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3129-14.2014>
- Sarkar, A. y Kadosh, R. C. (2016). Transcranial Electrical Stimulation and Numerical Cognition. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 70(1), 41–58. <https://doi.org/10.1037/cep0000064>
- Sasanguie, D., Defever, E., Maertens, B. y Reynvoet, B. (2014). The approximate number system is not predictive for symbolic number processing in kindergarteners. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67(2), 271–280. <https://doi.org/10.1080/17470218.2013.803581>
- Sasanguie, D., Göbel, S. M. y Reynvoet, B. (2013). Left parietal TMS disturbs priming between symbolic and non-symbolic number representations. *Neuropsychologia*, 51(8), 1528–1533. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.05.001>
- Savelkouls, S. y Cordes, S. (2020). The impact of set size on cumulative area judgments. *Acta Psychologica*, 210, 103163. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2020.103163>
- Schneider, M., Beeres, K., Coban, L., Merz, S., Susan Schmidt, S., Stricker, J. y De Smedt, B. (2017). Associations of non-symbolic and symbolic numerical magnitude processing with mathematical competence: a meta-analysis. *Developmental Science*, 20(3), e12372. <https://doi.org/10.1111/desc.12372>
- Schroeder, P.A, Dresler, T., Bahnmüller, J., Artemenko, C., Cohen Kadosh, R. y Nuerk, H.-C. (2017c). Cognitive Enhancement of Numerical and Arithmetic Capabilities: a Mini-Review of Available Transcranial Electric Stimulation Studies. *Journal of Cognitive Enhancement*, 1(1), 39–47. <https://doi.org/10.1007/s41465-016-0006-z>
- Schroeder, P.A, Nuerk, H.-C. y Plewnia, C. (2017b). Switching between Multiple Codes of SNARC-Like Associations: Two Conceptual Replication Attempts with Anodal tDCS in Sham-Controlled Cross-Over Design. *Frontiers in Neuroscience*, 11, 654.

<https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00654>

- Schroeder, P.A., Nuerk, H.-C. y Plewnia, C. (2017a). Prefrontal neuromodulation reverses spatial associations of non-numerical sequences, but not numbers. *Biological Psychology*, 128, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2017.07.008>
- Schroeder, Philipp Alexander, Pfister, R., Kunde, W., Nuerk, H.-C. y Plewnia, C. (2016). Counteracting Implicit Conflicts by Electrical Inhibition of the Prefrontal Cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 28(11), 1737–1748. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01001
- Schwartz, F., Zhang, Y., Chang, H., Karraker, S., Kang, J. B. y Menon, V. (2021). Neural representational similarity between symbolic and non-symbolic quantities predicts arithmetic skills in childhood but not adolescence. *Developmental Science*, 24(6), e13123. <https://doi.org/10.1111/desc.13123>
- Schwarz, W. y Heinze, H. (1998). On the interaction of numerical and size information in digit comparison: a behavioral and event-related potential study. *Neuropsychologia*, 36(11), 1167–1179. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(98\)00001-3](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(98)00001-3)
- Schwarzkopf, D. S., Silvanto, J. y Rees, G. (2011). Stochastic Resonance Effects Reveal the Neural Mechanisms of Transcranial Magnetic Stimulation. *Journal of Neuroscience*, 31(9), 3143–3147. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4863-10.2011>
- Sela, T. y Lavidor, M. (2014). High-Level Cognitive Functions in Healthy Subjects. In R. Cohen Kadosh (Ed.), *The Stimulated Brain: Cognitive Enhancement Using Non-Invasive Brain Stimulation* (pp. 300–331). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404704-4.00011-9>
- Serra-Grabulosa, J. M., Adan, A., Pérez-Pàmies, M., Lachica, J. y Membrives, S. (2010). Neural bases of numerical processing and calculation. *Revista de Neurologia*, 50(01), 39. <https://doi.org/10.33588/rn.5001.2009271>
- Serra-Grabulosa, J.M. (2014). Representación numérica. In D. Redolar (Ed.), *Neurociencia Cognitiva* (pp. 517–536). Editorial Médica Panamericana.

- Siebner, H. R., Hartwigsen, G., Kassuba, T. y Rothwell, J. C. (2009). How does transcranial magnetic stimulation modify neuronal activity in the brain? Implications for studies of cognition. *Cortex*, 45(9), 1035–1042. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cortex.2009.02.007>
- Siemann, J. y Petermann, F. (2018a). Innate or Acquired? - Disentangling Number Sense and Early Number Competencies. *Frontiers in Psychology*, 9, 571. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00571>
- Siemann, J. y Petermann, F. (2018b). Evaluation of the Triple Code Model of numerical processing-Reviewing past neuroimaging and clinical findings. *Research in Developmental Disabilities*, 72, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2017.11.001>
- Silvanto, J. y Cattaneo, Z. (2017). Common framework for “virtual lesion” and state-dependent TMS: The facilitatory/suppressive range model of online TMS effects on behavior. *Brain and Cognition*, 119, 32–38. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bandc.2017.09.007>
- Silvanto, J., Muggleton, N. G., Cowey, A. y Walsh, V. (2007). Neural adaptation reveals state-dependent effects of transcranial magnetic stimulation. *European Journal of Neuroscience*, 25(6), 1874–1881. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2007.05440.x>
- Silvanto, J., Muggleton, N. y Walsh, V. (2008). State-dependency in brain stimulation studies of perception and cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(12), 447–454. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.09.004>
- Silvanto, J. y Pascual-Leone, A. (2008). State-dependency of transcranial magnetic stimulation. *Brain Topography*, 21(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10548-008-0067-0>
- Simonsmeier, B. A., Grabner, R. H., Hein, J., Krenz, U. y Schneider, M. (2018). Electrical brain stimulation (tES) improves learning more than performance: A meta-analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 84, 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.11.001>
- Skagerlund, K. y Träff, U. (2016). Processing of space, time, and number contributes to mathematical abilities above and beyond domain-general cognitive abilities. *Journal*

of *Experimental Child Psychology*, *143*, 85–101.
<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.10.016>

Skorupski, P., MaBouDi, H., Galpayage Dona, H. S. y Chittka, L. (2017). Counting insects. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, *373*(1740). <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0513>

Snowball, A., Tachtsidis, I., Popescu, T., Thompson, J., Delazer, M., Zamarian, L. y Zhu Tingtingand Kadosh, R. C. (2013). Long-Term Enhancement of Brain Function and Cognition Using Cognitive Training and Brain Stimulation. *Current Biology*, *23*(11), 987–992. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.04.045>

Society for Research in Child Development. (2021). *Ethical Principles and Standards for Developmental Scientists*. <https://www.srcd.org/about-us/ethical-principles-and-standards-developmental-scientists>

Sokolowski, H. M., Fias, W., Bosah Ononye, C. y Ansari, D. (2017b). Are numbers grounded in a general magnitude processing system? A functional neuroimaging meta-analysis. *Neuropsychologia*, *105*, 50-69
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.01.019>

Sokolowski, H. M., Fias, W., Mousa, A. y Ansari, D. (2017a). Common and distinct brain regions in both parietal and frontal cortex support symbolic and nonsymbolic number processing in humans: A functional neuroimaging meta-analysis. *NeuroImage*, *146*, 376–394. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.10.028>

Solé-Padullés, C., Bartrés-Faz, D., Junqué, C., Clemente, I. C., Molinuevo, J. L., Bargalló, N., Sánchez-Aldeguer, J., Bosch, B., Falcón, C., & Valls-Solé, J. (2006). Repetitive transcranial magnetic stimulation effects on brain function and cognition among elders with memory dysfunction. A randomized sham-controlled study. *Cerebral cortex*, *16*(10), 1487–1493. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhj083>

Sowell, E. R., Peterson, B. S., Thompson, P. M., Welcome, S. E., Henkenius, A. L. y Toga, A. W. (2003). Mapping cortical change across the human life span. *Nature Neuroscience*, *6*(3), 309–315. <https://doi.org/10.1038/nn1008>

Spelke, E. S. (2011). Quinian bootstrapping or Fodorian combination? Core and constructed knowledge of number. *Behavioral and Brain Sciences*, *34*(3), 149-150.
<https://doi.org/10.1017/S0140525X10002220>

- Stagg, C. J. y Nitsche, M. A. (2011). Physiological Basis of Transcranial Direct Current Stimulation. *The Neuroscientist*, 17(1), 37–53. <https://doi.org/10.1177/1073858410386614>
- Starkey, P. y Cooper, R. G. J. (1980). Perception of numbers by human infants. *Science*, 210(4473), 1033–1035. <https://doi.org/10.1126/science.7434014>
- Strauss, M. S. y Curtis, L. E. (1981). Infant perception of numerosity. *Child Development*, 52(4), 1146–1152.
- Suppa, A., Huang, Y. Z., Funke, K., Ridding, M. C., Cheeran, B., Di Lazzaro, V., Ziemann, U. y Rothwell, J. C. (2016). Ten Years of Theta Burst Stimulation in Humans: Established Knowledge, Unknowns and Prospects. *Brain Stimulation*, 9(3), 323–335. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.01.006>
- Thompson, R. A. y Nelson, C. A. (2001). Developmental science and the media. Early brain development. *The American Psychologist*, 56(1), 5–15. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.56.1.5>
- Thompson, R. F., Mayers, K. S., Robertson, R. T. y Patterson, C. J. (1970). Number Coding in Association Cortex of the Cat. *Science*, 168(3928), 271–273. <https://doi.org/10.1126/science.168.3928.271>
- To, W. T., Eroh, J., Hart Jr., J. y Vanneste, S. (2018). Exploring the effects of anodal and cathodal high definition transcranial direct current stimulation targeting the dorsal anteriorcingulate cortex. *Scientific Reports*, 8(1), 1-16. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22730-x>
- Toga, A. W., Thompson, P. M. y Sowell, E. R. (2006). Mapping brain maturation. *Trends in Neurosciences*, 29(3), 148–159. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tins.2006.01.007>
- Tokuhama-Espinosa, T. (2010). *Mind, Brain, and Education Science: A Comprehensive Guide to the New Brain-Based Teaching*. W. W. Norton y Company.
- Tomlinson, R. C., DeWind, N. K. y Brannon, E. M. (2020). Number sense biases children's area judgments. *Cognition*, 204, 104352. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104352>
- Toomarian, E. Y. y Hubbard, E. M. (2018). On the genesis of spatial-numerical

- associations: Evolutionary and cultural factors co-construct the mental number line. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 90, 184–199. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.04.010>
- Tudusciuc, O. y Nieder, A. (2007). Neuronal population coding of continuous and discrete quantity in the primate posterior parietal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(36), 14513–14518. <https://doi.org/10.1073/pnas.0705495104>
- Turco, C. V., Rehsi, R. S., Locke, M. B. y Nelson, A. J. (2021). Biological sex differences in afferent-mediated inhibition of motor responses evoked by TMS. *Brain Research*, 1771, 147657. <https://doi.org/10.1016/J.BRAINRES.2021.147657>
- Tzelgov, J., Meyer, J. y Henik, A. (1992). Automatic and Intentional Processing of Numerical Information. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18(1), 166–179. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.18.1.166>
- Umiltà, C., Priftis, K. y Zorzi, M. (2009). The spatial representation of numbers: evidence from neglect and pseudoneglect. *Experimental Brain Research*, 192(3), 561–569. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1623-2>
- Uttal, D. H., Miller, D. I. y Newcombe, N. S. (2013). Exploring and Enhancing Spatial Thinking: Links to Achievement in Science, Technology, Engineering, and Mathematics? *Current Directions in Psychological Science*, 22(5), 367–373. <https://doi.org/10.1177/0963721413484756>
- Valero-Cabré, A., Amengual, J. L., Stengel, C., Pascual-Leone, A. y Coubard, O. A. (2017). Transcranial magnetic stimulation in basic and clinical neuroscience: A comprehensive review of fundamental principles and novel insights. *Neuroscience y Biobehavioral Reviews*, 83, 381–404. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2010.10.013>
- Van Orden, G. C., Pennington, B. F. y Stone, G. O. (2001). What do double dissociations prove? *Cognitive Science*, 25(1), 111–172. https://doi.org/https://doi.org/10.1207/s15516709cog2501_5
- VanMarle, K. y Wynn, K. (2006). Six-month-old infants use analog magnitudes to represent duration. *Developmental Science*, 9(5), F41–F49. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00508.x>

- Verdine, B. N., Golinkoff, R. M., Hirsh-Pasek, K. y Newcombe, N. S. (2017). Spatial Skills, their Development, and their links to Mathematics. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 82(1), 7–30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/mono.12280>
- Viarouge, A., Courtier, P., Hoppe, M., Melnik, J., Houdé, O. y Borst, G. (2018). Spontaneous orientation towards irrelevant dimensions of magnitude and numerical acuity. *Learning and Instruction*, 54, 156–163. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.09.004>
- Viarouge, A., Houdé, O. y Borst, G. (2019). The progressive 6-year-old conserver: Numerical saliency and sensitivity as core mechanisms of numerical abstraction in a Piaget-like estimation task. *Cognition*, 190, 137–142. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.05.005>
- Viejo-Sobera, R., Redolar-Ripoll, D., Boixadós, M., Palaus, M., Valero-Cabré, A. y Marron, E. M. (2017). Impact of prefrontal theta burst stimulation on clinical neuropsychological tasks. *Frontiers in Neuroscience*, 11, 462. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00462>
- Voelkl, B. (2019). Multiple testing: correcting for alpha error inflation with false discovery rate (FDR) or family-wise error rate? *Animal Behaviour*, 155, 173–177. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2019.07.001>
- Vogel, S. E. y De Smedt, B. (2021). Developmental brain dynamics of numerical and arithmetic abilities. *NPJ Science of Learning*, 6(1), 22. <https://doi.org/10.1038/s41539-021-00099-3>
- Von Aster, M. G. y Shalev, R. S. (2007). Number development and developmental dyscalculia. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 49(11), 868-873. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2007.00868.x>
- Vuilleumier, P., Ortigue, S. y Brugger, P. (2004). The Number Space and Neglect. *Cortex*, 40(2), 399–410. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(08\)70134-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70134-5)
- Wagener, L., Loconsole, M., Ditz, H. M. y Nieder, A. (2018). Neurons in the Endbrain of Numerically Naive Crows Spontaneously Encode Visual Numerosity. *Current Biology*, 28(7), 1090-1094.e4. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.02.023>

- Wagenmakers, E. J., van der Maas, H. L. J. y Grasman, R. P. P. P. (2007). An EZ-diffusion model for response time. *Psychonomic Bulletin y Review*, *14*(1), 3–22. <https://doi.org/10.3758/bf03194023>.
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, *7*(11), 483–488. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14585444>
- Walsh, V. y Cowey, A. (2000). Transcranial magnetic stimulation and cognitive neuroscience. *Nature Reviews Neuroscience*, *1*(1), 73–80. <https://doi.org/10.1038/35036239>
- Walsh, V. y Pascual-Leone, A. (2003). *Transcranial Magnetic Stimulation A Neurochronometrics of Mind*. MIT PRESS.
- Walsh, V. y Rushworth, M. (1999). A primer of magnetic stimulation as a tool for neuropsychology. *Neuropsychologia*, *37*, 125–135.
- Wang, L., Liang, X., Yin, Y. y Kang, J. (2021). Bidirectional Mapping Between the Symbolic Number System and the Approximate Number System. *Experimental Psychology*, *68*(5), 243–263. <https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000533>
- Weber, E. H. (1905). *Der tastsinn und das gemeingefühl*. Ewald Hering.
- Wechsler, D. (2008). *Wechsler Adult Intelligence Scale (WAIS-IV)*. Pearson.
- Wechsler, D. (2012). *WAIS-IV. Escala de inteligencia de Wechsler para adultos-IV. Manual técnico y de interpretación*. Pearson.
- Wilkey, E. D. y Ansari, D. (2020). Challenging the neurobiological link between number sense and symbolic numerical abilities. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1464*(1), 76–98. <https://doi.org/10.1111/nyas.14225>
- Wilkinson, G. S. y Robertson, G. J. (2006). *Wide range achievement test (WRAT4)*. Psychological Assessment Resources.
- Woods, A. J., Antal, A., Bikson, M., Boggio, P. S., Brunoni, A. R., Celnik, P., Cohen, L. G., Fregni, F., Herrmann, C. S., Kappenman, E. S., Knotkova, H., Liebetanz, D., Miniussi, C., Miranda, P. C., Paulus, W., Priori, A., Reato, D., Stagg, C., Wenderoth, N. y Nitsche, M. A. (2016). A technical guide to tDCS, and related non-invasive

- brain stimulation tools. *Clinical Neurophysiology*, 127(2), 1031–1048. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2015.11.012>
- Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358(6389), 749–750. <https://doi.org/10.1038/358749a0>
- Xenidou-Dervou, I., Molenaar, D., Ansari, D., van der Schoot, M. y van Lieshout, E. C. D. M. (2017). Nonsymbolic and symbolic magnitude comparison skills as longitudinal predictors of mathematical achievement. *Learning and Instruction*, 50, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2016.11.001>
- Xie, Y., Fang, M. y Shauman, K. (2015). STEM Education. *Annual Review of Sociology*, 41, 331–357. <https://doi.org/10.1146/annurev-soc-071312-145659>
- Xu, F. y Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/s0010-0277\(99\)00066-9](https://doi.org/10.1016/s0010-0277(99)00066-9)
- Xuan, B., Zhang, D., He, S. y Chen, X. (2007). Larger stimuli are judged to last longer. *Journal of Vision*, 7(10), 2.1-5. <https://doi.org/10.1167/7.10.2>
- Yang, T.-I. y Chiao, C.-C. (2016). Number sense and state-dependent valuation in cuttlefish. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1837), 20161379. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.1379>
- Yao, Y., Du, F., Wang, C., Liu, Y., Weng, J. y Chen, F. (2015). Numerical processing efficiency improved in children using mental abacus: ERP evidence utilizing a numerical Stroop task. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00245>
- Yeo, D. J., Wilkey, E. D. y Price, G. R. (2017). The search for the number form area: A functional neuroimaging meta-analysis. *Neuroscience y Biobehavioral Reviews*, 78, 145–160. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.04.027>
- Yeo, D. J., Wilkey, E. D. y Price, G. R. (2019). Malleability of mappings between Arabic numerals and approximate quantities: Factors underlying individual differences and the relation to math. *Acta Psychologica*, 198, 102877. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2019.102877>
- Yousif, S. R., Alexandrov, E., Bennete, E., Aslin, R. N. y Keil, F. C. (2022). Do children estimate area using an "Additive-Area Heuristic"? *Developmental Science*, 25(4),

e13235. <https://doi.org/10.1111/desc.13235>

- Yousif, S. R., Aslin, R. N. y Keil, F. C. (2020). Judgments of spatial extent are fundamentally illusory: ‘Additive-area’ provides the best explanation. *Cognition*, 205, 104439. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104439>
- Yousif, S. R. y Keil, F. C. (2019). The Additive-Area Heuristic: An Efficient but Illusory Means of Visual Area Approximation. *Psychological Science*, 30(4), 495–503. <https://doi.org/10.1177/0956797619831617>
- Zanon, M., Potrich, D., Bortot, M. y Vallortigara, G. (2021). Towards a standardization of non-symbolic numerical experiments: GeNEsIS, a flexible and user-friendly tool to generate controlled stimuli. *Behavior Research Methods*, 1–12. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01580-y>
- Zhou, X., Chen, Y., Chen, C., Jiang, T., Zhang, H. y Dong, Q. (2007). Chinese kindergartners’ automatic processing of numerical magnitude in Stroop-like tasks. *Memory y Cognition*, 35(3), 464–470. <https://doi.org/10.3758/BF03193286>
- Zorzi, M., Priftis, K. y Umiltà, C. (2002). Neglect disrupts the mental number line. *Nature*, 417(6885), 138–139. <https://doi.org/10.1038/417138a>
- Zorzi, M., Stoianov, I. y Umiltà, C. (2005). Computational modeling of numerical cognition. In *Handbook of Mathematical Cognition* (pp. 67–84). Psychology Press.

9. Apéndices

APÉNDICE 1. Glosario de términos

Cognición numérica

Estudio de las bases cognitivas y neurales de la representación de las cantidades, así como su relación con los conceptos matemáticos. Es decir, es el estudio acerca de cómo los individuos perciben y procesan la información cuantitativa o numérica, y cómo comprenden y utilizan las nociones matemáticas.

Competencia numérica

Capacidad para representar, discriminar y procesar información relativa cantidades numéricas (Nieder, 2021).

Competencia matemática

Capacidad para utilizar los números y símbolos, realizar operaciones y cálculos, así como para interpretar y producir diferentes tipos de información sobre aspectos cuantitativos y espaciales de la realidad, y aplicar el pensamiento matemático en la resolución de problemas cotidianos. La OCDE en su informe PISA la define como “la capacidad individual para identificar y comprender el papel que desempeñan las matemáticas en el mundo, emitir juicios bien fundados, utilizar las matemáticas y comprometerse con ellas, y satisfacer las necesidades de la vida personal como ciudadano constructivo, comprometido y reflexivo” (OECD, 2003, p.24).

Efectos de congruencia

Este efecto se refiere a la mayor facilidad para detectar la información numérica cuando ésta es congruente con el tamaño, que cuando es incongruente. Por ejemplo, si hay que comparar el símbolo numérico “3” con el “7” es más fácil (las tasas de acierto son superiores) cuando el dígito 3 tiene un tamaño físico menor que el 7, mientras que en el caso contrario: el 3 tiene un tamaño físico mayor que el 7, las tasas de acierto son sensiblemente inferiores.

Efectos de asociación entre lo percibido y los códigos de respuesta

El efecto de asociación espacio-numérica de los códigos de respuesta (conocido como efecto SNARC (del inglés *spatial-numerical association of response codes*) se refiere al hecho de que cuando se les presentan números pequeños (0 a 4), las personas tienden a responder más rápido si esos estímulos están asociados el lado izquierdo del entorno percibido; mientras que cuando se les presentan números grandes (6 a 9), las personas responden más rápido si esos estímulos se asocian con el lado derecho de su campo perceptivo. Este efecto se encuentra de forma consistente en la cultura occidental, y se interpreta con una representación mental de los números a lo largo de una línea numérica mental, de forma que los números pequeños están a la izquierda y los grandes a la derecha. El efecto SNARC es esta asociación automática que ocurre entre la ubicación de la mano de respuesta y la magnitud semántica de un número, y es independiente de la modalidad sensorial (auditiva o visual).

Ley de Fechner

“Ley psicofísica que establece que la sensación subjetiva de las magnitudes escala con el logaritmo de la magnitud objetiva” (Nieder, 2021, p.2).

Ley de Weber

“Ley psicofísica que rige la discriminación proporcional de magnitudes. Establece que la diferencia apenas perceptible entre dos magnitudes divididas por la magnitud de referencia es una constante, la fracción de Weber” (Nieder, 2021. p.2).

Neuroestimulación

El término neuroestimulación se utiliza cuando los cambios de membrana producidos superan el potencial umbral y generan disparos (potenciales de acción) en las células estimuladas.

Neuromodulación

La neuromodulación consiste en la modificación de los potenciales de membrana que afecta la excitabilidad celular, aumentándola o disminuyéndola, pero sin llegar a generar directamente potenciales de acción.

Neuroplasticidad

La neuroplasticidad se refiere a los cambios en las conexiones neuronales generados por la estimulación cerebral cuando esta se aplica de forma repetida en diversas sesiones.

Numerosidad

Cantidad numérica, o número de elementos de un conjunto.

Sentido numérico

Capacidad para discriminar el número de elementos de un conjunto, ya sea mediante un sistema exacto para números pequeños (subitización) o mediante el sistema numérico aproximado (ANS) para números más grandes. En ambos casos se trata de una comprensión intuitiva de la cantidad numérica (numerosidad).

Sentido de magnitud (SoM)

Capacidad para detectar la dimensión cuantitativa de la realidad.

Sistema numérico aproximado

Sistema cognitivo que permite detectar de forma aproximada el número de elementos de un conjunto, sin depender del lenguaje o del uso de símbolos. Este sistema forma parte del sentido numérico, y fue propuesto por (Feigenson et al., 2004). Sus siglas en inglés son ANS (*Analog or Approximate Number System*).

Sistema de seguimiento de objetos

Mecanismo visual que permite rastrear hasta cuatro objetos de forma relativamente precisa pero implícita.

Sistema general de procesamiento de magnitudes

Sistema cognitivo que hace posible la detección de cantidades numéricas y no numéricas. Este sistema ha sido propuesto como alternativa al sistema numérico aproximado. Presupone que la cantidad numérica no es detectada directamente sino más bien

ponderada a partir de las magnitudes continuas. Sus siglas en inglés son MPS, *Magnitude Processing System*.

Subitización

Acción de determinar de forma exacta y automática el número de elementos de un conjunto. Se basa en el sistema de seguimiento de objetos, y forma parte del sentido numérico. Fue propuesto por (Henik et al., 2012; Piazza, 2010), y tiene una amplitud de de 4 elementos.

Valor adaptativo

“Se refiere a las características que ayudan a un organismo a sobrevivir y reproducirse. Es decir, los rasgos que confieren una mayor aptitud para un entorno determinado” (Nieder, 2021, p.2).

APÉNDICE 2. Algoritmos y términos de búsqueda bibliográfica empleados en la revisión sistemática y metaanálisis.

a) Estimulación magnética transcraneal

PubMed (1/05/2021)

N=87

Search: ("Non invasive brain stimulation"[Title/Abstract] OR "transcranial magnetic stimulation"[Title/Abstract] OR "Theta burst stimulation"[Title/Abstract] OR "transcranial random noise"[Title/Abstract]) AND ("numerical cognition"[Title/Abstract] OR "mathematical cognition"[Title/Abstract] OR "maths abilities"[Title/Abstract] OR "number processing"[Title/Abstract] OR "magnitude processing"[Title/Abstract] OR "arithmetic"[Title/Abstract] OR "subitizing"[Title/Abstract] OR "counting"[Title/Abstract] OR "SNARC"[Title/Abstract] OR numerosity[Title/Abstract] OR calculation[Title/Abstract])

Filters: from 2009/1/1 - 2021/4/30

WoS (1/05/2021)

N=157

(TS=("Non-invasive brain stimulation" OR "transcranial magnetic stimulation" or "Theta burst stimulation" or "transcranial random noise") AND TS=("numerical cognition" OR "mathematical cognition" OR "maths abilities" OR "number processing" OR "magnitude processing" OR "arithmetic" OR "subitizing" OR "counting" OR "SNARC" OR numerosity OR calculation)) AND LANGUAGE: (English OR Spanish) AND DOCUMENT TYPES: (Article OR Book Review OR Proceedings Paper)

Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, AyHCI, ESCI Timespan=2009-2021

b) Estimulación eléctrica transcraneal

WoS (19/05/2022)

N=276

TS=("Non invasive brain stimulation" OR "transcranial magnetic stimulation" OR "transcranial direct current stimulation" OR "transcranial alternating current stimulation" OR "Transcranial random noise stimulation") AND TS=("numerical cognition" OR "mathematical cognition" OR "maths abilities" OR "number processing" OR "magnitude processing" OR "arithmetic" OR "subitizing" OR "counting" OR "SNARC" OR numerosity OR calculation)

<https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/31259fd0-7c58-47a4-9f17-dee0bd2ea25e-39271813/date-ascending/1>

PubMed (19/05/2022)

N=71

Search: ("Non invasive brain stimulation"[Title/Abstract] OR "transcranial direct current stimulation"[Title/Abstract] OR "transcranial alternating current stimulation"[Title/Abstract] OR "transcranial random noise stimulation"[Title/Abstract]) AND ("numerical cognition"[Title/Abstract] OR "mathematical cognition"[Title/Abstract] OR "maths abilities"[Title/Abstract] OR "number processing"[Title/Abstract] OR "magnitude processing"[Title/Abstract] OR "arithmetic"[Title/Abstract] OR "subitizing"[Title/Abstract] OR "counting"[Title/Abstract] OR "SNARC"[Title/Abstract] OR numerosity[Title/Abstract] OR calculation[Title/Abstract]) Filters: from 2000/1/1 - 2022/5/19

APÉNDICE 3. Tablas de contingencia y prueba χ^2 de la distribución de género y lateralidad en los grupo de edad.

A) Género

Tabla de contingencia

		Grupo Edad			Total	
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3		
Género	Masculino	Recuento	20	22	20	62
		% dentro de Grupo Edad	54,1%	52,4%	54,1%	53,4%
Femenino		Recuento	17	20	17	54
		% dentro de Grupo Edad	45,9%	47,6%	45,9%	46,6%
Total		Recuento	37	42	37	116
		% dentro de Grupo Edad	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Pruebas de χ^2

	Valor	gl	Significación asintótica (bilateral)
χ^2 de Pearson	0,030 ^a	2	0,985
Razón de verosimilitud	0,030	2	0,985
Asociación lineal por lineal	0,000	1	1,000
N de casos válidos	116		

NOTA: a. 0 casillas (0,0%) han esperado un recuento menor que 5. El recuento mínimo esperado es 17,22. gl: grados de libertad

B) Lateralidad

Tabla de contingencia

		Grupo Edad			Total	
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3		
Lateralidad	Diestro	Recuento	34	33	34	101
		% dentro de Grupo Edad	91,9%	78,6%	91,9%	87,06%
	Zurdo	Recuento	3	9	3	15
		% dentro de Grupo Edad	8,1%	21,4%	8,1%	12,94%
Total		Recuento	37	42	37	116
		% dentro de Grupo Edad	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Pruebas de χ^2

	Valor	gl	Significación asintótica (bilateral)
χ^2 de Pearson	5,562 ^a	2	0,062
Razón de verosimilitud	5,415	2	0,067
Asociación lineal por lineal	0,126	1	0,722
N de casos válidos	116		

NOTA: a. 0 casillas (0,0%) han esperado un recuento menor que 5. El recuento mínimo esperado es 17,22. gl: grados de libertad.

APÉNDICE 4. Consentimiento y asentimiento informado (Estudio 2).

a) Formato de consentimiento informado utilizado con los adultos participantes y con los padres de los niños participantes.

Para la sociedad en general y de manera particular para la Facultad de Educación de la Universidad de La Sabana, resulta de crucial importancia conocer las bases de la cognición numérica, y su desarrollo a lo largo del ciclo vital. Por este motivo, ha emprendido el proyecto de investigación “Desarrollo de la cognición numérica: estudio de las bases neurales de la habilidad para convertir e integrar la información cuantitativa espacial, temporal y numérica”. La información presentada a continuación describe el estudio y el papel que usted tendrá como participante. Por favor, lea cuidadosamente y no dude en preguntar en caso de tener interrogantes.

Su hijo(a) ha sido considerado como candidato(a) para participar en esta investigación, sin embargo, su participación es voluntaria y por tanto, podrá decidir si continua en el proceso. Si usted autoriza que su hijo(a) sea parte de la investigación, esto implica que pueda participe en las sesiones previstas y que usted autoriza el análisis de sus intervenciones orales, escritas o en formato digital, así como de las fotos y los videos que sean tomados de ser necesarios. Por participar en el presente estudio, ni usted ni su hijo(a) recibirá ninguna compensación de tipo académico o económico.

El presente estudio no presenta riesgo para los participantes. Su hijo(a) podrá retirarse del estudio en cualquier momento, previa comunicación al equipo investigador. Esto no le acarreará ninguna consecuencia, ni efectos negativos. A usted y a su hijo(a) se le comunicará cualquier hallazgo significativo que se desarrolle durante el curso de este estudio.

Si en cualquier momento de la investigación, usted tiene preguntas como representante legal del niño(a), puede ponerse en contacto con la investigadora principal del proyecto MSc. Sara García Sanz (sara.garcia@unisabana.edu.co).

La información recolectada será confidencial y sólo será utilizada para el análisis de los resultados del estudio. La información será guardada en una base de datos protegida con una contraseña accesible únicamente al personal autorizado. Su hijo(a) no será identificado(a) en los registros o publicaciones que resulten de este estudio; para efectos de este se les asignará un código que permite mantener su anonimato.

Una vez finalizada la investigación, los datos serán archivados en condiciones de seguridad durante un periodo de cinco (5) años, posterior al cual, serán eliminados.

YO _____ he leído y entendido este formato de consentimiento. Mis preguntas han sido contestadas a satisfacción. Doy mi consentimiento para que mi hijo(a) pueda participar en esta investigación.

Nombre completo: _____

Cédula de ciudadanía # _____ de _____

Firma: _____ Fecha: _____

b) **Formato de asentimiento informado utilizado directamente con los niños participantes (para garantizar que su participación es voluntaria)**

Bienvenido(a) al estudio de la Cognición Numérica de La Universidad de La Sabana

 cogn.num@gmail.com (no compartidos) [Cambiar de cuenta](#) 

***Obligatorio**

¿Quieres participar en este estudio de manera voluntaria? *


 Sí acepto participar


 No acepto participar

Nombres y Apellidos *

Tu respuesta _____

Código asignado *

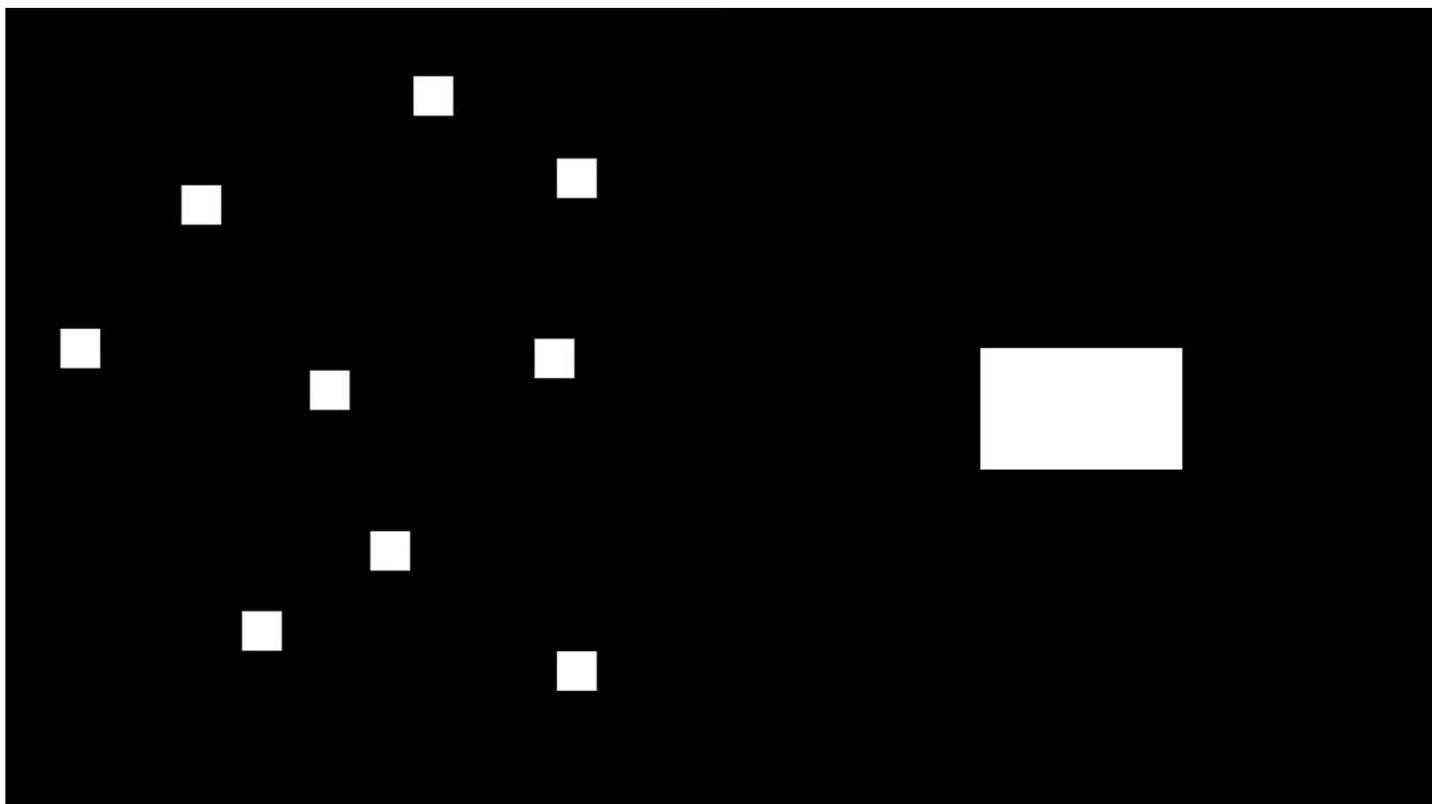
Tu respuesta _____

NOTA: Imagen tomada del formulario online diligenciado por los niños.

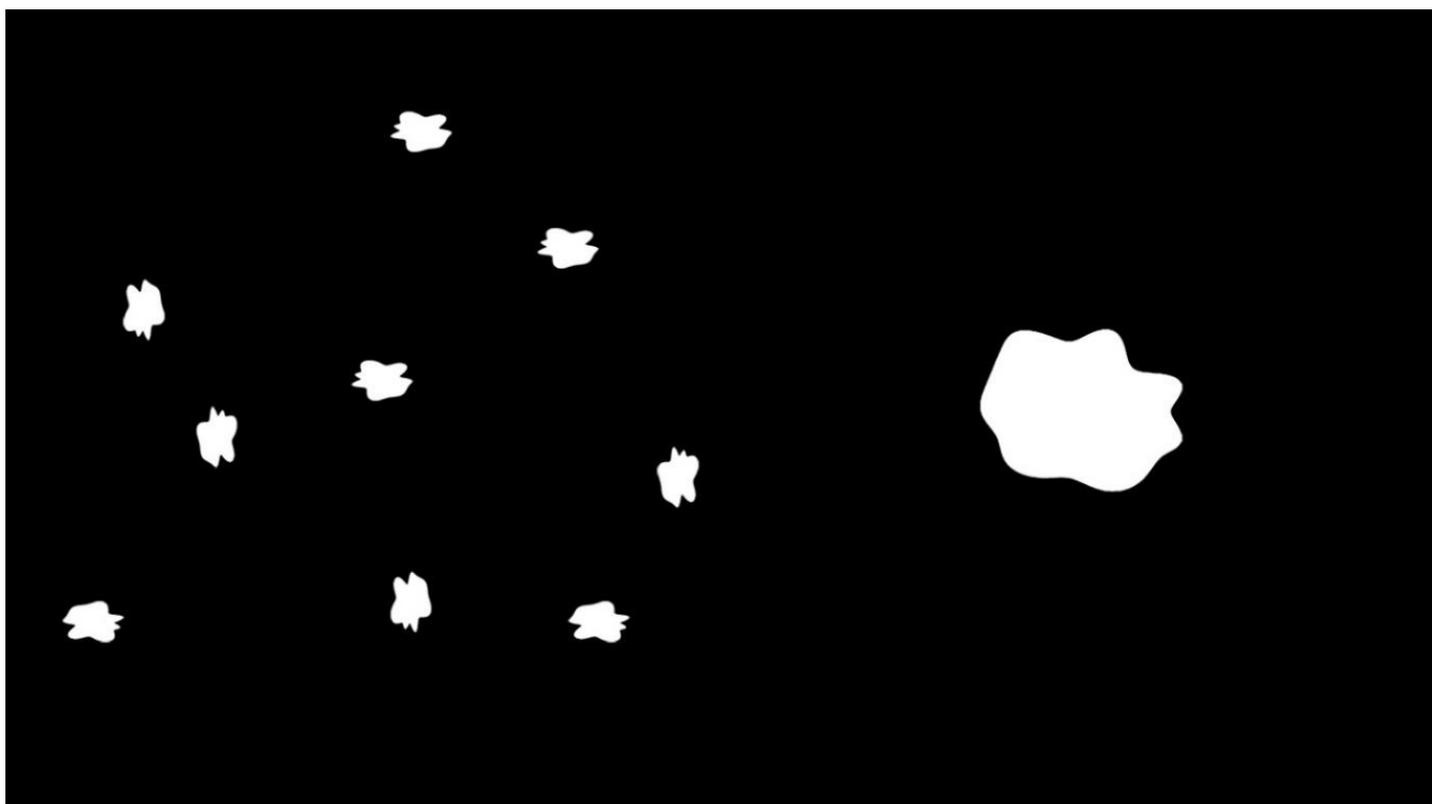
APÉNDICE 5. Imágenes de los estímulos utilizados en las tareas de comparación mixtas.

NOTA: Se presentan a tamaño mitad del tamaño real usado en los experimentos

a) Figuras regulares



b) Figuras irregulares.



APÉNDICE 6. Imágenes ilustrativas de la mediación didáctica utilizada en las tareas de comparación de los niños.

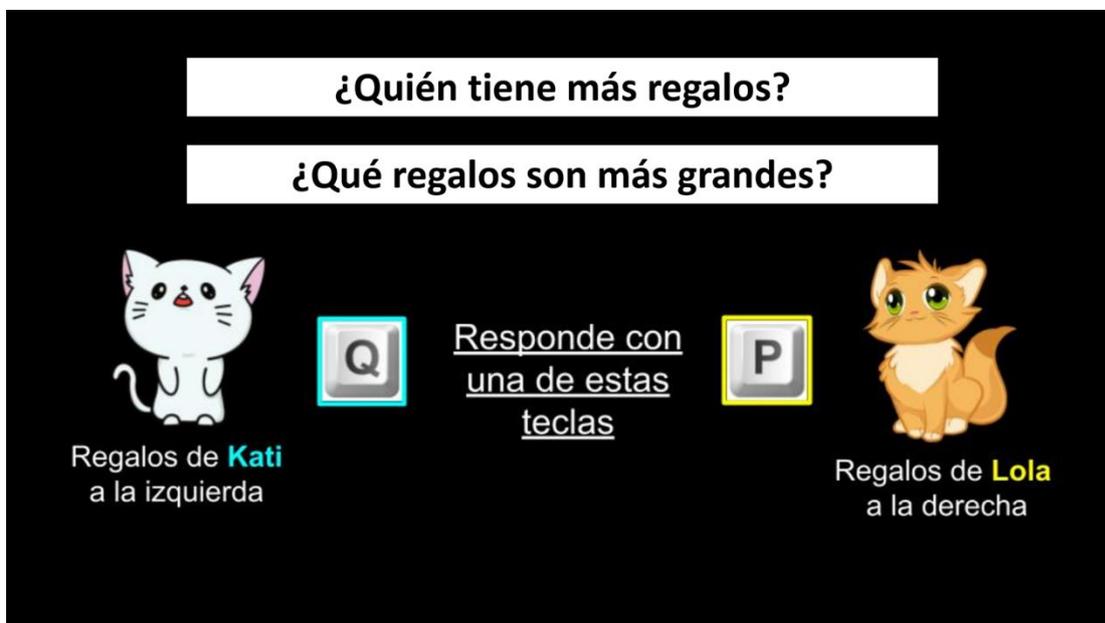
¿Quién tiene más regalos?

¿Qué regalos son más grandes?

Regalos de **Kati** a la izquierda

Regalos de **Lola** a la derecha

Responde con una de estas teclas

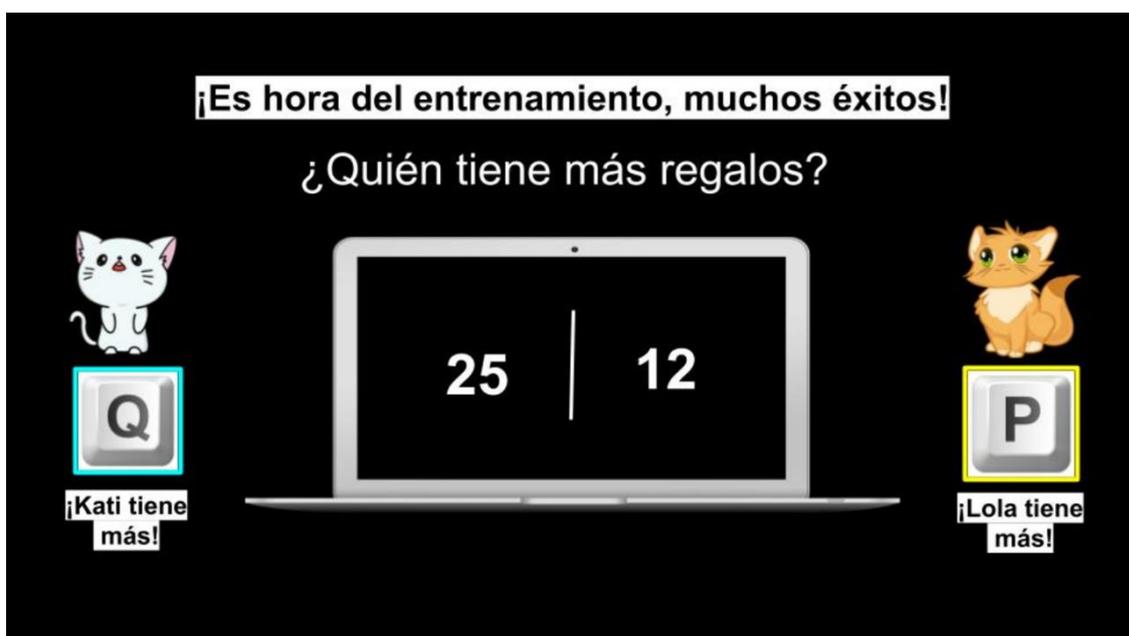


¡Es hora del entrenamiento, muchos éxitos!

¿Quién tiene más regalos?

¡Kati tiene más!

¡Lola tiene más!



APÉNDICE 7. Criterios de exclusión para el uso de tDCS en adultos.

CRITERIOS DE EXCLUSIÓN

- Historia de conmoción cerebral
- Trastornos neurológicos progresivos, incluyendo signos de aumento de la presión intracraneal o lesiones intracraneales, incluidos los hallazgos fortuitos en la RM.
- Enfermedad psiquiátrica actual o pasada (p.e.: depresión, trastorno afectivo bipolar, esquizofrenia, trastorno obsesivo compulsivo, trastorno de estrés post-traumático, trastorno de ansiedad, etc.).
- Condición médica inestable sea cual sea su causa.
- Condiciones médicas no controladas que puedan causar emergencias médicas en caso de que provoquen convulsiones (p.e: malformaciones cardíacas, arritmias cardíacas, asma, etc.).
- Antecedentes de desmayos o pérdida de conciencia de etiología desconocida o por golpes.
- Problemas auditivos o zumbido en los oídos (tinnitus)
- Antecedentes de convulsiones, diagnóstico previo de epilepsia, registros previos de EEG anormales (epileptiformes) o historia familiar de epilepsia.
- Medicación con actividad en el SNC.
- Posible embarazo. (*Cualquier mujer con sospecha de embarazo debe someterse a un test de embarazo*).
- Abuso o dependencia de sustancias (p.e: alcohol, anfetaminas, cocaína, MDMA, PCP, polvo de ángel, etc.) durante los seis meses anteriores al estudio.
- Implantes o piezas de metal en la cabeza (excluyendo los empastes dentales).
- Cualquiera de los siguientes dispositivos médicos: marcapasos, bombas de medicación implantadas, estimuladores del nervio vago, estimuladores cerebrales profundos, unidades de estimulación eléctrica transcutánea, derivaciones ventrículo-peritoneales, placas de titanio, implantes cocleares, clips aneurisma, etc.

APÉNDICE 8. Formato del consentimiento informado utilizado en el estudio de estimulación cerebral (Estudio 3).

FORMULARIO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA COLABORAR EN UNA INVESTIGACIÓN

Título del proyecto de investigación:

Estudio de las bases neurales de la cognición numérica

Investigador principal: Dr. Diego Redolar Ripoll, Dr. Josep M Serra Grabulosa y Sara García Sanz

INTRODUCCIÓN

Ha sido invitado/a a participar en una investigación centrada en el estudio de las bases neurales de la cognición numérica mediante el uso de la técnica de estimulación transcraneal por corriente directa (tDCS, del inglés *transcranial direct current stimulation*). La tDCS es un procedimiento no invasivo capaz de modificar levemente la actividad del cerebro durante un tiempo limitado (entre segundos y minutos).

Se le propone participar en este estudio como voluntario sano, por lo que su colaboración depende únicamente de su decisión de participar, y podrá abandonar el experimento en el momento que lo desee. Por favor, lea cuidadosamente este documento y pregunte a los investigadores o al personal del estudio cualquier palabra o información que desee aclarar.

Importante

- Su participación es voluntaria.
- Usted podrá o no beneficiarse de esta investigación. Sin embargo, su participación puede ayudar a otros en el futuro como resultado de los conocimientos obtenidos a partir del estudio.
- Puede abandonar el estudio en el momento que lo desee.

Una vez leído el presente documento de consentimiento informado y entendida lo que implica su participación, se le pedirá que firme el documento si desea participar en el estudio. Se le dará una copia firmada por el investigador principal de este mismo documento para que la guarde.

DECLARACIÓN DE INTERESES

El investigador principal de este estudio es Sara García Sanz y será llevado a cabo con los equipos del Cognitive NeuroLab e ItDB del Instituto de Neurociencias de la UB. Ni el Cognitive NeuroLab, ni ItDB, ni Sara García Sanz, ni el Dr. Diego Redolar Ripoll, ni el Dr. Josep M Serra Grabulosa tienen ningún interés personal o económico en este proyecto de investigación.

POR QUÉ SE REALIZA ESTE ESTUDIO

El ser humano dispone de una habilidad básica denominada sentido numérico, que sirve para discriminar cantidades y detectar de manera aproximada el número de elementos de un conjunto (Cohen Kadosh & Dowker, 2015). Esta capacidad de cuantificar la información del entorno es fundamental para la adaptación y la supervivencia, ya que permite elegir entre una u otra opción dependiendo del número de elementos o calcular el tiempo entre dos sucesos. Los estudios realizados hasta la actualidad parecen indicar que el sentido numérico es innato, tanto en el ser humano como en otras especies (Nieder, 2018). Los niños recién nacidos, ya son capaces de discriminar a nivel perceptual si un número de objetos en la escena visual coincide con un número de sonidos (Izard, Sann, Spelke, & Streri, 2009); y bebés de meses, que han sido habituados a un número de objetos son capaces de distinguir y reaccionar cuando la cantidad de objetos disminuye drásticamente (Kersey & Cantlon, 2017; Ranzini, Dehaene, Piazza, & Hubbard, 2009). Aun siendo innato, el sentido numérico se consolida a lo largo del desarrollo, facilitando el desarrollo de otras habilidades numéricas y del cálculo. Es decir, sobre la base de esta habilidad básica se construye una capacidad numérica más compleja, dependiente de la escolarización.

Neuroanatómicamente, el sentido numérico parece depender de la integridad del surco intraparietal (Piazza, Izard, Pinel, Le Bihan, & Dehaene, 2004), entre otras regiones fronto parietales. De hecho, las alteraciones de esta región cerebral ocasionan un déficit en las capacidades de procesamiento numérico y cálculo, como se ha observado en la discalculia (Mazzocco, Feigenson, & Halberda, 2011; Von Aster & Shalev, 2007). Estudios de neuroimagen han puesto de manifiesto que, para la realización de tareas matemáticas complejas como el álgebra o la topografía, se emplean exactamente en las mismas regiones que para el procesamiento numérico básico (Amalric & Dehaene, 2018). Asimismo, la denominada hipótesis del reciclaje neuronal sostiene que las habilidades culturalmente adquiridas tales como la lecto-escritura y la matemática utilizan un conjunto de circuitos evolutivamente antiguos que resultan suficientemente similares para la función requerida y tienen la suficiente plasticidad neuronal para procesar las nuevas habilidades culturales (Amalric & Dehaene, 2018; Ansari, 2008; Dehaene & Cohen, 2007).

Uno de los métodos más utilizados para el estudio cognitivo-conductual del procesamiento numérico son las tareas de comparación. En éstas, el sujeto debe indicar cuál de dos cantidades presentadas resulta mayor. La tarea se implementa con numerosidades en formato no simbólico (ej. *** o *****) y también con numerosidades en formato simbólico, bien sea de números arábigos (ej. “3” o “5”) o con palabras (ej. “tres” o “cinco”). La realización de la tarea implica la utilización de un sistema cognitivo (presumiblemente el ANS, anteriormente citado) que representa y manipula la

información numérica, mientras realiza la comparación (Guillaume & Van Rinsveld, 2018). Una propiedad especial de este sistema es la variabilidad escalar de las aproximaciones numéricas: tanto la precisión, como los tiempos de reacción en este tipo de tareas siguen la ley de Weber-Feschner (Stanislas Dehaene, 2003; Gallistel & Gelman, 2000; Platt & Johnson, 1971). Es decir, muestran el efecto tamaño y el efecto distancia. El efecto distancia se refiere a que es más fácil discriminar cantidades cuanto mayor sea la distancia entre ellas. Por ejemplo, es más fácil discriminar entre 1 y 9, que entre 8 y 9. Por otro lado el efecto tamaño se refiere al hallazgo de que, para igual distancia numérica, la discriminación entre dos números empeora conforme aumentan sus valores numéricos. Es decir, es más difícil discriminar entre 88 y 89 elementos, que entre 3 y 4. Piazza et al. (Piazza, Izard, Pinel, Le Bihan, & Dehaene, 2004) fueron pioneros en la evaluación de la agudeza del ANS mediante tareas de comparación, utilizando como variable la fracción de Weber (w) (Stevens, 1957). Se ha visto que la w es un parámetro relativamente estable cuyo valor depende del momento del ciclo vital. Es decir, a medida que avanza el desarrollo cognitivo se logran w menores (Halberda, Ly, Wilmer, Naiman, & Germine, 2012). Para una edad determinada dentro de una población dada, w se considera como un predictor estable de competencia matemática (Halberda et al., 2008). Estos efectos son observables tanto en comparaciones numéricas en formato simbólico como no simbólico (Guillaume & Van Rinsveld, 2018). Ambos son predictores de la futura competencia matemática, aunque el sentido numérico simbólico resulta ser un mejor predictor (Sasanguie, Göbel, Moll, Smets, & Reynvoet, 2013; Schneider et al., 2017b).

Actualmente el campo de interés en el procesamiento numérico, como predictor del desempeño matemático, se está dirigiendo hacia la capacidad de mapeo: es decir, la habilidad para traducir numerosidades de un formato a otro. Las investigaciones de Libertus et al. (Libertus, Odic, Feigenson, & Halberda, 2016) sugirieron que la habilidad para mapear entre cantidades simbólicas y no simbólicas durante la infancia, podría ser un buen predictor del futuro desempeño matemático. Estudios posteriores han mostrado que el ANS por sí solo no es un buen predictor sino que la influencia del ANS en el desempeño matemático podría estar mediada por la capacidad de mapeo (Jang & Cho, 2018). La tendencia actual es prestar cada vez más atención al mapeo entre diversos formatos como una habilidad esencial para el desempeño matemático (Hurst, Anderson, & Cordes, 2017; Jang & Cho, 2018; Jiménez Lira, Carver, Douglas, & LeFevre, 2017; Libertus, Feigenson, Halberda, & Landau, 2014; Libertus et al., 2016; Odic, Le Corre, & Halberda, 2015; Price & Wilkey, 2017b).

La cuestión más debatida en relación con el procesamiento numérico surgió a raíz de los trabajos que cuestionaban la existencia del ANS (Leibovich & Henik, 2014; Leibovich, Katzin, Harel, & Henik, 2017a). A partir del análisis de tareas de comparación entre magnitudes continuas y discretas, estos autores plantearon que el procesamiento numérico en lugar de realizarse por un sistema específicamente numérico (ANS) se podría realizar por un sistema general de procesamiento de magnitudes (MPS, Magnitude Processing System) que no sólo tiene en cuenta la numerosidad (número de elementos en un conjunto) sino la dimensión cuantitativa de otras magnitudes continuas como el tamaño o la longitud (Leibovich & Henik, 2014; Leibovich et al., 2017a; Walsh, 2003). Estudios posteriores que han indagado esta posibilidad arrojan resultados divergentes (Borghesani et al., 2019; Hamamouche & Cordes, 2019; Sokolowski, Fias, Bosah Ononye, & Ansari, 2017a; Sokolowski, Fias, Mousa, & Ansari, 2017a), con lo que surge

una necesidad de explorar este aspecto tanto cognitivamente como analizando las bases neurales subyacentes para proporcionar una comprensión más completa.

En este contexto de antecedentes, el presente proyecto se centra en el estudio de si el procesamiento numérico se realiza por un sistema específicamente numérico (ANS) o por un sistema general de procesamiento de magnitudes (MPS) y de cuáles podrían ser las bases neurales subyacentes.

Para dilucidar cómo opera el procesamiento de información cuantitativa, el objetivo general del proyecto es estudiar la capacidad de integrar y convertir información cuantitativa numérica simbólica y no simbólica con información cuantitativa espacial. Y analizar los efectos de la modulación de la excitabilidad cerebral de las regiones frontoparietales por estimulación cerebral no invasiva.

Los objetivos específicos son:

Objetivo 1. Realizar un análisis cognitivo-conductual de la capacidad de convertir información numérica no simbólica en simbólica e integrar información espacial y numérica cuantitativa.

Objetivo 2. Estudiar el efecto de la modulación de la excitabilidad cortical de las regiones frontoparietales sobre la capacidad de integrar y convertir información cuantitativa numérica y espacial.

QUIÉN PARTICIPA EN EL ESTUDIO

XXX voluntarios sanos participarán en el estudio. Todos los participantes deben cumplir los siguientes criterios de inclusión:

- Edad comprendida entre los 18 y los 50 años.
- Ausencia de condiciones médicas especiales.
- Firma del consentimiento informado.

PROCEDIMIENTO tDCS

Cada voluntario participará en tres sesiones experimentales llevadas a cabo en días diferentes, cada una de las cuales tiene una duración de entre 45 minutos y una hora.

Durante la primera sesión se recogen los datos sociodemográficos y de lateralidad y se realiza evaluación cognitiva.

En la segunda y tercera sesión se realiza una evaluación de la cognición numérica simultáneamente a una sesión de estimulación eléctrica tras craneal. El procedimiento de estimulación cerebral no invasiva se llevará a cabo mediante la aplicación de tDCS con el posicionamiento de los electrodos sobre la corteza prefrontal y sobre la corteza parietal, con el objetivo de aumentar la excitabilidad de dichas regiones. La duración de la estimulación será de 20 minutos y la intensidad de la corriente será de 2mA.

El equipo de tDCS que se empleará es un modelo STARSTIM 8 de Neuroelectrics.



La participación en este estudio es voluntaria y no se reciben beneficios personales participando en este estudio.

Todos los procedimientos de este experimento son seguros y no producen efectos dañinos para usted.

POSIBLES RIESGOS, EFECTOS SECUNDARIOS Y MALESTARES

La tDCS ha sido utilizada en investigación desde hace más de 17 años y se han desarrollado guías de seguridad para su aplicación. Hasta el momento, en base a la experiencia acumulada en estudios clínicos con esta técnica y protocolos estándar, no se han descrito efectos adversos serios o daños irreversibles. La experiencia hasta 2018 abarca más de 35.000 sesiones realizadas en todo el mundo y más de 2.000 participantes expuestos a sesiones repetidas de tDCS.

En este estudio los investigadores seguirán todas las recomendaciones de seguridad para la aplicación de tDCS. Aún siguiendo estas recomendaciones pueden aparecer los siguientes efectos secundarios.

Posibles efectos secundarios:

La tDCS es una técnica no invasiva y muy segura, pero puede causar alguna molestia transitoria de carácter leve o rara vez moderada.

- Durante la estimulación es frecuente notar un ligero calor, picor o sensación de hormigueo en la piel que se sitúa debajo de los electrodos, provocados por la corriente eléctrica. Esta sensación es particularmente frecuente al principio de la estimulación y suele disminuir en intensidad o desaparecer después de los primeros minutos de la sesión.
- También puede aparecer un leve enrojecimiento (eritema) en la piel situada debajo del electrodo. Este eritema es transitorio y desaparece después de terminar la sesión.

- En algunas ocasiones es posible notar también una sensación de cansancio, somnolencia, mareo o dolor de cabeza durante o después de la estimulación que remite espontáneamente o con analgésicos.
- Puede experimentar náuseas después de la estimulación que suelen desaparecer espontáneamente dentro de las 2 horas siguientes.
- Puede experimentar una sensación de "flash" o cambios transitorios en la visión cuando comienza o termina la sesión de estimulación.
- Puede experimentar problemas leves de concentración durante o, con menos probabilidad, después de la estimulación.
- Puede sentir ansiedad durante o después del tratamiento, y en algunos casos insomnio.

No hay certeza absoluta de que estos sean los únicos riesgos asociados con la tDCS. Por lo tanto, puede ser posible que haya riesgos desconocidos asociados con la aplicación de esta técnica.

Todos los efectos adversos conocidos de la tDCS han sido transitorios, y no existe constancia de que estos puedan ser permanentes.

SI DECIDE NO PARTICIPAR EN EL ESTUDIO

La participación en el estudio es voluntaria. Tiene el derecho de decidir no participar. Si escoger participar, tiene el derecho de abandonar el estudio cuando desee. Si decide no participar o abandonar el experimento sin haberlo concluido, su decisión no afectará a su relación con grupo de investigación. Su decisión de no participar no supondrá penalizaciones ni pérdida de beneficios para usted. Los investigadores le comentarán cualquier nueva información que pueda afectar su voluntad de permanecer en el estudio.

DERECHOS DE LOS INVESTIGADORES DEL ESTUDIO

Los investigadores tienen el derecho de interrumpir su participación en el estudio si determinan que no es adecuado que continúe en él, si pudiera ser peligroso para usted continuar o si no sigue los procedimientos del estudio como le indican los investigadores.

CONFIDENCIALIDAD Y PROTECCIÓN DE DATOS DE CARÁCTER PERSONAL

La mayor parte de los datos de este estudio serán guardados en archivos electrónicos. Cualquier dato recogido de los participantes del estudio será tratado con estricta confidencialidad. Se utilizará un identificador (ID) codificado de números secuenciales y de combinación de letras para todos los resultados y datos adquiridos. La única identificación nominal será la del consentimiento informado. Toda la documentación será almacenada y guardada bajo llave en el laboratorio de investigación. Este laboratorio está localizado en las instalaciones de la Universitat de Barcelona, en un edificio seguro con accesos electrónicos en todas las entradas.

La información resultante de este estudio y de sus registros sólo podrá ser utilizada con un fin científico y puede ser publicada. Sin embargo, usted no será identificado por su nombre en las publicaciones en ningún caso. Ningún tipo de información relacionada con los datos específicos del estudio será proporcionada a terceros fuera del equipo de investigación, excepto en el caso de que el comité de ética de la universidad, el gobierno o la ley lo requieran.

Los datos se guardarán durante un período total de 7 años. Pasado este tiempo serán eliminados a través de un servicio profesional de eliminación de documentos. El acceso a cualquiera de los datos digitales del estudio requiere una contraseña que sólo es conocida por el equipo de investigación. Todos los miembros del equipo de investigación han sido formados en métodos para proteger la confidencialidad de los datos del estudio.

De conformidad con la Ley Orgánica 15/1999 de Protección de Datos de Carácter Personal, le informamos que los datos personales proporcionados en virtud de la participación en este estudio formarán parte de un fichero de Investigación debidamente registrado en la Autoridad Catalana de Protección de Datos responsabilidad de la FUNDACIÓ PER LA UNIVERSITAT OBERTA DE CATALUNYA (UOC). El interesado en cualquier momento podrá ejercer sus derechos de acceso, rectificación, cancelación y oposición dirigiéndose a: FUNDACIÓ PER LA UNIVERSITAT OBERTA DE CATALUNYA –Asesoría Jurídica- Av. Tibidabo, número 39-41, 08035 de Barcelona, o en el siguiente correo electrónico: fuoc_pd@uoc.edu.

A QUIEN LLAMAR SI TIENE DUDAS O PROBLEMAS

Si tiene alguna duda sobre esta investigación o sufre algún problema debe contactar con Sara García Sanz, o con el Dr. Diego Redolar en el 93.326.38.90.

El contacto del Comité de ética de la universidad es el siguiente: comite_etica@uoc.edu.

FORMULARIO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA COLABORAR EN UNA INVESTIGACIÓN

He leído las páginas anteriores del consentimiento informado y el investigador me ha explicado los detalles del estudio. He entendido que puedo pedir información adicional y realizar cuantas preguntas considere oportunas.

Estoy avisado de que es un proyecto de investigación y de que pueden aparecer efectos secundarios imprevistos.

Entiendo que la participación en este estudio es voluntaria y puedo rechazar participar o discontinuar mi participación en cualquier momento sin ninguna consecuencia.

Tengo una copia del presente documento que será firmada por mi parte, por parte del investigador principal y por un testigo.

Consiento en participar en este estudio y para que conste a los efectos oportunos firmo el presente documento.

Nombre y firma del participante
de _____ de 2021

En Barcelona a _____

Nombre y firma investigador principal
de _____ de 2021

En Barcelona a _____

Nombre y firma testigo
de _____ de 2021

En Barcelona a _____

APÉNDICE 9. Resultados de los análisis estadísticos utilizando las variables transformadas según la modelización EZ (Wagenmakers et al., 2007).

Análisis factorial (7 tareas x 3 regiones) con cada una de las variables:

Medida: Boundary separation

	gl	gl error	Media cuadrática	F	Sig.	Eta parcial al cuadrado	Parámetro sin centralidad	Potencia observada ^a
Tarea	6	54	0,059	25,404	<,001	0,738	152,424	1,000
Estimulación	2	18	0,004	1,682	0,214	0,157	3,365	0,307
Tarea*Estimulación	12	108	0,001	0,668	0,778	0,069	8,017	0,365
n								

a. Se ha calculado utilizando $\alpha = 0,05$. gl: grados de libertad

Medida: Drift Rate

	gl	gl error	Media cuadrática	F	Sig.	Eta parcial al cuadrado	Parámetro sin centralidad	Potencia observada ^a
Tarea	6	54	0,057	39,472	<,001	0,814	236,832	1,000
Estimulación	2	18	0,002	1,306	0,295	0,127	2,611	0,246
Tarea*Estimulación	12	108	0,001	0,721	0,728	0,074	8,655	0,395
n								

a. Se ha calculado utilizando $\alpha = 0,05$. gl: grados de libertad

Medida: Non Decision Time

	gl	gl error	Media cuadrática	F	Sig.	Eta parcial al cuadrado	Parámetro sin centralidad	Potencia observada ^a
Tarea	6	54	1,934	19,784	<,001	0,687	118,704	1,000
Estimulación	2	18	0,066	0,822	0,455	0,084	1,644	0,169
Tarea*Estimulación	12	108	0,030	0,692	0,756	0,071	8,308	0,379
n								

a. Se ha calculado utilizando $\alpha = 0,05$. gl: grados de libertad

APÉNDICE 10. Criterios de aplicación de los modelos estadísticos: normalidad y esfericidad. Resultados de las pruebas correspondientes al estudio cognitivo-conductual transversal acerca de la capacidad para procesar e integrar información cuantitativa numérica y la espacial (Estudio 2)

Están señalados en **negrita** los valores que permiten asumir la hipótesis nula (distribución normal) en las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, las cuales son adecuadas para tamaños de muestra superior a 50. Asimismo están marcados los valores que permiten asumir la hipótesis nula (esfericidad) mediante la prueba estadística de Mauchly.

A) Distribución de las variables de desempeño en la tareas de comparación en los tres grupos de edad

Pruebas de normalidad

	GrupoEdad	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
NoSim_Ac	1	0,131	37	0,113	0,937	37	0,037
	2	0,178	42	0,002	0,910	42	0,003
	3	0,212	37	0,000	0,795	37	0,000
NMix_Ac	1	0,099	37	0,200*	0,966	37	0,307
	2	0,091	42	0,200*	0,959	42	0,133
	3	0,147	37	0,042	0,924	37	0,014
AR_Ac	1	0,127	37	0,137	0,968	37	0,369
	2	0,204	42	0,000	0,873	42	0,000
	3	0,141	37	0,063	0,906	37	0,004
AMix_Ac	1	0,119	37	0,200*	0,962	37	0,233
	2	0,157	42	0,011	0,946	42	0,048
	3	0,290	37	0,000	0,695	37	0,000
AI_Ac	1	0,111	37	0,200*	0,947	37	0,078
	2	0,074	42	0,200*	0,978	42	0,575
	3	0,156	37	0,023	0,924	37	0,014
AMixI_Ac	1	0,088	37	0,200*	0,973	37	0,488
	2	0,130	42	0,073	0,953	42	0,086
	3	0,174	37	0,006	0,939	37	0,044

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera. a. Corrección de significación de Lilliefors.

NOTA: NoSim_Ac: Tasa de aciertos en comparación numérica no simbólica, NMix-Ac: tasa de aciertos en comparación numérica mixta, AR_Ac: tasa de aciertos en comparación de áreas regulares continuas, AMix_Ac: tasa de aciertos en comparación de áreas regulares continuas y discretas, AI_Ac: tasa de aciertos en comparaciones de áreas irregulares continuas. AMixI_Ac: tasa de aciertos en comparación de áreas irregulares continuas y discretas.

Prueba de esfericidad de Mauchly^a

Efecto	W de	Aprox.				Épsilon ^b	
intra-	W de	Chi-			Greenhouse-	Huynh-	
sujetos	Mauchly	cuadrado	gl	Sig.	Geisser	Feldt	Límite inferior
Task	0,592	57,222	14	0,000	0,834	0,902	0,200

Prueba la hipótesis nula de que la matriz de covarianzas de error de las variables dependientes con transformación ortonormalizada es proporcional a una matriz de identidad.

a. Diseño : Intersección + Sex + Laterality + AgeGroup

Diseño intra-sujetos: Task

b. Se puede utilizar para ajustar los grados de libertad para las pruebas promedio de significación. Las pruebas corregidas se visualizan en la tabla de pruebas de efectos intra-sujetos.

B) Distribución de las variables de desempeño en las magnitudes (numérica, espacial regular, espacial irregular) en los tres grupos de edad

Pruebas de normalidad

	GrupoEdad	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Numérica	1	0,126	37	0,147	0,975	37	0,548
	2	0,101	42	0,200*	0,944	42	0,039
	3	0,157	37	0,022	0,860	37	0,000
Area_Reg	1	0,094	37	0,200*	0,979	37	0,713
	2	0,175	42	0,002	0,924	42	0,008
	3	0,231	37	0,000	0,780	37	0,000
Area_Irreg	1	0,086	37	0,200*	0,961	37	0,224
	2	0,120	42	0,140	0,960	42	0,146
	3	0,128	37	0,130	0,951	37	0,105

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera. a. Corrección de significación de Lilliefors

NOTA: Numérica: tareas de comparación numérica, Area_Reg: Tareas de comparación de áreas regulares, Area_Irreg: tareas de comparación de áreas irregulares.

Prueba de esfericidad de Mauchly^a

Efecto	W de	Aprox.				Épsilon ^b	
intra-	W de	Chi-			Greenhouse-	Huynh-	
sujetos	Mauchly	cuadrado	gl	Sig.	Geisser	Feldt	Límite inferior
Magnitud	0,976	2,681	2	0,262	0,976	1,000	0,500

Prueba la hipótesis nula de que la matriz de covarianzas de error de las variables dependientes con transformación ortonormalizada es proporcional a una matriz de identidad.

a. Diseño : Intersección + Sex + Laterality + AgeGroup

Diseño intra-sujetos: Magnitud

b. Se puede utilizar para ajustar los grados de libertad para las pruebas promedio de significación. Las pruebas corregidas se visualizan en la tabla de pruebas de efectos intra-sujetos.

C) Distribución de las variables de desempeño en los tipos de tarea (uni-formato y mixta) espacial irregular) en los tres grupos de edad

Pruebas de normalidad

	GrupoEdad	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
UniFormat o_Ac	1	0,117	37	0,200*	0,962	37	0,228
	2	0,154	42	0,014	0,935	42	0,019
	3	0,083	37	0,200*	0,937	37	0,036
Mixta_Ac	1	0,131	37	0,109	0,954	37	0,130
	2	0,117	42	0,168	0,972	42	0,374
	3	0,147	37	0,042	0,849	37	0,000

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera. a. Corrección de significación de Lilliefors.

NOTA: UniFormat_Ac: tasas de aciertos del conjunto de tareas uniformato, Mixta_Ac: tasas de aciertos en las tareas de comparación mixtas.

Prueba de esfericidad de Mauchly^a

Efecto	W de	Aprox.			Épsilon ^b		
intra- sujetos	Mauchly	Chi- cuadrado	gl	Sig.	Greenhouse- Geisser	Huynh- Feldt	Límite inferior
TipoTarea	1,000	0,000	0	.	1,000	1,000	1,000

Prueba la hipótesis nula de que la matriz de covarianzas de error de las variables dependientes con transformación ortonormalizada es proporcional a una matriz de identidad.

a. Diseño : Intersección + Sex + Laterality + AgeGroup

Diseño intra-sujetos: TipoTarea

b. Se puede utilizar para ajustar los grados de libertad para las pruebas promedio de significación. Las pruebas corregidas se visualizan en la tabla de pruebas de efectos intra-sujetos.

APÉNDICE 11. Descriptivos del rendimiento (en % de aciertos) de los tres grupos de edad en cada una de las tareas (A) y comparaciones múltiples (B).

A)

GrupoEdad	Tarea	Media	Desv. Error	Intervalo de confianza al 95%	
				Límite inferior	Límite superior
1	1	70,779	1,407	67,992	73,567
	2	59,429	1,166	57,118	61,740
	3	71,767	1,575	68,646	74,888
	4	74,174	1,936	70,339	78,010
	5	56,927	1,277	54,397	59,458
	6	55,294	1,455	52,410	58,177
2	1	72,608	1,343	69,946	75,270
	2	55,291	1,114	53,084	57,498
	3	76,066	1,504	73,086	79,047
	4	72,330	1,849	68,667	75,993
	5	59,407	1,220	56,990	61,824
	6	59,457	1,390	56,703	62,211
3	1	84,817	1,402	82,039	87,596
	2	67,626	1,162	65,322	69,929
	3	88,089	1,570	84,978	91,199
	4	88,744	1,929	84,921	92,568
	5	70,558	1,273	68,035	73,080
	6	69,907	1,450	67,033	72,781

Nota: Tareas: 1: numérica no simbólica, 2: numérica mixta, 3: áreas continuas regulares, 4: áreas regulares mixtas, 5: áreas continuas irregulares, 6: áreas irregulares mixtas.

B)

Tarea	(I) Grupo	(J) Grupo	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
	Edad	Edad				Límite inferior	Límite superior
Numérica no-simbólica	1	2	-2,48304	1,93622	0,607	-7,1883	2,2223
		3	-14,16917*	1,99655	< 0,001	-19,0211	-9,3173
	2	1	2,48304	1,93622	0,607	-2,2223	7,1883
		3	-11,68613*	1,93622	< 0,001	-16,3914	-6,9808
	3	1	14,16917*	1,99655	< 0,001	9,3173	19,0211
		2	11,68613*	1,93622	< 0,001	6,9808	16,3914
Numérica mixta	1	2	3,60721	1,61639	0,083	-0,3208	7,5353
		3	-8,31968*	1,66675	< 0,001	-12,3701	-4,2692
	2	1	-3,60721	1,61639	0,083	-7,5353	0,3208
		3	-11,92689*	1,61639	< 0,001	-15,8549	-7,9988
	3	1	8,31968*	1,66675	< 0,001	4,2692	12,3701
		2	11,92689*	1,61639	< 0,001	7,9988	15,8549
Áreas regulares continuas	1	2	-5,27206*	2,15172	0,047	-10,5010	-0,0431
		3	-16,42643*	2,21877	< 0,001	-21,8183	-11,0345
	2	1	5,27206*	2,15172	0,047	0,0431	10,5010
		3	-11,15437*	2,15172	< 0,001	-16,3834	-5,9254
	3	1	16,42643*	2,21877	< 0,001	11,0345	21,8183
		2	11,15437*	2,15172	< 0,001	5,9254	16,3834
Áreas regulares mixtas	1	2	-,11532	2,69875	1,000	-6,6737	6,4430
		3	-14,72186*	2,78284	< 0,001	-21,4846	-7,9592
	2	1	,11532	2,69875	1,000	-6,4430	6,6737
		3	-14,60655*	2,69875	< 0,001	-21,1649	-8,0482
	3	1	14,72186*	2,78284	< 0,001	7,9592	21,4846
		2	14,60655*	2,69875	< 0,001	8,0482	21,1649
Áreas irregulares continuas	1	2	-2,94640	1,73804	0,278	-7,1701	1,2773
		3	-13,71371*	1,79220	< 0,001	-18,0690	-9,3584
	2	1	2,94640	1,73804	0,278	-1,2773	7,1701
		3	-10,76731*	1,73804	< 0,001	-14,9910	-6,5436
	3	1	13,71371*	1,79220	< 0,001	9,3584	18,0690
		2	10,76731*	1,73804	< 0,001	6,5436	14,9910
Áreas irregulares mixtas	1	2	-4,83847	2,00556	0,052	-9,7123	0,0353
		3	-14,75225*	2,06805	< 0,001	-19,7779	-9,7266
	2	1	4,83847	2,00556	0,052	-0,0353	9,7123
		3	-9,91378*	2,00556	< 0,001	-14,7876	-5,0400
	3	1	14,75225*	2,06805	< 0,001	9,7266	19,7779
		2	9,91378*	2,00556	< 0,001	5,0400	14,7876

NOTA: *. La diferencia de medias es significativa en el nivel $p < 0,05$.

APÉNDICE 12. Criterios de aplicación de los modelos estadísticos: normalidad, esfericidad. Resultados de las pruebas correspondientes al ensayo aleatorizado de los efectos de la modulación de la excitabilidad cortical de las regiones frontoparietales sobre la capacidad para procesar e integrar información cuantitativa numérica y la espacial (Estudio 3).

Están señalados en negrita los valores que permiten asumir la hipótesis nula (distribución normal) en las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk, las cuales son adecuadas para tamaños de muestra inferior a 50. Asimismo están marcados los valores que permiten asumir la hipótesis nula (esfericidad) mediante la prueba estadística de Mauchly.

A) Distribución de las variables de desempeño en las 7 tareas en cada condición de estimulación.

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Sim_FA_RTM	0,293	10	0,015	0,692	10	0,001
Sim_FA_Ac	0,287	10	0,019	0,837	10	0,040
Sim_PA_RTM	0,150	10	0,200*	0,912	10	0,295
Sim_PA_Ac	0,200	10	0,200*	0,932	10	0,466
Sim_CON_RTM	0,402	10	0,000	0,502	10	0,000
Sim_CON_Ac	0,251	10	0,075	0,840	10	0,044
NoSim_FA_RTM	0,131	10	0,200*	0,987	10	0,993
NoSim_FA_Ac	0,276	10	0,029	0,836	10	0,040
NoSim_PA_RTM	0,341	10	0,002	0,732	10	0,002
NoSim_PA_Ac	0,237	10	0,117	0,807	10	0,018
NoSim_CON_RTM	0,140	10	0,200*	0,936	10	0,506
NoSim_CON_Ac	0,160	10	0,200*	0,971	10	0,903
NMix_FA_RTM	0,158	10	0,200*	0,946	10	0,626
NMix_FA_Ac	0,119	10	0,200*	0,963	10	0,822
NMix_PA_RTM	0,278	10	0,027	0,803	10	0,016
NMix_PA_Ac	0,199	10	0,200*	0,876	10	0,117
NMix_CON_RTM	0,208	10	0,200*	0,931	10	0,453
NMix_CON_Ac	0,140	10	0,200*	0,958	10	0,763
AR_FA_RTM	0,192	10	0,200*	0,872	10	0,105
AR_FA_Ac	0,171	10	0,200*	0,907	10	0,260

AR_PA_RTM	0,175	10	0,200*	0,884	10	0,146
AR_PA_Ac	0,175	10	0,200*	0,950	10	0,665
AR_CON_RTM	0,181	10	0,200*	0,933	10	0,476
AR_CON_Ac	0,108	10	0,200*	0,977	10	0,947
AMixR_FA_RTM	0,189	10	0,200*	0,947	10	0,628
AMixR_FA_Ac	0,215	10	0,200*	0,908	10	0,266
AMixR_PA_RTM	0,220	10	0,186	0,902	10	0,233
AMixR_PA_Ac	0,188	10	0,200*	0,969	10	0,882
AMixR_CON_RTM	0,161	10	0,200*	0,957	10	0,748
AMixR_CON_Ac	0,175	10	0,200*	0,945	10	0,606
AI_FA_RTM	0,226	10	0,159	0,920	10	0,357
AI_FA_Ac	0,215	10	0,200*	0,934	10	0,493
AI_PA_RTM	0,179	10	0,200*	0,927	10	0,415
AI_PA_Ac	0,207	10	0,200*	0,891	10	0,173
AI_CON_RTM	0,171	10	0,200*	0,884	10	0,146
AI_CON_Ac	0,254	10	0,066	0,815	10	0,022
AMixI_FA_RTM	0,226	10	0,159	0,920	10	0,357
AMixI_FA_Ac	0,252	10	0,073	0,903	10	0,238
AMixI_PA_RTM	0,179	10	0,200*	0,927	10	0,415
AMixI_PA_Ac	0,281	10	0,025	0,840	10	0,044
AMixI_CON_RTM	0,171	10	0,200*	0,884	10	0,146
AMixI_CON_Ac	0,180	10	0,200*	0,943	10	0,592

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Pruebas de esfericidad de Mauchly^a

Medida: RT

Efecto intra-sujetos	W de Mauchly	Aprox. Chi-cuadrado	gl	Sig.	Greenhouse-Geisser	Épsilon ^b	
						Huynh-Feldt	Límite inferior
tipoTarea	0,000	.	20	.	0,437	0,632	0,167
region	0,954	0,374	2	0,829	0,956	1,000	0,500
tipoTarea * region	0,000	.	77	.	0,217	0,314	0,083

Prueba la hipótesis nula de que la matriz de covarianzas de error de las variables dependientes con transformación ortonormalizada es proporcional a una matriz de identidad.

a. Diseño : Intersección

Diseño intra-sujetos: tipoTarea + region + tipoTarea * region

b. Se puede utilizar para ajustar los grados de libertad para las pruebas promedio de significación. Las pruebas corregidas se visualizan en la tabla de pruebas de efectos intra-sujetos.

Medida: AC

Efecto intra-sujetos	W de Mauchly	Aprox. Chi-cuadrado	gl	Sig.	Greenhouse-Geisser	Épsilon ^b	
						Huynh-Feldt	Límite inferior
tipoTarea	0,011	30,270	20	0,090	0,378	0,513	0,167
region	0,650	3,448	2	0,178	0,741	0,852	0,500
tipoTarea * region	0,000	.	77	.	0,352	0,700	0,083

Prueba la hipótesis nula de que la matriz de covarianzas de error de las variables dependientes con transformación ortonormalizada es proporcional a una matriz de identidad.

a. Diseño : Intersección

Diseño intra-sujetos: tipoTarea + region + tipoTarea * region

b. Se puede utilizar para ajustar los grados de libertad para las pruebas promedio de significación. Las pruebas corregidas se visualizan en la tabla de pruebas de efectos intra-sujetos.

B) Distribución de las variables de desempeño en las magnitudes (numérica, espacial regular y espacial irregular) en cada condición de estimulación

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Num_FA_RT	0,155	10	0,200*	,945	10	0,616
Num_FA_Ac	0,221	10	0,181	,903	10	0,238
Reg_FA_RT	0,145	10	0,200*	,950	10	0,673
Reg_FA_Ac	0,129	10	0,200*	,935	10	0,495
Irreg_FA_RT	0,226	10	0,159	,920	10	0,357
Irreg_FA_RT1	0,163	10	0,200*	,945	10	0,615
Num_PA_RT	0,238	10	0,113	,815	10	0,022
Num_PA_Ac	0,203	10	0,200*	,899	10	0,213
Reg_PA_RT	0,172	10	0,200*	,892	10	0,178
Reg_PA_Ac	0,183	10	0,200*	,948	10	0,650
Irreg_PA_RT	0,179	10	0,200*	,927	10	0,415
Irreg_PA_Ac	0,211	10	0,200*	,862	10	0,080
Num_CON_RT	0,196	10	0,200*	,903	10	0,237
Num_CON_Ac	0,177	10	0,200*	,916	10	0,321
Reg_CON_RT	0,178	10	0,200*	,935	10	0,497
Reg_CON_Ac	0,203	10	0,200*	,868	10	0,095
Irreg_CON_RT	0,171	10	0,200*	,884	10	0,146
Irreg_CON_Ac	0,194	10	0,200*	,929	10	0,436

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Pruebas de esfericidad de Mauchly^a

Medida: RT

Efecto intra-sujetos	W de Mauchly	Aprox. Chi-cuadrado	gl	Sig.	Greenhouse-Geisser	Épsilon ^b	
						Huynh-Feldt	Límite inferior
Magnitud	0,988	0,099	2	0,951	0,988	1,000	0,500
Estimulación	0,980	0,160	2	0,923	0,981	1,000	0,500
Magnitud * Estimulación	0,060	20,885	9	0,015	0,611	0,856	0,250

Prueba la hipótesis nula de que la matriz de covarianzas de error de las variables dependientes con transformación ortonormalizada es proporcional a una matriz de identidad.

a. Diseño : Intersección

Diseño intra-sujetos: Magnitud + Estimulación + Magnitud * Estimulación

b. Se puede utilizar para ajustar los grados de libertad para las pruebas promedio de significación. Las pruebas corregidas se visualizan en la tabla de pruebas de efectos intra-sujetos.

Medida: AC

Efecto intra-sujetos	W de Mauchly	Aprox. Chi-cuadrado	gl	Sig.	Greenhouse-Geisser	Épsilon ^b	
						Huynh-Feldt	Límite inferior
Magnitud	0,532	5,042	2	0,080	0,681	0,761	0,500
Estimulación	0,802	1,761	2	0,415	0,835	1,000	0,500
Magnitud * Estimulación	0,225	11,056	9	0,283	0,643	0,923	0,250

Prueba la hipótesis nula de que la matriz de covarianzas de error de las variables dependientes con transformación ortonormalizada es proporcional a una matriz de identidad.

a. Diseño : Intersección

Diseño intra-sujetos: Magnitud + Estimulación + Magnitud * Estimulación

b. Se puede utilizar para ajustar los grados de libertad para las pruebas promedio de significación. Las pruebas corregidas se visualizan en la tabla de pruebas de efectos intra-sujetos.

C) Distribución de las variables de desempeño en los tipos de tarea (uni-formato y mixta) en cada condición de estimulación

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Pur_FA_RT	0,167	10	0,200*	0,894	10	0,186
Pur_FA_Ac	0,225	10	0,162	0,926	10	0,411
Mix_FA_RT	0,158	10	0,200*	0,927	10	0,418
Mix_FA_Ac	0,289	10	0,018	0,852	10	0,061
Pur_PA_RT	0,286	10	0,020	0,766	10	0,006
Pur_PA_Ac	0,187	10	0,200*	0,901	10	0,222

Mix_PA_RT	0,203	10	0,200*	0,918	10	0,338
Mix_PA_Ac	0,211	10	0,200*	0,859	10	0,074
Pur_CON_RT	0,199	10	0,200*	0,913	10	0,302
Pur_CON_Ac	0,186	10	0,200*	0,929	10	0,441
Mix_CON_RT	0,189	10	0,200*	0,915	10	0,313
Mix_CON_Ac	0,146	10	0,200*	0,937	10	0,518

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Pruebas de esfericidad de Mauchly^a

Medida: RT

Efecto intra-sujetos	W de Mauchly	Aprox. Chi-cuadrado	gl	Sig.	Greenhouse-Geisser	Épsilon ^b Huynh-Feldt	Límite inferior
TipoTarea	1,000	0,000	0	.	1,000	1,000	1,000
Estimulación	0,971	0,237	2	0,888	0,972	1,000	0,500
TipoTarea * Estimulación	0,963	0,302	2	0,860	0,964	1,000	0,500

Prueba la hipótesis nula de que la matriz de covarianzas de error de las variables dependientes con transformación ortonormalizada es proporcional a una matriz de identidad.

a. Diseño : Intersección

Diseño intra-sujetos: TipoTarea + Estimulación + TipoTarea * Estimulación

b. Se puede utilizar para ajustar los grados de libertad para las pruebas promedio de significación. Las pruebas corregidas se visualizan en la tabla de pruebas de efectos intra-sujetos.

Medida: AC

Efecto intra-sujetos	W de Mauchly	Aprox. Chi-cuadrado	gl	Sig.	Greenhouse-Geisser	Épsilon ^b Huynh-Feldt	Límite inferior
TipoTarea	1,000	,000	0	.	1,000	1,000	1,000
Estimulación	0,679	3,102	2	0,212	0,757	0,877	0,500
TipoTarea * Estimulación	0,959	,338	2	0,845	0,960	1,000	0,500

Prueba la hipótesis nula de que la matriz de covarianzas de error de las variables dependientes con transformación ortonormalizada es proporcional a una matriz de identidad.

a. Diseño : Intersección

Diseño intra-sujetos: TipoTarea + Estimulación + TipoTarea * Estimulación

APÉNDICE 13. Descriptivos del rendimiento en rendimiento (en % de aciertos) en cada una de las tareas para cada condición de estimulación (A), descriptivos del rendimiento (en % de aciertos) en cada una de las magnitudes para cada condición de estimulación (B), y descriptivos del rendimiento (en TR) en cada uno de los tipos de tareas para las tres condiciones de estimulación (C).

A)

Region	Tarea	Media	Desv. Error	Intervalo de confianza al 95%	
				Límite inferior	Límite superior
Prefrontal	1	97,500	0,812	95,663	99,337
	2	88,875	0,778	87,114	90,636
	3	78,958	1,128	76,406	81,511
	4	89,375	1,106	86,872	91,878
	5	75,979	2,553	70,203	81,756
	6	92,375	1,028	90,049	94,701
	7	76,875	2,707	70,752	82,998
Parietal	1	97,875	0,529	96,679	99,071
	2	85,250	3,009	78,443	92,057
	3	78,750	1,021	76,441	81,059
	4	89,500	1,253	86,666	92,334
	5	74,433	2,061	69,771	79,095
	6	94,375	0,839	92,478	96,272
	7	76,458	2,699	70,352	82,565
Sham	1	97,875	0,647	96,412	99,338
	2	88,750	1,118	86,221	91,279
	3	79,010	0,919	76,932	81,089
	4	89,000	1,302	86,055	91,945
	5	74,072	2,004	69,539	78,605
	6	91,938	1,445	88,669	95,206
	7	75,331	2,750	69,109	81,553

NOTA: Tareas: 1: numérica simbólica, 2: numérica no simbólica, 3: numérica mixta, 4: áreas continuas regulares, 5: áreas regulares mixtas, 6: áreas continuas irregulares, 7: áreas irregulares mixtas

B)

Magnitud	Estimulación	Media	Desv. Error	Intervalo de confianza al 95%	
				Límite inferior	Límite superior
Numérica	Prefrontal	88,444	0,317	87,726	89,163
	Parietal	87,292	1,098	84,808	89,775
	Sham	88,545	0,493	87,430	89,660
Áreas regulares	Prefrontal	82,677	1,456	79,385	85,970
	Parietal	81,966	1,364	78,881	85,052
	Sham	81,536	1,387	78,399	84,674
Áreas irregulares	Prefrontal	84,625	1,494	81,246	88,004
	Parietal	85,417	1,596	81,806	89,027
	Sham	83,634	1,855	79,438	87,831

C)

TipoTarea	Estimulación	Media	Desv. Error	Intervalo de confianza al 95%	
				Límite inferior	Límite superior
Uni-formato	Prefrontal	0,732	0,014	0,701	0,764
	Parietal	0,822	0,033	0,748	0,897
	Sham	0,872	0,044	0,773	0,971
Mixtas	Prefrontal	0,919	0,033	0,843	0,995
	Parietal	1,024	0,064	0,879	1,169
	Sham	1,055	0,055	0,931	1,179

APÉNDICE 14. Análisis crítico del modelo de área aditiva heurística.

S. Yousif y colaboradores han propuesto una explicación a la ilusión perceptiva de la estimación de las áreas acumuladas centrada en la hipótesis de que las estimaciones del área acumulada no se basan en el área real de los estímulos, sino en una aproximación heurística de tipo aditivo, que consiste en sumar el ancho y el largo de los estímulos (Yousif y Keil, 2019). Sin embargo, esta propuesta no es original, ya que tiene un precedente claro en N.H. Anderson y D. Cuneo (1978) quienes propusieron la regla del Ancho + Largo para las estimaciones de áreas acumuladas en niños.

Por otro lado, en sus investigaciones (Bennette et al., 2021; Yousif et al., 2020, 2022; Yousif y Keil, 2019) analizan a qué modelo se ajustan mejor las estimaciones de áreas

acumuladas si al área real o al área aditiva heurística. El problema es que la diferencia numérica entre lo que ellos denominan área aditiva heurística y el área real, toma valores distintos según cuál sea el sistema de medida.

Por ejemplo, estos autores sostienen que, en un cuadrado de 1 cm de lado, el área aditiva no coincide con el área real, ya que el área real será $1 \times 1 = 1 \text{ cm}^2$, mientras que la estimación heurística del área será $1 + 1 = 2$. Por lo tanto la diferencia entre el área aditiva y el área heurística es de 1 unidad.

Sistema de medida	Unidad	Lado	Área Real	Área heurística	Diferencia A. Heurística – A. Real
Sistema Métrico	cm	1	1	2	1
Sistema Imperial	Pulgada	0,393701	0,1550004774	0,787402	0,6324015226
Píxeles	píxel	118,11	13949,9721	236,22	-13713,7521
Sistema Nuevo	nueva	2	4	4	0

Sin embargo, si utilizamos pulgadas, la diferencia entre el área heurística y el área real será de 0,6324015226 (Tabla). Mientras que la diferencia si utilizamos píxeles²⁶ será de -13713,7521.

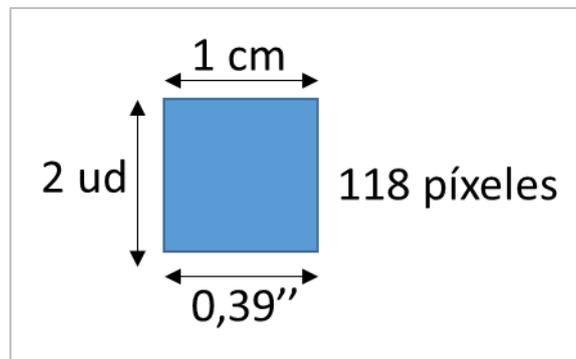
Además, como los sistemas de medida son convencionales, podríamos pensar en un sistema de medida de un contexto X donde la equivalencia de 1cm fueran 2 unidades del sistema de medida nuevo. En ese caso, ¿no habría diferencia entre el área heurística y el área real!

Entonces, la diferencia entre el área estimada (heurística) y el área real, varía según el sistema de medida utilizado.

Por lo tanto, en los estudios cognitivo-conductuales de estimación de áreas acumuladas, los resultados se van a ajustar más o menos a las predicciones del modelo de área heurística, según el sistema de medida que utilicemos. Podrá ocurrir que, para un mismo y único estímulo (ver Figura), si analizamos las estimaciones de los sujetos experimentales usando el sistema métrico, concluiremos que se ajustan al modelo del área heurística; y si utilizamos otra unidad de medida diferente, en ese caso las estimaciones no se ajusten al conjunto de valores predichos por el modelo. Lo cual se trata de un

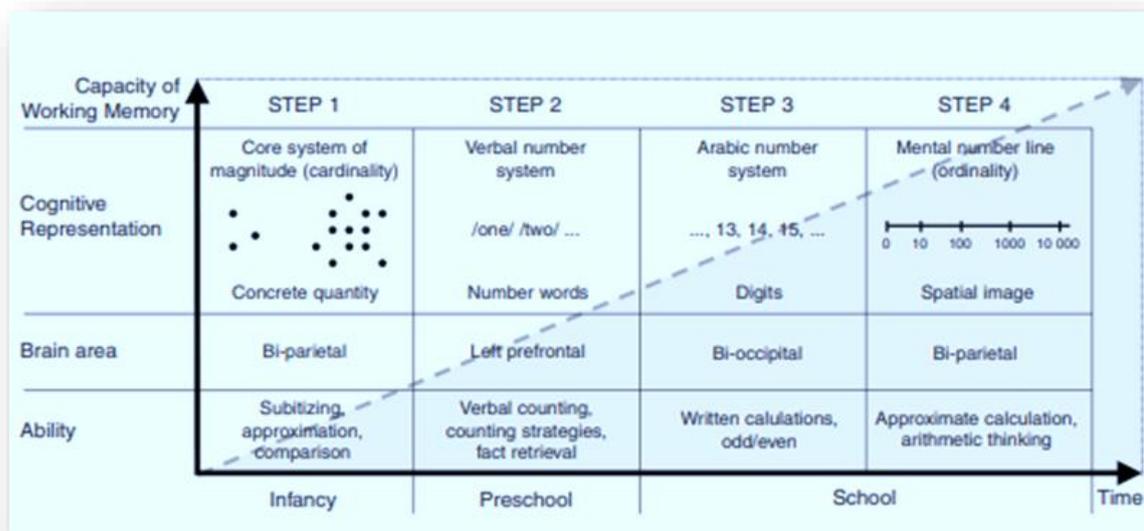
²⁶ La equivalencia de cm a píxeles varía según la resolución, la hemos calculado para una resolución de 300 ppi.

artefacto matemático, que distorsiona la interpretación de los resultados, y nos lleva a cuestionar los análisis y comparaciones hechos en base al modelo del área heurística.



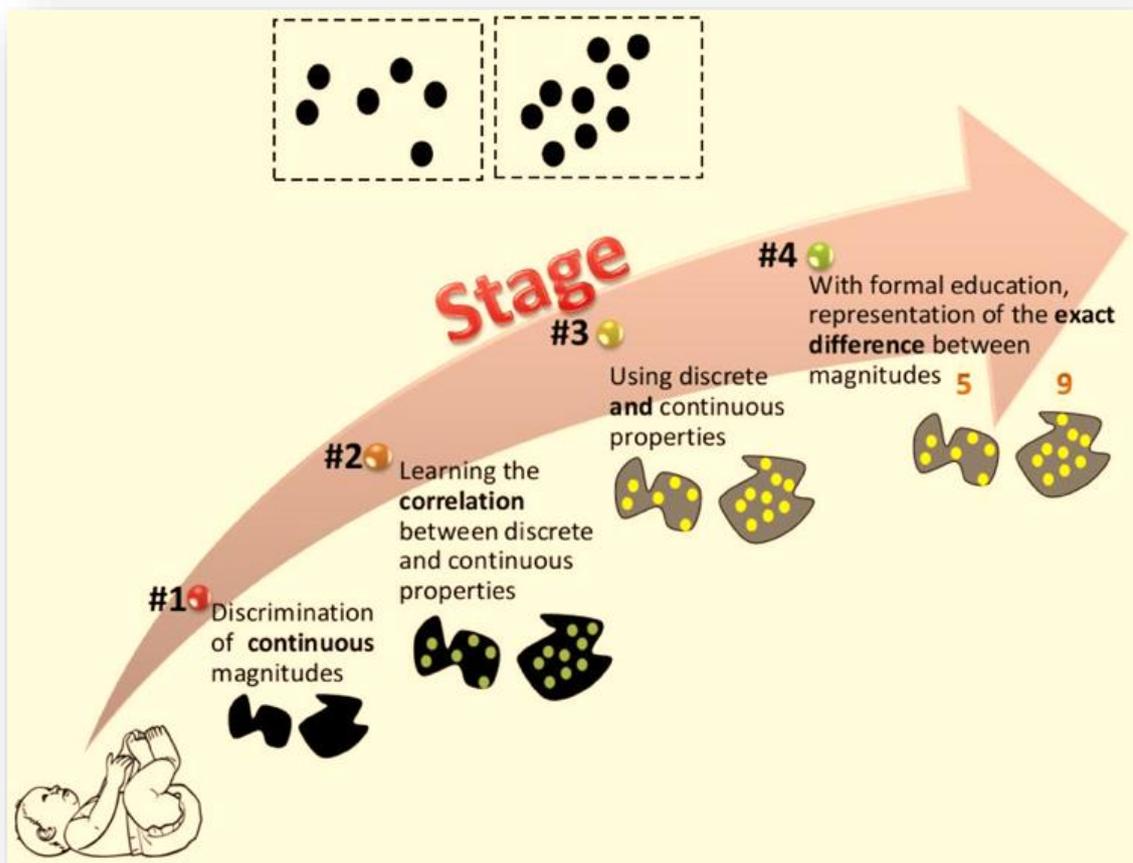
Adicionalmente, el modelo del área heurística ha recibido críticas de varios autores. Por ejemplo, J. Park (2021) plantea serias fallas en el diseño de estímulos presentes en todos los experimentos de Yousif y sus colegas. Específicamente los conjuntos de áreas utilizados muestran una estructura correlacional sesgada entre las dimensiones de magnitud seleccionadas, y presentan rangos no balanceados de las magnitudes de interés. Además, debido a las interferencias en el procesamiento de las diversas magnitudes entre sí, y a que nuestro sistema de percepción es sensible a las regularidades estadísticas de la entrada sensorial, un diseño tan sesgado dificulta, si no imposibilita, interpretar el comportamiento de elección de los participantes cuando hacen sus juicios de magnitud.

APÉNDICE 15. Esquema representativo del modelo de desarrollo del sentido numérico de Von Aster y Shalev (2007).



Adaptado de Von Aster y Shalev (2007).

APÉNDICE 16. Esquema representativo del modelo de desarrollo del MPS de Leibovich y Henik (2013)



Adaptado de Leibovich y Henik (2013).