



Universidad
Zaragoza

Decodificación visual en el sistema numérico: qué hace el cerebro para reconocer la forma del número.

Autor

Gonzalo Hernández Aceituno

Directora

Elena Salillas Perez

Grado en Psicología

2022

Decodificación visual en el sistema numérico : qué hace el cerebro para reconocer la forma del número

Resumen

Diversos estudios se han encargado de reconocer un área del cerebro especializada en el procesamiento de la forma numérica, aunque estos intentos han sido poco claros y concretos, por lo que sigue en discusión si acaso existe esta área especializada. En este trabajo se estudia la posibilidad de que tareas relacionadas con reconocimiento de la forma de los números pueda estar vinculada con esta área especializada. Para ello utilizamos la técnica de magnetoencefalografía (MEG) que nos proporciona alta resolución espacial y temporal. Comparamos las fuentes corticales responsables de la decodificación de letras y números. Los resultados muestran algunas áreas de solapamiento, pero también disociación, en la corteza occipito-temporal izquierda. El presente trabajo supone un análisis preliminar que ha sido ampliado en un trabajo relacionado dentro de mis estudios de grado.

Palabras clave: MEG, Lóbulo temporal, number form area, visual word form area.

Visual decodification on the number system: what does the brain to recognize the number form

Abstract

Several studies have been in charge of recognizing an area of the brain specialized in the processing of numerical form, although these attempts have been unclear and concrete, so it is still under discussion if this specialized area exists. This paper studies the possibility that tasks related to number shape recognition may be linked to this specialized area. For this we use the magnetoencephalography (MEG) technique that provides us with high spatial and temporal resolution. We compared the cortical sources responsible for decoding letters and numbers. The results show some areas of overlap, but also dissociation, in the left occipito-temporal cortex. The present work supposes a preliminary analysis that has been extended in a related work within my undergraduate studies.

Key words: MEG, temporal lobe, number form area, visual word form area.

Introducción

El cerebro humano se caracteriza por ejercer funciones complejas que no se encuentran en los cerebros de otros animales, como el razonamiento, el lenguaje y, también, las matemáticas. Esta complejidad del cerebro humano se suele asociar a la aparición en la escala evolutiva de la corteza prefrontal (Sánchez-Navarro y Román. 2004), donde ocurren los procesos del razonamiento humano, la asimilación de las emociones, las funciones ejecutivas y la formación de la personalidad, entre otros. Sin embargo, hay otras áreas del cerebro que también se encargan de procesos complejos que aparecen con el homo sapiens, como el lenguaje y las matemáticas. Ambas funciones conllevan el uso de un sistema simbólico a través de las letras o los números arábigos. Evidentemente, este sistema simbólico no es compartido por otras especies y es fruto de la enculturación. Sin embargo, se asienta para algunas funciones, como veremos, en áreas de especialización más simples y compartidas entre especies. Como el sistema lingüístico, el sistema numérico es un sistema complejo, sustentado por distintas áreas y redes cerebrales. Utilizamos distintos subsistemas dependiendo de la tarea numérica que se realice (REF - Triple code model - Dehaene y Cohen 1998; Dehaene et al. 2003).

El hecho de que tareas tan complejas como el procesamiento lingüístico y el razonamiento matemático tengan lugar en regiones del cerebro más primitivas, donde no hay pistas de un proceso evolutivo que haya permitido una especialización de estas áreas para tales tareas, nos dice mucho sobre el funcionamiento del cerebro humano. Los recientes estudios sobre plasticidad cerebral (Chung et al. 2021) podrían explicar este fenómeno, ya que nos dan una visión dinámica de las conexiones neuronales. Ya no se entiende el cerebro como un hardware con distintos sistemas especializados que ejercen funciones diferentes e incompatibles entre sí, sino como un sistema que, si bien distribuye las tareas en regiones más o menos especializadas, cuenta con una red capaz de comunicar todas las regiones entre sí, cuestión de que, si hay un área que está dañada, por ejemplo, ésta puede encargar a otra región la tarea que cumplía previamente. Es lo que se conoce como “Conectomics” (2021). De hecho, se ha propuesto que la especialización de ciertas áreas del lóbulo temporal inferior en el procesamiento de letras o números responde a su inclusión en redes más amplias del lenguaje o el número que “presionarían” para su reclutamiento.

Bajo esta comprensión del cerebro humano, el entendimiento de las regiones cerebrales especializadas coge una nueva forma. La especialización ya no es un proceso rígido, vinculado a la anatomía en sí de las distintas áreas corticales, que podrían asimilarse a un hardware con una configuración específica pensada previamente para la ejecución de una tarea, sino más bien a un sistema homogéneo que, según los recursos disponibles, distribuye la asignación de tareas

relacionadas a distintas regiones corticales. Es ahí donde ocurre la diferenciación. Es por esta razón que el cerebro humano puede adaptarse a las nuevas dificultades que pueda presentar su entorno, aún cuando no exista una preparación específica a nivel evolutivo, y también delegar tareas que deja de cumplir un área que ha recibido daño (2021). El concepto de adaptabilidad es fundamental para entender cómo el cerebro es capaz de procesar el lenguaje y el razonamiento matemático.

Lo que sí se conoce es que estas tareas complejas se localizan principalmente en áreas del lóbulo temporal, con participación del área occipital y frontal del cerebro. Sabemos que las áreas que nos interesan del lóbulo temporal han evolucionado en nuestro cerebro para poder reconocer estímulos visuales que pueden ser complejos pero muy significativos para el control conductual, como los rostros humanos (Dehaene y Cohen. 2007). El reconocimiento del rostro humano cumple una función vital para la formación de lazos de apego desde momentos muy tempranos del desarrollo, donde se empiezan a construir las relaciones sociales que nos caracterizan como especie. Es el área encargada de esta importantísima tarea donde también se encuentra actividad para reconocer estímulos visuales vinculados a los símbolos numéricos y lingüísticos.

Los primeros sistemas de escritura de letras y números aparecieron hace tan solo cinco mil años, de los doscientos mil años de existencia del homo sapiens moderno (Chrisomalis, 2010). El sistema numérico Indo-Arábico, que es el usado en los países occidentales y en casi todo el mundo, sólo tiene quinientos años de historia. Es imposible que el cerebro humano haya sido capaz de desarrollar evolutivamente un área cortical especializada en el procesamiento de éste tipo de hechos culturales en tan poco tiempo, por lo que se genera un proceso de reclutamiento de otras áreas capaces de procesar estímulos relacionados. Este reclutamiento neural podría tener detrás un proceso denominado “reciclaje neural” (Dehaene y Cohen. 2007).

La complejidad del sistema social y cultural del ser humano exige que seamos tan capaces de reconocer los rostros de nuestros semejantes, como de poder reconocer los sistemas de escritura, tanto de letras como de números. Si el reconocimiento de rostros es fundamental para poder construir relaciones sociales con los miembros de nuestra especie, el lenguaje y las matemáticas empiezan a ser casi tan importantes como aquello. Desórdenes limitados a la lectura o la escritura generan serios problemas de adaptación al entorno laboral y académico o incluso en la vida cotidiana, pudiendo haber una inteligencia normal o superior a la media.

Los estudios sobre los procesos cerebrales que se dan en diversas tareas relacionadas con las matemáticas no son tantos como los relacionados con el lenguaje, por lo que aún queda mucho por

investigar en esta materia. En este trabajo estudiaremos los procesos cerebrales relacionados con el reconocimiento de la forma de los números, es decir, qué sucede en el cerebro para que podamos distinguir un signo determinado como representación de un valor numérico. Los científicos que se han encargado de estudiar este fenómeno postulan la existencia de una “number form area” (NFA), que sería un área especializada del cerebro -concretamente localizada en el lóbulo occipitotemporal ventral bilateral- encargada de esta tarea (Price et al. 2017). Además lo contrastaremos con las bases cerebrales de la decodificación de letras, que tiene lugar en la “visual word form area” (VWFA), que ha sido mejor estudiada y se ha llegado a aportar evidencia de su localización en la misma zona donde se postula la existencia de la NFA, para confirmar las posibles diferencias y similitudes de estas dos zonas. Dado que la lectura y el procesamiento numérico no comparten sus bases cerebrales, parece lógico pensar que la configuración cerebral para la decodificación de números versus letras no tiene por qué ser idéntica.

Según un reciente meta-análisis (2017), los estudios clásicos que se encargaron de otorgar evidencias para la existencia de la NFA no resultaron en su mayoría concluyentes, aunque esto puede ser debido a las técnicas utilizadas, ya que en general se hacían los análisis a partir de datos de fMRI que tiene importantes limitaciones temporales. También autores como Shum et al (2013) identifican una limitación para el estudio de la NFA con fMRI debido a problemas con cortes de la señal. Estudios posteriores que se hacen cargo de este problema, junto con el citado meta-análisis, han encontrado resultados para la localización de la NFA en áreas del giro temporal inferior. Ésto implicaría una ligera diferencia con las hipótesis iniciales.

El presente estudio utiliza la magnetoencefalografía (MEG) para seguir con máxima resolución espaciotemporal las áreas cerebrales de los giros fusiforme, temporal inferior y occipital inferior bilaterales que se activan durante el reconocimiento visual de la forma del número y la letra. Las cuestiones que queremos responder implican:

- (1) Cuál es el hemisferio cerebral dominante para esta decodificación y diferencias de lateralización cerebral para números y letras.
- (2) Cuál es el solapamiento real que existe entre ambos tipos de símbolo y evidencia de su existencia diferencial.
- (3) Cuáles son las diferencias en el curso temporal de efectos de reconocimiento entre letras y números.

La mayoría de los estudios existentes se basan en resonancia magnética funcional, aunque recientemente el tema ha sido abordado por electrocorticografía (ECOG, Shum et al, 2013). Además hay zonas cerebrales cruciales en los procesos que nos ocupan a las cuales esta técnica es ciega (2013). Por tanto, nuestro trabajo es muy valioso en la sensibilidad que tiene a cualquier área cortical, lo que se suma a la alta precisión temporal de la MEG (milisegundo). Somos por tanto capaces de describir el curso temporal de las áreas que decodifican los símbolos y además relacionarlas con las funciones conocidas de ciertos campos relacionados con eventos, tales como la M130 (Gwilliams et al., 2016), la M170 (Pylkkänen & Marantz, 2003), y M250 (ver Aguasvivas y Carreiras 2022 para una revisión).

En el estudio de Gwilliams (2016) se reconocen dos tipos de respuesta para el procesamiento visual de la forma de la letra, la primera es una respuesta insensible a las características lingüísticas de las palabras (respuesta al ruido visual), mientras que la segunda ya reconoce las características estimulares de una letra, siendo las ventanas M130 y M170 parte de el segundo tipo de respuesta. La literatura respecto al reconocimiento visual de las palabras ha reconocido en la ventana M130 como aquella donde se reacciona al ruido visual de forma diferencial, es decir, se reconoce un estímulo visual como un estímulo de características lingüísticas, aunque aún no comienzan los procesos de reconocimiento específico del estímulo de la letra o el símbolo. En la ventana M170 se reconocen los estímulos ortográficos, se reconoce la letra o la palabra como tal, con una lateralización del hemisferio izquierdo en el área vOT. Los investigadores concuerdan en que ésta área responde automáticamente a la presentación de una palabra escrita. En la ventana M250 se refleja la demanda del procesamiento ortográfico y fonológico, siendo el procesamiento ortográfico anterior al fonológico. Los efectos de esta ventana pueden aparecer antes o después de los 250ms dependiendo de la complejidad de la palabra.

Nótese que se presenta un estudio preliminar, con un limitado número de sujetos. El estudio se completará en un trabajo posterior, pero los datos presentados como se verá parecen robustos, aún en una muestra tan reducida.

Metodología

Participantes

Una vez informados de las características del estudio, fueron seleccionados 6 voluntarios con una media de 26 años, todos de origen italiano. Todos, excepto uno de los participantes, son diestros. Todos son estudiantes de psicología o han acabado ya la carrera. Ninguno de los participantes mostraba limitaciones físicas o cognitivas ni historial de abuso de drogas. Ninguno de los

participantes fue entrenado en ejercicios de matemáticas antes de los ensayos. El estudio cuenta con la aprobación del pertinente comité de ética del hospital IRCCS San Camilo, en Venecia, Italia, y fue realizado bajo las indicaciones aprobadas. El estudio fue por tanto aprobado por la EC - MSCA Horizon 2020. Todos los métodos utilizados son compatibles con la declaración de Helsinki.

Estímulos

Los participantes fueron sometidos a tareas donde se presentaban cuatro situaciones: una ficha que incluía una letra del alfabeto latino (letra), una letra descompuesta en su forma (letra codificada), un número del sistema algebraico arábigo (número) y un número descompuesto en su forma (número codificado).

Las letras y números descompuestos procuraban mantener una forma que permitiese reconocerlos como estímulos de su tipo, manteniendo los ángulos y las curvas del estímulo original, aunque la referencia directa hacia la letra o número en específico era irreconocible. Todos los estímulos fueron presentados con una fuente blanca sobre un fondo oscuro por medio de un proyector, mientras que los participantes debían indicar con un botón cuál de las cuatro situaciones estaba siendo presentada. El intervalo entre estímulos era de 500 ms. Cada estímulo fue presentado cuatro veces y de forma aleatoria. Con un total de 36 ítems por cada una de las cuatro condiciones.

Numerals	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Scrambled Numerals	━	ㄣ	━	━	━	━	━	━	━
Letters	T	S	N	R	H	E	D	C	A
Scrambled Letters	━	━	━	━	━	━	━	━	━

Figura 1. Tabla con ejemplo de los estímulos: letra, letra codificada, número, número codificado

Procedimiento experimental

El experimento fue realizado con Psychopy. La sesión experimental comenzaba con la explicación de la tarea a los participantes junto con la presentación de ítems de entrenamiento, hasta que estos manifestaban entender la tarea. Las tareas consistían en la presentación aleatoria de un estímulo visual perteneciente a una de las cuatro condiciones mencionadas anteriormente, durante 500ms, precedido y seguido de un punto de fijación por 1400 ms. Por tanto, el tiempo total posible de respuesta era de 1900 ms. y el intervalo entre estímulos era de 1400 ms. La tarea de los participantes

consistía en decidir si el estímulo que veían era un carácter real (número o letra) o bien no lo era (codificado). Los participantes respondían presionando uno de dos botones en un mando de respuesta. La mano de respuesta fue alternada en dos bloques.

Adquisición de los datos

Adquisición de MRI

Los datos fueron recogidos usando resonancia magnética funcional (MRI) de T1, para los seis participantes. Un escáner 3D con imagen sagital fue programado con los siguientes parámetros: tiempo de repetición=8.3 ms, tiempo de eco=4.1ms, flip angle=8, acquired matrix resolution=288 A 288, slice thickness=0.87 mm.

Datos MEG

Los datos fueron grabados con un sistema CTF-MEG de 275 gradiómetros en una sala magnéticamente aislada. Antes de entrar en la sala se preparó a los participantes para el correcto uso de los equipos. Se usaron tres sensores para monitorizar la posición de la cabeza dentro del casco MEG durante la adquisición de los datos. Previamente a la entrada en la cabina, se colocaron seis electrodos que registraban los parpadeos (VEOG - Electrooculograma vertical), los movimientos oculares laterales (HEOG Electrooculograma horizontal) y un electrocardiograma (montaje bipolar) para detectar y corregir elementos contaminantes en las señales como movimientos oculares y los latidos del corazón. Luego se hizo uso de un hardware Fast-Track Polhemus vinculado al software de digitalización Brainstorm (<http://neuroimage.usc.edu/brainstorm>), para digitalizar entre 60 a 70 puntos de la superficie del cráneo, delimitando la forma de la cabeza, nariz y cejas de los participantes.

Los participantes se mantuvieron sentados durante los ensayos. Se estabilizó la posición de las cabezas dentro del casco MEG utilizando dos separadores de espuma. Cualquier movimiento de la cabeza durante la grabación de los datos fue monitorizada con el CTF Continuous Head Localization system (los movimientos no superaban un diámetro mayor a 5mm). Los estímulos se presentaron en una pantalla negra a 40 centímetros de los participantes a través de un proyector de imágenes, por lo que se visualizaban con un ángulo subtendido de unos 2.5 grados aproximadamente. Los posibles delays de tiempo que se podían dar en la presentación de los estímulos visuales fueron controlados con el uso de un fotodiodo. El fotodiodo fue generado con un rectángulo blanco que presentaba las soluciones de la tarea a la vez que eran presentadas, aunque éstas eran invisibles a los participantes. Los datos MEG y comportamentales fueron analizados siguiendo los tiempos registrados en el

fotodiodo. Las señales continuas del MEG fueron obtenidas usando un modelo craneal de 275 canales (CTF-MEG) con un muestreo a 1200 Hz, junto con un filtro suavizado a los 400 Hz. Los datos fueron recogidos como una serie concatenada en espacios de un segundo que se mezclaban en un archivo continuo singular, para luego convertirse en una señal continua para el análisis. Se aplicó una corrección con un gradiente de tres capas para incrementar la sensibilidad del detector MEG ante cualquier señal débil y así eliminar la contaminación del ruido ambiental. Las salas donde se realizó el estudio también estaban especialmente aisladas del ruido externo. El experimento tuvo una duración promedio de cinco minutos.

Procedimiento de análisis de los datos MEG

Los datos recogidos en el experimento fueron analizados con el software Brainstorm (Tadel, 2011), a través de MatLab. Tras aplicar un filtro a las señales de entre 0,1 (high pass) y 30 Hz (low pass), se corrigió la señal de artefactos (parpadeo, el movimiento ocular y los latidos del corazón). El método de corrección fue de proyección espacio - señal (SSH). Se hizo una corrección de la línea base, estableciendo una línea base de - 100 ms antes de cada evento y se segmentó la señal de acuerdo con cada condición desde 100 ms antes a 600 ms después del evento. Luego se hizo un promedio de los segmentos para cada condición obteniendo los campos relacionados con eventos (event related fields=ERF).

Espacio de sensores

Para acotar las ventanas de análisis para las fuentes hemos colapsado todas las condiciones en una gran media para no encontrar sesgos en la búsqueda de efectos. Con estos datos realizamos un análisis visual de los efectos producidos en los datos MEG, para reconocer las deflexiones de la señal magnética en ventanas tempranas y así delimitar los tiempos de análisis para el análisis de fuentes. A raíz de este análisis se determinaron cuatro ventanas principales que muestran picos de señal, donde se reconocen los efectos inducidos por las tareas. La primera ventana se abre en los 65 ms. y termina en los 95 ms., con un pico a los 80 ms.; la segunda ventana se abre a los 100 ms. y termina en los 140 ms., con un pico a los 120 ms.; la tercera ventana se abre a los 150 ms. y termina en los 190 ms., con un pico a los 170 ms.; la cuarta ventana empieza a los 200 ms. y termina en los 240 ms., con un pico a los 220 ms (Figura 2).

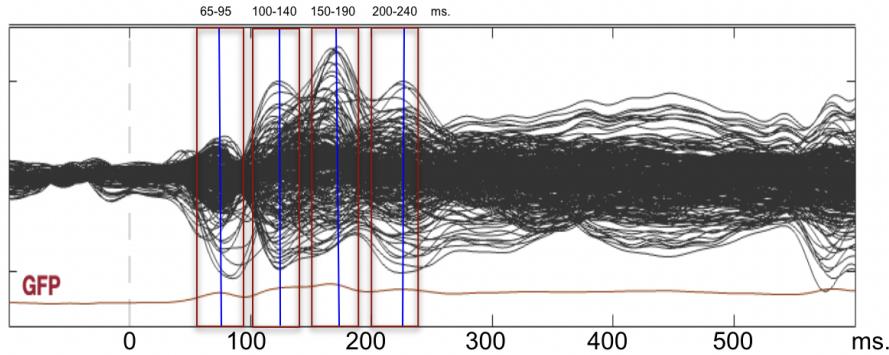


Figura 2. ERFs colapsados para las cuatro condiciones, mostrando la sucesión de componentes .

Espacio de las fuentes

La geometría de la superficie cortical en el MRI estructural fue obtenida mediante el software FreeSurfer (Fischl, 2012) y reducida a un espacio de unos 15.000 vértices para facilitar el análisis. Esta superficie cortical se adaptó al modelo de los sensores del MRI de acuerdo a la digitalización de los vértices.

El método utilizado para estimar los dipolos distribuidos en la corteza fue una estimación de la norma mínima ponderada en profundidad (M. Hämäläinen, software MNE). Se eligió el método inverso dw-MNE en vez de los filtros adaptados al espacio para optimizar la detección de las contribuciones esperadas de las distintas fuentes sincronizadas. La función que usamos conlleva una ponderación profunda, que corrige la base del MNE para las fuentes superficiales (Lin et al. 2006; Hämäläinen, manual de software). Antes de calcular la solución del dw-MNE para la media de cada participante y condición, se obtuvo una covarianza del ruido producido respecto a la línea base de esas medias. Luego de esto se usó un método de solapamiento de esferas para estimar el modelo siguiente, es aquí cuando se pudo hacer el cálculo dw-MNE de la superficie craneal para cada milisegundo (de -100 a 600 ms). Las fuentes fueron normalizadas (Z-score bajo la línea base) y registradas en la anatomía estándar (ICBM152). Las fuentes normalizadas fueron suavizadas (5 mm) y usadas para el análisis de grupo. Los análisis estadísticos se realizaron con SPM8, usando pruebas t de segundo nivel para las medias de cada condición (letras vs. letras codificadas y números vs. números codificados) y de los tiempos de respuesta. La latencia encontrada en los ERFs se utilizó para determinar las ventanas de tiempo que interesaban para el análisis de las fuentes, restringiendo así las mil posibles configuraciones de las fuentes. Debido a nuestro interés en localizar las áreas de decodificación perceptiva y ortográfica, los análisis se restringieron al giro fusiforme (FFG), Giro parahipocampal (PHG), Giro temporal inferior (ITG) y giro occipital inferior (IOG), mediante la aplicación de una máscara inclusiva durante los contrastes t.

Resultados

Como se mostró en la Figura 2, para el análisis de fuentes se utilizaron las cuatro ventanas temporales con picos marcados en los ERFs colapsados. La primera ventana se delimita entre los primeros 65-95 ms., la segunda entre los 100-140 ms, la tercera entre los 150-190 ms. y la cuarta entre los 200-240 ms.

La segunda ventana contempla los efectos a los 130 ms., que ha sido reconocido en la literatura como un espacio temporal donde aparecen los efectos para tareas de reconocimiento visual (M130), así como a los 170 ms., que se encuentran en la tercera ventana temporal (M170).

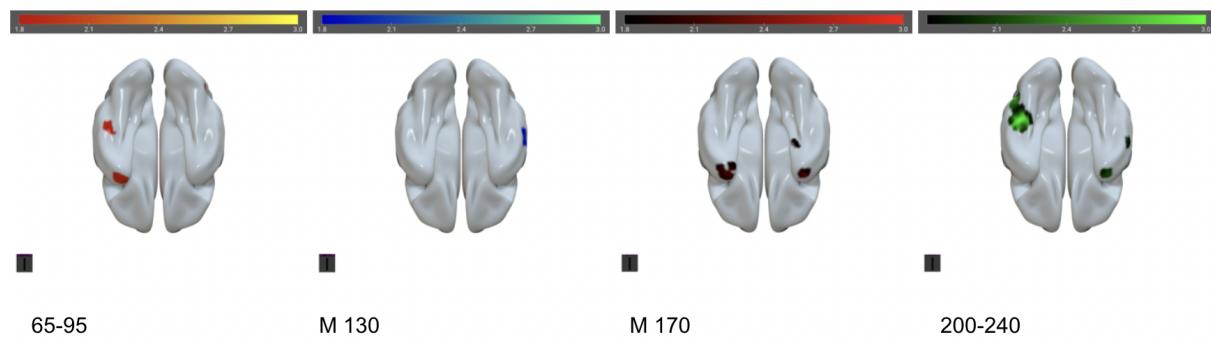


Figura 3 - Secuencia temporal de los efectos a lo largo de las cuatro ventanas de análisis para las tareas de letras vs letras codificadas. Pueden observarse los efectos más fuertes a partir de los 200 ms. (cuarta ventana). Ver también Tabla 1.

En la Figura 3 se puede apreciar una representación gráfica de las activaciones corticales para las tareas de letras, junto con una tabla que resume los datos de localización, densidad e intensidad de los efectos, más valores estadísticos. Lo que muestran los datos de la Figura 3 es una mayor actividad en las últimas ventanas temporales, localizadas en el giro temporal inferior y el giro fusiforme. La actividad es mayor en el hemisferio izquierdo, aunque también se encuentra en el hemisferio derecho.

L vs LC	Hemisferio	Localización	Área Brodman	voxels	valor t (pico)	valor Z	valor p	x	y	z
65 - 95 ms.	HI	ITG	38	158	1.95	1.76	0,039	-38	9	-42
		ITG, FFG	36,37	281	1.93	1.75	0,040	-47	-42	-29
M130 100 - 140 ms.	HD	ITG	20	191	2.05	1.84	0,033	66	-26	-22
			20	29	2.01	1.80'	0,036	65	-33	-21
M170 150 - 190 ms.	HI	ITG	38,21,20	199	2.36	2.06	0,020	-40	8	-43
		FFG	20,38	264	2.27	2.00	0,023	-23	6	-47
		PHG	35,36	96	2.14	1.90	0,029	-64	-11	-29
	HD	ITG, FFG	38	288	2.67	2.27	0,012	43	8	47
200 - 240 ms.	HI	(**)ITG, FFG	37,20,36,19	2130	3.17	2.58	0,005	-52	-68	-4
	HD	ITG	38,21	135	2.32	2.03	0,021	37	5	-40
			20	45	2.16	1.92	0,028	56	-23	-24

Tabla 1 - Resultados del contraste t letra > letra codificada con $p<0.05$. Los efectos con $p<0.01$ están marcados en rojo.¹ Coordenadas XYZ en espacio MNI.

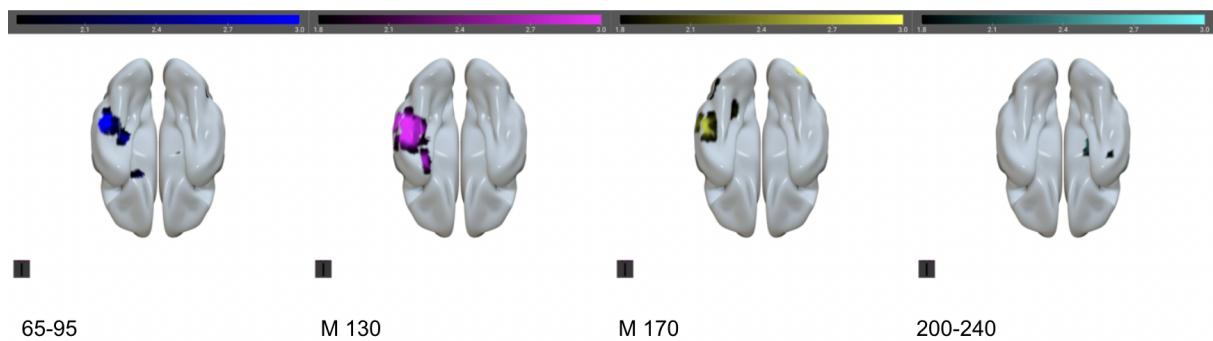


Figura 4 - Secuencia temporal de los efectos a lo largo de las cuatro ventanas de análisis para la tareas de números vs números codificados. Pueden observarse los efectos muy tempranos a partir de los 65 ms. (primera ventana). En la última ventana los efectos están prácticamente ausentes. Ver también Tabla 2

La Figura 4 y la Tabla 2 muestran el contraste números > números codificados. Hay una diferencia temporal importante con los datos de la Figura 3 (Tabla 1), que muestra una fuerte activación desde la primera ventana temporal para los números.

¹ Nótese que no se aplica corrección inicialmente dado que se trata de un análisis preliminar con un limitado número de participantes ($n=6$). Ello nos permite ver las tendencias de los datos.

N vs NC	Hemisferio	Localización	Área Brodman	voxels	valor t (pico)	valor Z	valor p	x	y	z
65 - 95 ms.	HI	(**)ITG,FFG,P HG	37, 36, 20	2544	5.27	3.57	<0,001	-48	-49	-24
		HD	ITG	37,19	1.96	1.77	0,038	55	-69	-4
M130 100 - 140 ms.	HI	(**)ITG,FFG	37,20	4256	4.88	3.41	<0,001	-67	-44	-18
		FFG	20	491	2.74	2.31	0,010	-30	-10	-36
		ITG	20	225	2.20	1.95	0,026	-62	-29	-27
M170 150 - 190 ms.	HD	IOG	18	122	3.73	2.89	0,002	35	-88	-6
		ITG,FFG	37,20	1887	2.75	2.32	0,010	-52	-43	-23
	HI	IOG	19,37	202	2.26	1.99	0,023	-51	-73	-4
		FFG,PHG	19	225	2.09	1.86	0,031	-31	-55	-7
M220 200 - 240 ms.	HD	PHG	28	59	2.45	2.12	0,017	29	-24	-12
			N/A	71	2.36	2.06	0,020	31	-21	-14

Tabla 2 - Resultados del contraste t número > número codificado con $p<0.05$. Los efectos con $p<0.01$ están marcados en rojo.² Coordenadas XYZ en espacio MNI.

En definitiva y para el caso de las **letras**, los primeros efectos aparecen en el ITG y FFG en el hemisferio izquierdo. En la ventana de la M130, los efectos aparecen en el hemisferio derecho en el ITG. En la ventana de la M170 se ve un efecto importante en el hemisferio derecho también, aunque además del ITG se activa ahora también el FFG. Finalmente, en el último componente iniciando a los 200 ms. se da el efecto de mayor intensidad y mayor extensión en el ITG-FFG izquierdo y un efecto menor en el ITG derecho. No obstante, si corregimos la p a $p<0.01$ o incluso a $p<0.001$ el efecto predominante se sitúa en el ITG-FFG izquierdo a los 200-240 ms.

En cuanto a los **números**, los primeros efectos aparecen tempranamente en el ITG y el FFG, al igual que las letras, aunque también hay actividad en el PHG, todo en el hemisferio izquierdo. La actividad ya es importante en la primera ventana temporal 65-95. En la ventana M130 hay una importante activación en el ITG y el FFG del hemisferio izquierdo. En la ventana M170 la activación surge en el hemisferio derecho, en el IOG. La última ventana temporal de 200-240 ms. no presenta mucha actividad, mostrando efectos leves en el PHG del hemisferio derecho.

Los efectos encontrados para las tareas de letras, expuestos en la Figura 3, muestran una importante presencia en el giro temporal inferior y el giro fusiforme. En áreas aparentemente solapadas, la extensión de los efectos es mayor para la decodificación de números que la de letras en

² Nótese que no se aplica corrección inicialmente dado que se trata de un análisis preliminar con un limitado número de participantes ($n=6$). Ello nos permite ver las tendencias de los datos.

ITG-FFG izquierdo. Además recalcamos de nuevo que muestran unos efectos más tempranos, con un pico de actividad en M130 y más sostenidos en el tiempo. En ambos casos, hay una importante lateralización del hemisferio izquierdo. Atendiendo a los efectos máximos ($p<0.001$), las principales diferencias que se encuentran entre números y letras radica, pues, en el momento de comienzo de los efectos, su duración y su extensión en la corteza ITG-FFG.

Contraste entre los efectos máximos para letras y los efectos para números

En la Figura 5 se muestran los efectos máximos a lo largo de las cuatro ventanas que se detallan en las Tablas 1 y 2, para letras y números respectivamente. Como puede verse dentro de las áreas de la corteza rastreadas los máximos para letras y números se hallan próximos. Sin embargo, el máximo para los números se halla en el ITG, mientras que el máximo para las letras se halla en el FFG medial, ambos en el hemisferio izquierdo.

Contraste de L-LC/N-NC

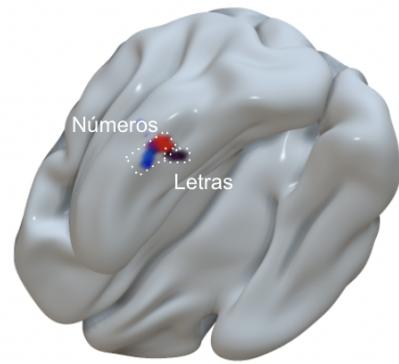


Figura 5 - Contraste de los efectos de Números y Letras. En rojo, la ventana de entre 65-95 ms para $N>NC$; en azul, la ventana de la M130 para $N>NC$; En negro, la ventana de 200-240 ms. para $L>LC$. Estos efectos corresponden a $t<0.001$ para $N>NC$, y a $t<0.005$ para $L>LC$.

Discusión

Los resultados del presente estudio muestran una reacción temporal más temprana en el caso de los números, que en nuestra opinión podría interpretarse de dos modos. Por un lado, puede ser simplemente debida a un procesamiento más rápido y sencillo de estos, contando con que en el sistema arábigo se compone de diez números, que en combinación pueden llegar a cifras infinitas, pero si contamos las letras del abecedario nos encontramos con veintisiete letras distintas. Esto puede explicar la diferencia temporal encontrada, ya que el reconocimiento de un símbolo numérico se da en

1/10, mientras que el reconocimiento de letras es un proceso de 1/27.

Otra explicación debe sin embargo tener en cuenta las diferencias funcionales que pueden estar tras las ventanas temporales y los diferentes ERFs con efectos para números (65-95; M130) y la de las letras (M170, 200-240 ms.), ya que podrían apoyar la hipótesis de que el procesamiento de la forma del número es distinto a nivel cerebral que la de la forma de la letra. Si para procesos tan similares encontramos diferencias importantes en cuanto a temporalidad, podemos proponer que el procesamiento de la forma del número es una tarea más sencilla para la corteza cerebral y las distintas redes neuronales. Sabemos que distintas especies de animales son capaces de entender las diferencias entre estas magnitudes, por lo que es una capacidad que apareció evolutivamente incluso antes que el Homo Sapiens. No así en el caso del lenguaje, que sí es propio y exclusivo de nuestra especie, y que podemos entender como un proceso aún más complejo que el de las matemáticas. Estos resultados son un apoyo importante para seguir investigando las diferencias entre estos dos procesos y seguir postulando una diferencia a nivel de actividad cortical.

El hemisferio predominante en la tarea de números es el izquierdo, con diferencia, aunque aún se aprecia alguna actividad del hemisferio derecho. En la tarea de letras, sin embargo, la diferencia no es tan evidente, al menos en cuanto a extensión cortical del efecto.

Por otro lado, los máximos de efectos en todo el intervalo temporal estudiado revelan una NFA y una LFA muy próximas pero no solapadas. [ITG - números//FFG - letras]. Este resultado nos permite defender la hipótesis de que existe un área diferenciada para el procesamiento de estímulos visuales numéricos, en contraste con el mismo proceso para los estímulos visuales de letras. Las diferencias que se han encontrado en las señales de las fuentes permiten localizar una hipotética NFA en el giro temporal inferior que, aunque comparte de manera importante su localización con la VWFA, ésta tiene una presencia más posteriorizada, en el FFG.

Los solapamientos de activación para las tareas de números y letras eran esperables, aunque se puede diferenciar una posición específica para las tareas de número, por lo que la hipótesis de una NFA independiente y diferenciada puede ser sostenida a raíz de estos resultados. Aún así, es importante clarificar las limitaciones de este estudio, sobre todo en cuanto al limitado número de participantes, por lo que la hipótesis sigue abierta y a la espera de mayor desarrollo por parte de la comunidad científica.

Junto al desarrollo de esta investigación y la discusión con personas ajenas a éste, han surgido otras hipótesis que podrían dar lugar otras investigaciones que serían interesantes para ahondar en este asunto. El estudio del procesamiento visual del símbolo podría ponerse a prueba, por ejemplo, con el

lenguaje musical, lo que permitiría añadir otro proceso distinto a la comprensión del estímulo visual del símbolo y otras posibles diferencias a nivel cortical. También se podrían estudiar las diferencias para estímulos que se reconocen como significativos aunque no exista acceso a la comprensión de éste, por ejemplo en el caso de una persona que reconozca un estímulo visual como significante de una lengua específica (como el chino mandarín), aunque no exista comprensión del significado. ¿Existirán diferencias en la actividad cortical para el procesamiento de éste tipo de estímulos visuales simbólicos?. Estas cuestiones podrían ser desarrolladas en futuras investigaciones.

Referencias

- Yeo, D. J., Wilkey, E. D., & Price, G. R. (2017). The search for the number form area: A functional neuroimaging meta-analysis. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 78, 145–160. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.04.027>
- Sánchez-Navarro, J. P., & Román, F. (2004). Amígdala, corteza prefrontal y especialización hemisférica en la experiencia y expresión emocional. *Anales de Psicología/Annals of Psychology*, 20(2), 223-240.
- Salillas, E., Piccione, F., di Tomasso, S., Zago, S., Arcara, G., & Semenza, C. (2021). Neurofunctional Components of Simple Calculation: A Magnetoencephalography Study. *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)*, 31(2), 1149–1162. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhaa283>
- Amalric, M., & Dehaene, S. (2016). Origins of the brain networks for advanced mathematics in expert mathematicians. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(18), 4909-4917.
- Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehéricy, S., Dehaene-Lambertz, G., Hénaff, M. A., & Michel, F. (2000). The visual word form area: spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*, 123(2), 291-307.
- Price, C. J., & Devlin, J. T. (2003). The myth of the visual word form area. *Neuroimage*, 19(3), 473-481.
- Chung, J., Bridgeford, E., Arroyo, J., Pedigo, B. D., Saad-Eldin, A., Gopalakrishnan, V., ... & Vogelstein, J. T. (2021). Statistical connectomics. *Annual Review of Statistics and Its Application*, 8, 463-492.
- Shum, J., Hermes, D., Foster, B. L., Dastjerdi, M., Rangarajan, V., Winawer, J., ... & Parvizi, J. (2013). A brain area for visual numerals. *Journal of Neuroscience*, 33(16), 6709-6715.
- Chrisomalis, S. (2010). Numerical Notation: A Comparative History, 1st ed. Cambridge University Press, New York, NY.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (2007). Cultural recycling of cortical maps. *Neuron*, 56(2), 384-398.

Dominguez, A., Leon, J, A. Alonso, M, A. (2022). Neurocognición del lenguaje: más allá de las palabras. Editorial Médica Panamericana, Madrid, España.

Tadel F, Baillet S, Mosher JC, Pantazis D, Leahy RM (2011) Brainstorm: A User-Friendly Application for MEG/EEG Analysis Computational Intelligence and Neuroscience, vol. 2011, Article ID 879716, 13 pages, 2011. doi:10.1155/2011/879716

Pylkkänen, L., & Marantz, A. (2003). Tracking the time course of word recognition with MEG. Trends in Cognitive Sciences, 7(5), 187–189. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00092-5)

Gwilliams, L., Lewis, G. A., & Marantz, A. (2016). Functional characterisation of letter-specific responses in time, space and current polarity using magnetoencephalography. Neuroimage, 132, 320-333.