

Tesis Doctoral

Las bases neurales de la deducción elemental y su cambio con la edad. Estudio eléctrico cerebral de la implicación lógica de primer orden.

The neural bases of elementary deduction and its change with age. Brain electrical study of first order logical implication.



Paula Álvarez Merino

Director: María del Carmen Requena Hernández

Co-director: Francisco Salto Alemany

Programa de Doctorado: Psicología Educativa y Ciencias de la Educación.

Departamento de Psicología, Sociología y Filosofía



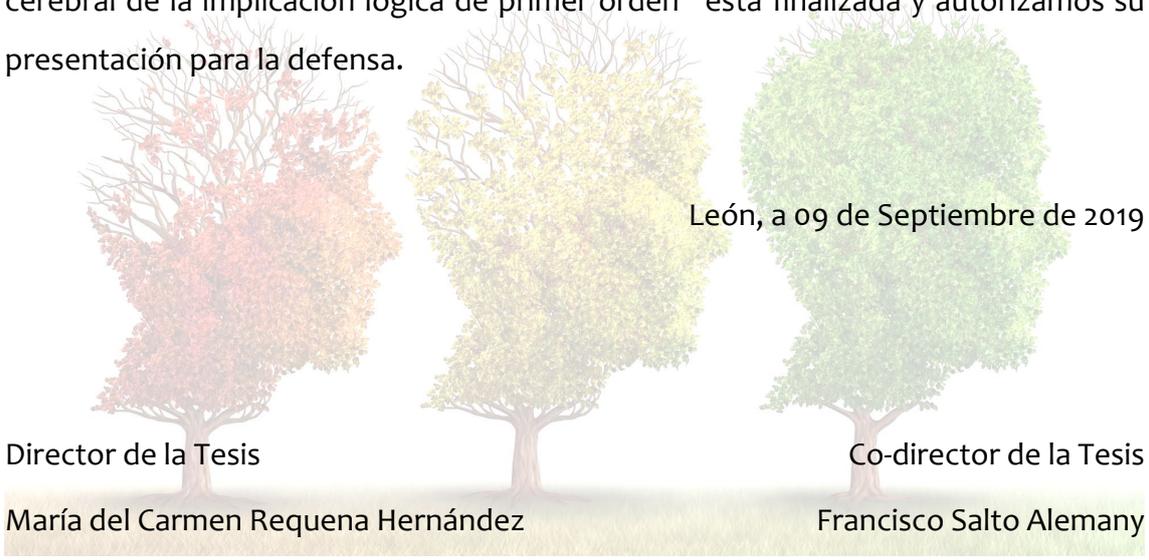
universidad
de león

León, 2019

La Doctoranda PAULA ÁLVAREZ MERINO y los directores de la Tesis MARÍA DEL CARMEN REQUENA HERNÁNDEZ Y FRANCISCO SALTO ALEMANY, garantizamos, al firmar esta Tesis Doctoral titulada “Las bases neurales de la deducción elemental y su cambio con la edad. Estudio eléctrico cerebral de la implicación lógica de primer orden”, que el trabajo ha sido realizado por la doctoranda bajo la dirección de los directores de Tesis y, hasta donde nuestro conocimiento alcanza, en la realización del trabajo se han respetado los derechos de otros autores a ser citados, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

De este modo, los directores de la Tesis MARÍA DEL CARMEN REQUENA HERNÁNDEZ Y FRANCISCO SALTO ALEMANY, garantizamos que la Tesis Doctoral titulada “Las bases neurales de la deducción elemental y su cambio con la edad. Estudio eléctrico cerebral de la implicación lógica de primer orden” está finalizada y autorizamos su presentación para la defensa.

León, a 09 de Septiembre de 2019



Director de la Tesis

María del Carmen Requena Hernández

Co-director de la Tesis

Francisco Salto Alemany

Doctoranda

Paula Álvarez Merino

Todo empieza con una sonrisa...
A tod@s los que formáis parte de mi mundo amarillo



∞ A Miguel Ángel e Inmaculada, mis padres, porque habéis construido la estructura más fuerte e inamovible que jamás he conocido, ésa que me reconforta cada día, que me protege y que nunca, pase lo que pase, me dejará caer. Por todos vuestros sueños, por todos vuestros desvelos, por cada esfuerzo, gracias.

∞ A Diego, por descubrir el mundo a mi lado y formar conmigo un gran proyecto de vida. Por construir juntos nuevas estructuras y por enseñarme a soñar y hacerlo siempre junto a mí. Por estar siempre en mi equipo, gracias.

∞ A Ismael, por dejar aquí la mejor versión de él, por ser sinónimo de lucha, de fortaleza, de valentía, pero sobre todo de amor. Por compartir conmigo todo lo bueno que tenía y porque cuando miro al cielo, siempre veo su estrella brillar y eso me da fuerza, toda la que necesito. Por hacer el mundo más bonito, gracias.

∞ A Carmen y Francisco, por guiarme en este duro camino, apoyarme, pero sobre todo enseñarme. Por formar nuestra familia científica y hacerlo desde la sinceridad y el cariño. Por cada rato de agobio que nos ha permitido valorar tanto rato de risa. Por vuestro apoyo, gracias.

∞ A Vanessa, Olaya, Rosalía, Nieves, María, Raquel, Mayka, Sonia, Julia Elvira y Nuria por ser y estar. Por escuchar y por entender. Amigas, de corazón, gracias.

∞ A Hilda Sara y Juli, por proveer de alas a todos nuestros sueños, por cuidarnos, por mimarnos, por ayudarnos a seguir. Por permanecer siempre con nosotros, gracias.

∞ A Toñi y Manuel, Tata y Luis, Pablo y Rodrigo, Belén y Desi, Gustavo y Marisol, Reque y Laura, Charo, Iván, Jairo, Cris, Alejandra, Sergio y Cristina por conformar mi familia, ésa que no eliges a sabiendas de que no te hace falta porque te ha tocado la mejor. Por vuestro aliento y vuestra preocupación, gracias.

∞ A tod@s los que habéis formado parte de este proceso, de cualesquiera formas posibles, ya haya sido con una palabra, un gesto o una sonrisa. Por vuestro apoyo, gracias.

∞ De todos y para todos, esta Tesis Doctoral nunca hubiera sido posible sin vosotros.

Muchas gracias.

Índice



ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	13
ÍNDICE DE FIGURAS.....	15
ABREVIATURAS Y SIGLAS	17
FUENTES FINANCIADORAS DE LA INVESTIGACIÓN	21
RESUMEN.....	25
ABSTRACT	29
MOTIVACIÓN	33
1. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	41
1.1. Tres niveles de análisis del razonamiento deductivo	41
1.2. El razonamiento deductivo como fenómeno de desarrollo psicológico: estado del arte y cuestiones abiertas	44
1.2.1. Teorías psicológicas sobre el razonamiento deductivo.....	44
1.2.2. Psicometría del razonamiento deductivo	46
1.2.3. El razonamiento deductivo desde la perspectiva del ciclo vital	50
1.3. La deducción como fenómeno neural: Estado del arte y cuestiones abiertas.....	54
1.3.1. Razonamiento deductivo y lenguaje.....	57
1.4. Planteamiento erotético del problema	61
2. OBJETIVOS.....	65
2.1. Objetivos Generales.....	65
2.2. Objetivos Específicos	65
3. HIPÓTESIS.....	71
4. METODOLOGÍA	75
5. RESULTADOS.....	83
5.1. Estudio 1. Variables de medida para el razonamiento deductivo	83

5.2. Estudio 2. Localización cerebral del procesamiento semántico.	119
5.3. Estudio 3. Evidence linking brain activity modulation to age and to deductive training.	149
6. CONCLUSIONES.....	179
7. LIMITACIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS.....	189
8. CONCLUSIONS.....	193
9. LIMITATIONS AND FUTURE PERSPECTIVES	203
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	207



ÍNDICE DE TABLAS

ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Tabla 1.a. Medidas de razonamiento deductivo	49
Tabla 1.b. Fuentes cerebrales del razonamiento deductivo.....	57

ESTUDIO 1. Variables de medida para el razonamiento deductivo.

Tabla 5.1.a. Ítems cuestionario sociodemográfico con alternativa respuesta libre...	93
Tabla 5.1.b. Aciertos del test de razonamiento deductivo atendiendo a las variables de formalidad, integrabilidad, complejidad, modalidad y número de palabras.	99
Tabla 5.1.c. Coeficientes de correlación de Pearson entre los niveles de complejidad lingüística y lógica.....	102
Tabla 5.1.d. Análisis descriptivos de aciertos/errores del test de razonamiento deductivo atendiendo a las variables de formalidad, integrabilidad, complejidad, modalidad y número de palabras.	103

ESTUDIO 2. Localización cerebral del procesamiento semántico.

Tabla 5.2.a. Ejemplos de presentación de las condiciones de estudio.....	129
Tabla 5.2.b. Ejemplos de presentación de las condiciones de estudio.....	133
Tabla 5.2.c. Ejemplos de presentación de las condiciones de estudio.	140

ESTUDIO 3. Evidence linking brain activity modulation to age and to deductive training.

Tabla 5.3.a. Repeated measures analysis of variance for the number of correct and incorrect responses pre-evaluation and post-evaluation in younger and older adults.....	162
Tabla 5.3.b. Repeated measures analysis of variance for the reaction time pre-evaluation and post-evaluation younger and older adults.	165

ÍNDICE DE FIGURAS

ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Figura 1.a. Porcentaje anual disminución del grosor cortical a lo largo. de la vida....	45
Figura 1.b. Perfiles de envejecimiento.....	51
Figura 1.c. Variables formativas y reflectivas de reserva cognitiva.....	52
Figura 1.d. Disociación neural entre lenguaje e inferencia formal.....	58

ESTUDIO 1. Variables de medida para el razonamiento deductivo.

Figura 5.1.a. Análisis de regresión lineal de las variables razonamiento deductivo e inteligencia no verbal.	98
---	----

ESTUDIO 2. Localización cerebral del procesamiento semántico.

Figura 5.2.a. Carta de Tiempo.	130
Figura 5.2.b. Comparación entre condiciones. Ventana temporal de 400 a 550 ms.....	135
Figura 5.2.c. Comparación entre condiciones. Ventana temporal de 550 a 800 ms.....	137
Figura 5.2.d. Análisis descriptivo y comparativo de localización de fuentes.	139

ESTUDIO 3. Evidence linking brain activity modulation to age and to deductive training.

Figura 5.3.a. Case 1 type.	157
Figura 5.3.b. Case 2 type.....	157
Figura 5.3.c. Case type 3.....	158
Figura 5.3.d. Mean and SD of correct and incorrect responses in younger and older adults.....	161
Figura 5.3.e. Significant differences between correct/incorrect responses pre-evaluation and post-evaluation, within age groups.....	163
Figura 5.3.f. Mean and SD of reaction times in younger and older adults.....	164

Figura 5.3.g. Significant differences between reaction times pre-evaluation and post-evaluation, within age groups. 165

Figura 5.3.h. Analysis of source localization pre- post evaluation in younger adults..... 166

Figura 5.3.i. Analysis of source localization evaluation and post-training, within age groups. 167



ABREVIATURAS Y SIGLAS

A/m²: Generadores neuronales asociados a corrientes eléctricas de medida.

Ag/AgCl: Electrodo de referencia de plata/cloruro de plata.

ANCOVA: Analysis of covariance / Análisis de la Covarianza.

ANOVA: Analysis of variance / Análisis de la Varianza.

CPP: Córtex parietal posterior.

CRUNCH: Compensation related utilization of neural circuits hypothesis.

DE: Desviación Estándar.

EEG: Electroencephalography / Electroencefalografía.

EEGLAB: Interactive Matlab toolbox / Toolbox interactiva de Matlab.

eLORETA / sLORETA: Low Resolution Brain Electromagnetic Tomography.

ELSA: Early-to-late shift in aging.

EOG: Electrooculogram / Electrooculograma.

FC: Frecuencia acumulada relativa.

FIR (Filtro): Finite Impulse Response/ Filtro de Respuesta finita al impulso.

fMRI: Functional magnetic resonance imaging/ Resonancia magnética funcional.

GB: Glándulas basales.

GENLA: Grupo de Investigación en Envejecimiento y Lógica Aplicada.

GFI: Giro frontal inferior.

GFMe: Giro frontal medio.

GP: Giro precentral.

HAROLD: Hemispheric asymmetry reduction in older adults.

Hz: Hertz / Hercio.

ICA: Independent component analysis/ Análisis de componentes independientes.

INV: Inteligencia no verbal.

K Ω : Kiloohmios.

MEG: Magnetoencephalography/ Magnetoencefalografía.

ms: Milliseconds/ Milisegundos.

MUC: Memory, Unification, Control.

mv: Microvolts/ Microvoltios.

PASA: Posterior-anterior shift in aging.

PET: Positron Emission Tomography/ Tomografía por emisión de positrones.

RIAS: Reynolds Intellectual Assessment Scales/ Escalas de inteligencia de Reynolds.

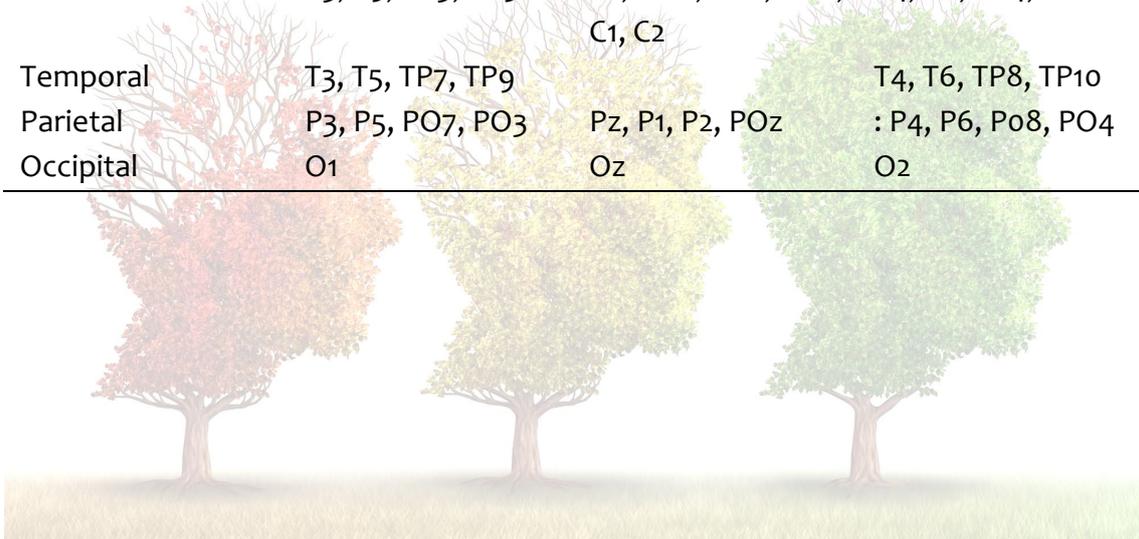
ROIs: Region of interest/ Regiones de interés.



Existe una nomenclatura de los electrodos, que obedece a la región cerebral sobre la que yacen. La numeración se dispone de menor a mayor, empezando desde áreas anteriores hacia posteriores y, correspondiendo los números impares al lado izquierdo y los pares al derecho.

Localización espacial de los electrodos

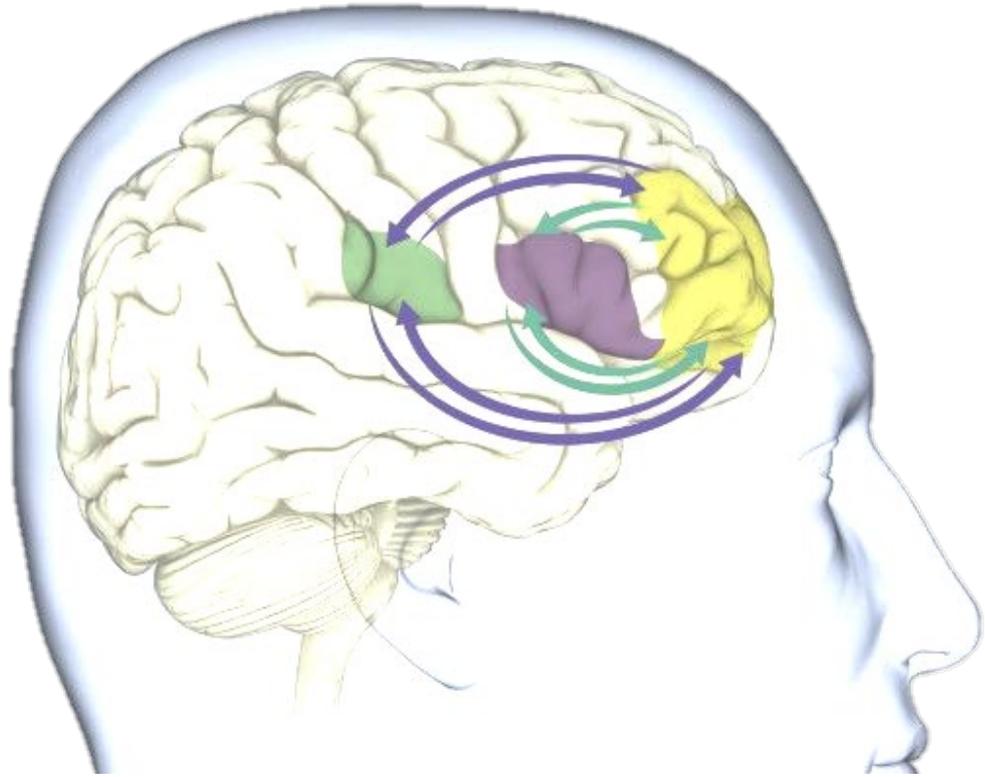
Área Cerebral	Hemisferio Izquierdo	Línea Media	Hemisferio Derecho
Frontopolar	FP1	FPz	FP2
Frontal anterior	AF3		AF4
Frontal	F3, F7, FC3, F5, FC5	Fz, F1, F2, FCz, FC1, FC2	F4, F8, FC6, F6, FC4
Central	C3, C5, CP3, CP5	Cz, CPz, CP1, CP2, C1, C2	C4, C6, CP4, CP6
Temporal	T3, T5, TP7, TP9		T4, T6, TP8, TP10
Parietal	P3, P5, PO7, PO3	Pz, P1, P2, POz	: P4, P6, Po8, PO4
Occipital	O1	Oz	O2



FUENTES FINANCIADORAS DE LA INVESTIGACIÓN

Esta Tesis Doctoral ha sido financiada por la **Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León** y cofinanciada por el **Fondo Social Europeo** al amparo de la Orden EDU/310/2015, de 10 de Abril, por la que se convocan ayudas destinadas a financiar la contratación predoctoral de personal investigador, cofinanciada por el Fondo Social Europeo, a iniciar en el año 2015.





Resumen

RESUMEN

Introducción. La inferencia deductiva se puede entender desde una perspectiva flexible o restrictiva. En esta investigación se opta por la segunda, que se caracteriza por considerar la validez como una característica necesaria para hablar de razonamiento deductivo.

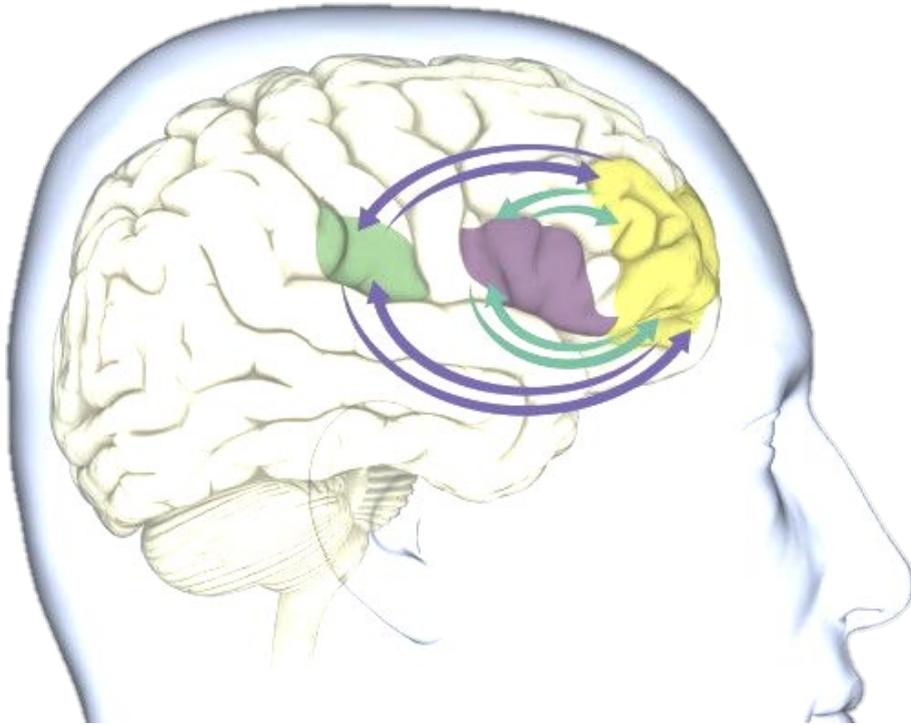
Objetivo. El objeto de esta Tesis Doctoral persigue estudiar los tres niveles de análisis del fenómeno de razonamiento deductivo: nivel físico, algorítmico y computacional.

Metodología. Para llevar a cabo este trabajo, la investigación se estructura en tres grandes secciones. 1. Identificar las variables que conforman la medida de razonamiento deductivo a partir de una revisión sistemática de test psicológicos. 2. Diseño de un paradigma congruente/incongruente para identificar, si es posible, un potencial evocado asociado al razonamiento deductivo. 3. Finalmente, se propone el diseño y aplicación de un programa de entrenamiento en razonamiento deductivo a adultos jóvenes y mayores. Además, se evalúa el efecto del programa en el procesamiento cognitivo y cerebral.

Resultados. Se recopilan en tres artículos científicos. En el primero de ellos se validó un instrumento de medida psicológica para el razonamiento deductivo. El test constaba de 60 ítems categorizados en: formalidad, integrabilidad, complejidad y modalidad. La fiabilidad del test de razonamiento deductivo obtuvo un alpha de Cronbach .775 y un índice de validación .850 en el nivel de inteligencia no verbal. En el segundo, se constató un reprocesamiento en tareas de razonamiento deductivo asociadas a un potencial N400 y P600. Finalmente, se verificó el efecto psicológico y cerebral de un programa de entrenamiento de razonamiento deductivo. En particular, después del entrenamiento, en el grupo de adultos jóvenes se focaliza la activación de la actividad cerebral en el lóbulo frontal izquierdo mientras que en el grupo de adultos mayores se genera activación bilateral en áreas frontales y occipitales. Además, tanto en el grupo de adultos jóvenes como en el grupo de adultos mayores, después del entrenamiento se confirma un incremento en el

número de aciertos de las tareas de razonamiento (40% y 20% respectivamente) y un incremento de los tiempos de reacción (1000 ms y 178 ms respectivamente).

Conclusiones. Este trabajo de investigación resuelve en parte el concepto metafórico de procesamiento del razonamiento deductivo a nivel psicológico y cerebral. A nivel psicológico, el procesamiento se operativiza a partir de las variables cómo formalidad, integrabilidad, complejidad y modalidad. A nivel cerebral, se operativiza con los operadores lógicos de identidad, repetición, orden y negación. Dado que los resultados ponen de manifiesto que no existen recursos explícitos para representar la negación, se puede decir que a nivel cerebral hay indicios de semicomputabilidad en lugar de computabilidad. En futuras investigaciones, se hace necesario replicar los resultados en soportes lingüísticos y agentuales. Además, corroborar los hallazgos de esta investigación con técnicas de neuroimagen con mayor resolución espacial.



Abstract

ABSTRACT

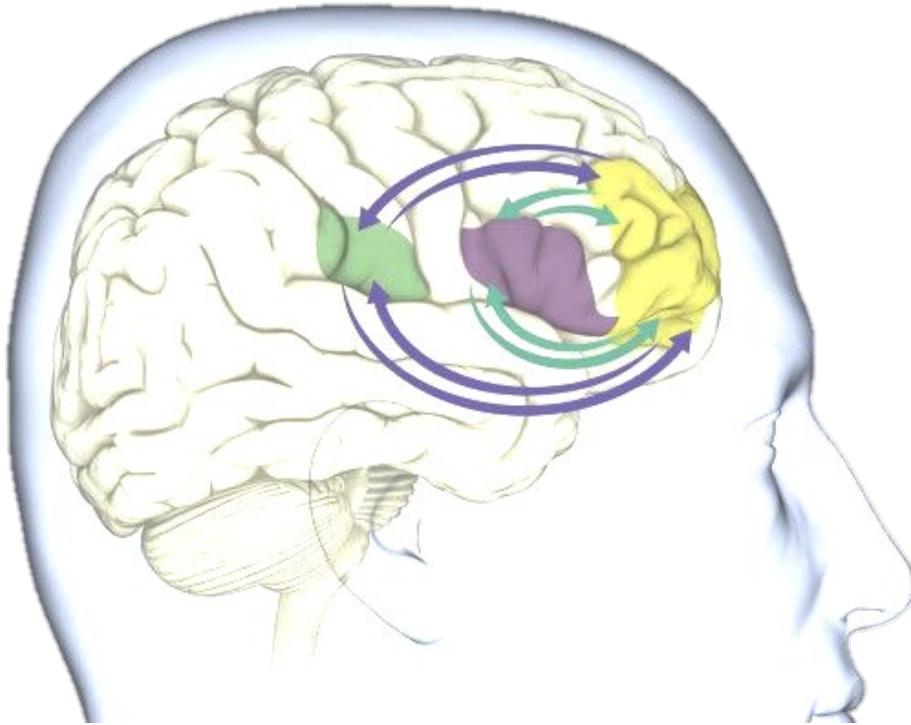
Introduction. Deductive inference can be understood from a flexible perspective or alternatively from a restrictive approach. This investigation opted for the restrictive perspective, which is characterized by considering validity as a necessary and sufficient feature for defining deductive reasoning.

Objective. The purpose of this Doctoral Dissertation is to analyze deductive reasoning at a physical, algorithmic and computational levels.

Methodology. The research is structured in three main sections. 1. Identify the variables that make up the measure of deductive reasoning based on a systematic review of psychological test. 2. Design of a paradigm congruent/incongruent to identify, if possible, an evoked potential associated with deductive reasoning. 3. The design and application of a deductive reasoning training program are proposed for younger and older adults. Additionally, the effect of this program on cognitive and brain processing is evaluated.

Results. They are compiled in three scientific articles. In the first one, an instrument of the psychological measure was validated for deductive reasoning. The test consisted of 60 items categorized into formality, integrability, complexity, and modality variables. The reliability of the deductive reasoning test obtained a Cronbach alpha .775 and a validation index .850 in the level of non-verbal intelligence. In the second article, a reprocessing was observed in deductive reasoning performance tasks. The first processing associated with the N400 evoked potential and the reprocessing associated with the P600 evoked potential. Finally, the psychological and neural effect of a deductive reasoning training program was verified. In particular, a focal activation in the left frontal lobe after training is identified in younger adults, while a bilateral activation in frontal and occipital areas is generated in older adults. In addition, an improvement in the performance of reasoning tasks (younger adults, 40% and older adults, 20%) and an increase in reaction times are confirmed after training in both younger and older adults (1000 ms. and 178 ms. respectively).

Conclusions. This research partially resolves the metaphorical concept of processing deductive reasoning at the psychological and neural level. The psychological processing has been made operative with the formality, integrability, complexity, and modality variables. The brain processing has been made operative with the identity, repetition, order, and negation logical operators. Since the results show that there are no explicit resources to represent negation, it can be said that there are indications of semi-computability instead of full computability at the neural level. In future research, it will be necessary to replicate the results in linguistic and agentual formats. Additionally, it will be necessary to confirm the findings of this research with neuroimaging techniques with the highest spatial resolution.



Motivación

MOTIVACIÓN

El papel del razonamiento deductivo en el desarrollo. Una perspectiva racionalista.

Dar, recibir, ponderar razones es un ingrediente esencial del desarrollo humano. En las actividades más nimias de la vida ordinaria y en los logros más elaborados del intelecto está presente la racionalidad. Del cálculo automático de la trayectoria de una pelota a la comprensión de las implicaciones de un concepto o una acción, de la demostración de un teorema a la argumentación pública en un grupo. Constantemente en el curso de nuestra vida contamos con los recursos de la racionalidad que se presentan en unas u otras formas de razonamiento mediante palabras, imágenes o acciones.

Tradicionalmente, en el ámbito científico “la razón” se ha concebido como un paquete completo y perfecto de habilidades normativas que estaban justificadas a priori, pero la ciencia contemporánea cuestiona radicalmente esta concepción. El paquete no es completo ni perfecto desde el punto de vista lógico (Gödel, 1931), ni desde el punto de vista evolutivo (Tomasello, 2014) ni desde el punto de vista pragmático (Gigerenzer & Selten, 2001). La racionalidad es más bien una colección históricamente casual de habilidades y estrategias sólo parcialmente exitosas. Si la concepción racionalista del ser humano le atribuye a priori la cualidad de la racionalidad, desde el punto de vista evolutivo la racionalidad es un recurso acotado o limitado (Gigerenzer, 2008), imperfecto (Álvarez, 2015) y producto del curso de los acontecimientos naturales y culturales. Sólo somos mínimamente racionales (Cherniak, 1986) y esta investigación parte del reconocimiento de esta limitación básica.

Nos vamos a centrar en la forma más elemental de racionalidad, la deductiva o lógica, que se encuentra tanto en los más simples circuitos de una lavadora como en los rigores y fantasías de las pruebas metamatemáticas más complejas. Se producen deducciones tanto en complejos procesos deliberativos, que presumiblemente son lentos y están mediados lingüísticamente, como en procesos automáticos, que

pueden ser tan rápidos que están incluso por debajo del umbral de conciencia como Reverberi, Pischeda, Burigo y Cherubini (2012) han comprobado con el *modus ponens* o entre bebés en estado preverbal (Cesana-Arlotti et al., 2018). Obsérvese que no sólo en uno sino prácticamente en cada campo del desarrollo humano tiene la racionalidad deductiva algún papel relevante. Los test de aptitudes laborales y profesionales (Gernain & Lerond, 2017), por ejemplo, masivamente contienen tareas deductivas. El aprendizaje escolar y las subsiguientes evaluaciones académicas (Stadler, Becker, Schult, & Niepel, 2018) también masivamente descansan en tareas deductivas. Las tareas que afrontan el envejecimiento cognitivo (Wolf et al., 2018), la funcionalidad diaria, (Nirenburg, 2017) todas estas capacidades covarían positivamente con las habilidades razonadoras, como se ha demostrado desde el punto de vista científico.

Pero más allá de la motivación científica de esta temática es de destacar su motivación desde el punto de vista de la imagen ordinaria de la realidad, desde el interés no del creador de conocimiento sino de su usuario. Resulta más o menos extraño que personas o personajes se enamoren genuinamente de programas de ordenador. Pero lo que resulta verdaderamente inimaginable o irracional es que personas o personajes se enamoren de seres que pensasen, dijese o hiciesen *cualquier* cosa. Un ser así que actúe de modo puramente trivial, aleatorio o arbitrario, alguien que no sólo se contradice, sino que hace *cualquier cosa*, un ser así es deductivamente irracional y por tanto incapaz de desarrollarse ni aprender. Imagine una persona o una sociedad que jamás deduzca, que haga o piense *cualquier* cosa trivialmente. Un ser así sería indistinguible de un no-agente, de ruido o silencio. En este sentido *alguna* forma mínima de racionalidad deductiva es necesaria para ser algo capaz de desarrollarse, aprender, evolucionar, crecer, envejecer. Imagine qué relación tendríamos con nosotros mismos, con nuestro entorno familiar o social, si todas las decisiones, pensamientos y valoraciones fuesen arbitrarias o triviales, si *cualquier* cosa implicase *cualquier* otra. Por consiguiente, incluso para ser un esclavo o ser el peor de los alumnos se requieren mínimas habilidades deductivas, que se encuentran en ocasiones automatizadas en la naturaleza incluso entre no mamíferos (por ejemplo palomas (Von Fersen, Wynne, & Delius, 1991) y en artefactos e

instituciones. En otras ocasiones, las habilidades deductivas no están automatizadas, sino que aparecen en procesos deliberativos explícitos y complejos.

Fijemos unos conceptos básicos. Vamos a llamar *inferencia* a cualquier proceso reglado de conversión y extracción de información. Las inferencias pueden estar o no codificadas lingüísticamente, ya que se infieren conclusiones tanto de palabras, símbolos o signos como de imágenes y acciones. Llamamos inferencias plásticas a aquellas que se realizan desde o hacia cuerpos de información perceptiva e inferencias agentuales a aquellas que se realizan desde o hacia acciones o agencias. Las inferencias son procesos o eventos que ocurren en el mundo y consumen espacio y tiempo, pero también son procesos que tienen propiedades normativas, ya que preservan en sus conclusiones propiedades de los cuerpos de información que forman las premisas. Propiedades como la verdad, la probabilidad, la utilidad, la credibilidad son propiedades normativas que resultan evolutivamente valiosas y estratégicamente útiles. Llamamos *razonamientos* a aquellas inferencias que están asociadas a valoraciones o reglas normativas. Los razonamientos tradicionalmente se clasifican en deductivos, inductivos y abductivos, siendo ésta una distinción normativa planteada en función de cómo se justifican sus conclusiones, y no en virtud de qué procesos psicológicos reales los distinguen, si es que los hay.

El actual trabajo de investigación se estructura en nueve secciones atendiendo a los siguientes contenidos:

Resumen. En este apartado se presentan en 452 palabras los apartados que componen la Tesis relacionados con la temática de las bases neuronales de la deducción lógica y los cambios con la edad.

Motivación. Atendiendo a los tres niveles de análisis de un fenómeno cognitivo que propone Marr (1982), las hipótesis de Monti (2017) y Prado (2018) sobre las bases neurales de la inferencia deductiva, se fundamenta el interés de la investigación presentada en esta Tesis Doctoral.

Antecedentes y estado del arte. Se exponen los antecedentes normativos, psicológicos y neurales del razonamiento deductivo, con especial atención a la

descripción del estado de la cuestión en relación a la identificación de eventuales correlatos neurales o psicológicos de inferencias deductivas. Se revisan críticamente las evidencias psicométricas en relación a las diferencias entre razonamientos deductivos e inductivos, comprobando la ausencia de medidas de deductividad.

Objetivos. Se proponen cinco objetivos generales en la investigación: el primero relacionado con el diseño y validación psicométrica de una medida de razonamiento deductivo. Los objetivos dos y tres se basan en la evaluación de la actividad cerebral evocada a partir de tareas de inferencia deductiva y la localización de sus generadores. Finalmente, los objetos cuatro y cinco se relacionan con los cambios de la actividad eléctrica cerebral antes y después de un entrenamiento del razonamiento deductivo y sus cambios con la edad.

Hipótesis. Se proponen cinco hipótesis de estudio, una por cada uno de los objetivos propuestos.

Metodología. Esta sección se organiza en función de tres estudios consecutivos que se corresponden con los hitos principales de la Tesis Doctoral: diseño de una medida psicológica de inferencia deductiva, estudio de la actividad cerebral de la inferencia deductiva y efecto del entrenamiento de un programa de inferencia deductiva en diferentes grupos de edad.

Resultados. Se organizan en tres subapartados de acuerdo a los tres estudios que componen la Tesis Doctoral.

Estudio 1. “Variables de medida para el razonamiento deductivo”.

Se describe un instrumento de medida del razonamiento deductivo atendiendo a variables específicas como son los niveles de formalidad, integrabilidad, complejidad y modalidad. Los resultados nos han permitido verificar si el razonamiento deductivo maneja el contenido como plantea la teoría de la lógica mental o por el contrario aplica reglas lógicas como plantean el modelo tradicional y la teoría de los modelos mentales.

Estudio 2. “Localización cerebral del procesamiento semántico”.

Se estudian los potenciales evocados N400 y P600 asociados a tareas de razonamiento deductivo considerando los operadores lógicos de identidad, repetición, orden y negación. En particular, se determina cómo el aumento en la complejidad lógica o computacional de los estímulos afecta al procesamiento neural. Las inferencias deductivas estudiadas están en soporte visual y se comprueba que el procesamiento neural computa los operadores no negativos. Obsérvese que los estudios neurocientíficos de la deducción han empleado escasamente metodologías neuroeléctricas (EEG, MEG) y cuando lo han hecho, han prescindido de medidas de deductividad y también han presupuesto la integración de premisas.

Estudio 3. “Evidence linking brain activity modulation to age and to deductive training”.

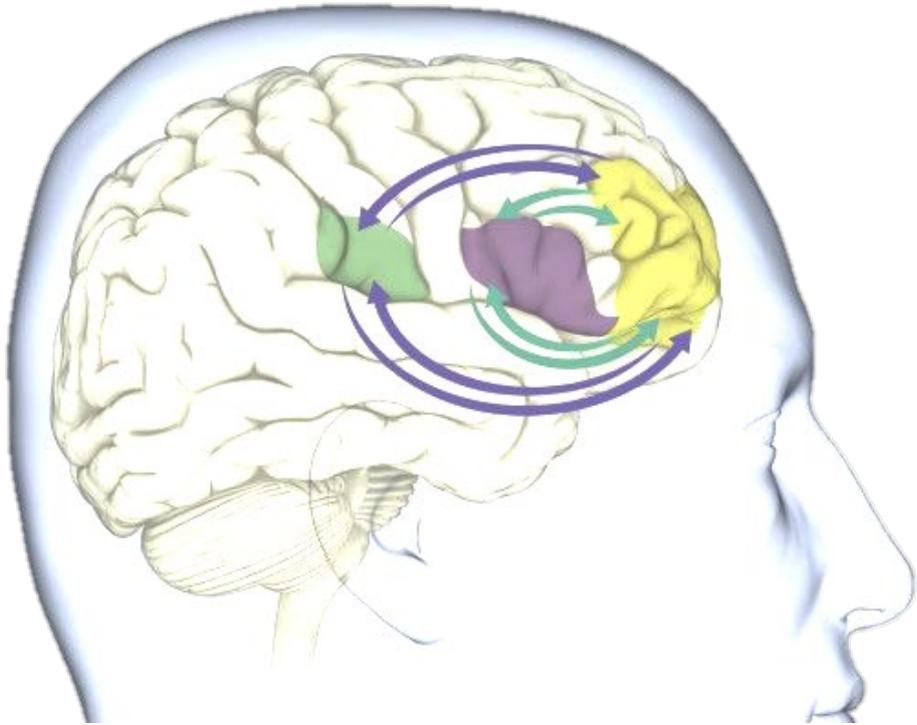
Se describe un programa de intervención de razonamiento deductivo atendiendo al efecto de dicho entrenamiento en base a los postulados de Monti (2017) y Prado (2018) y también considerando los modelos clásicos de “Lógica Mental” y “Modelos Mentales” sobre la localización cerebral del razonamiento deductivo.

Conclusiones. En este apartado se describe la consecución de los objetivos propuestos en la investigación.

Limitaciones y perspectivas futuras. Se hace referencia a la necesidad de seguir profundizando en el estudio de la medida psicológica y cerebral de la inferencia deductiva en diferentes soportes y grupos de edad.

Conclusions. This section describes the achievement of the objectives proposed in the investigation.

Limitations and future perspectives. Reference is made to the need to continue deepening the study of the psychological and cerebral measure of deductive inference in different supports and age groups.



① Antecedentes y Estado del Arte

1. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

1.1. Tres niveles de análisis del razonamiento deductivo

Un hito en la ciencia cognitiva contemporánea se establece cuando Marr distingue en el fenómeno cognitivo de la visión tres niveles de análisis (físico, algorítmico y computacional) (Marr, 1982; Marr & Passingham, 2018). En el nivel físico la visión es un proceso físico-químico entre células que transmiten la señal luminosa. En el nivel computacional la visión es un proceso abstracto de procesamiento de información visual, en el que es indiferente si se trata de un ojo, una lente, una célula de la piel (cromatóforo) o un sensor artificial. Entre ambos niveles media un tercer nivel intermedio que Marr llamó algorítmico correspondiente a las reglas o instrucciones de procesamiento que también se realizan en distintos procesos físicos.

Resulta natural y atractivo aplicar estos tres niveles de análisis al proceso de razonamiento deductivo, y así han hecho recientemente Baggio (2015) y Oaksford (2015). El propio grupo de trabajo de la doctoranda (Álvarez-Merino, Requena, & Salto, 2016, 2018a) ha propuesto una manera propia de entender estos tres niveles de comprensión del razonamiento deductivo. De acuerdo con esta perspectiva, distinguimos los niveles normativo, psicológico y neural:

(a) En el nivel **lógico** de análisis, los patrones de inferencia pueden considerarse como relaciones de consecuencia que preservan propiedades valiosas de las premisas, como la verdad (Gödel, 1930), la computabilidad (Church, 1940), la demostrabilidad (Martin-Löf, 1975) o la probabilidad (Adams, 1996). No se describirá aquí cómo se define "preservar" en cada caso, pero distintas reglas y axiomas aseguran que las inferencias válidas preservan unas u otras propiedades en el flujo de la información. Este nivel de análisis es normativo en el siguiente sentido: un cuerpo de información A se deduce de B si y sólo si se deduce de iure (o debe deducirse), incluso si no se deduce de hecho. Desde esta perspectiva puramente normativa se han definido conjuntos de reglas deductivas que permiten computar o demostrar todas y sólo las inferencias válidas, es decir, las que preservan alguna de las propiedades arriba señaladas. En la práctica científica, la lógica clásica (que preserva la verdad bivalente)

es el patrón normativo del razonamiento deductivo, pero existen alternativas significativas, como los criterios probabilísticos que están emergiendo como un paradigma deductivo alternativo (Oaksford, 2015). Obsérvese cómo el nivel lógico de análisis no determina qué propiedades son deseables, sino qué sistemas o conjuntos de reglas deductivas las preservan.

(b) El razonamiento deductivo es un proceso **psicológico** de inferencia que no es puramente normativo, sino factual e incluye el procesamiento de representaciones con sus contenidos perceptivos, agentuales o proposicionales. Siguiendo la terminología de Harman (Harman, 1984, 2002) debemos distinguir entre el *razonamiento* como un proceso psicológico entre representaciones reales y la *argumentación* como un proceso abstracto entre proposiciones o probabilidades. Aunque los razonamientos deductivos, inductivos y abductivos son lógicamente distintos (sus conclusiones se justifican de modo diverso), no disponemos a priori de evidencias que garanticen la existencia de procesos psicológicos distintivamente deductivos, opuestos a procesos inductivos o abductivos. Por el contrario, la literatura reciente ofrece a la pregunta “¿hay diferencias psicológicas de hecho entre los procesos de deducción e inducción?” respuestas completamente dispares¹.

En la psicología del razonamiento deductivo hay dos principales enfoques rivales en relación al razonamiento deductivo ampliamente documentados en la literatura: la Teoría de los Modelos Mentales (Johnson-Laird, 2008; Johnson-Laird, 2001; Johnson-Laird, Khemlani, & Goodwin, 2015) y la Teoría de las Reglas Formales (D. Braine & O’Brien, 1998; O’Brien & Manfrinati, 2010; LJ Rips, 2011). Mientras que la teoría de Modelos Mentales concibe el razonamiento deductivo como una búsqueda de contraejemplos, de modo que el razonador acepta como válidas las inferencias para las que no encuentra contraejemplos en ningún modelo admisible, la Teoría de las Reglas Formales entiende el razonamiento deductivo como el resultado de aplicar y recuperar reglas a las representaciones proposicionales. Durante más de dos décadas

¹ Respuestas positivas son dadas por (JSB Evans & Over, 2013; Wilhelm, 2005). Respuestas graduales o intermedias son dadas por (Heit & Rotello, 2010; Lassiter & Goodman, 2015; LJ Rips, 2011; H Singmann & Klauer, 2011; Henrik Singmann et al., 2016). Respuestas negativas son dadas (Oaksford, 2015): "...tasks are not deductive in and of themselves. What function a task engages is determined by the empirically most adequate computational level theory of that task".

de investigaciones, la rivalidad entre estas dos concepciones ha sido fructífera, pero ninguna de estas teorías ha sido completamente confirmada o refutada (Evans, Thompson, & Over, 2015; López-Astorga, 2012).

Desde aproximadamente 2010 (Baratgin et al., 2015; JSB Evans, Thompson, & Over, 2015) se viene produciendo un cambio de paradigma normativo en la psicología del razonamiento, imponiéndose una perspectiva probabilística en lugar de veritativa. Sin embargo, ambas concepciones rivales de la deducción (reglas formales y modelos mentales) mantienen su oposición replanteándose en términos probabilísticos bayesianos como se comprueba en (Lassiter & Goodman, 2015) y (Baratgin et al., 2015) respectivamente.

c) El tercer nivel de análisis se refiere al **sustrato neural** en el que se lleva a cabo la deducción en el sistema nervioso. Este nivel fáctico no nos da a priori razones para considerar "deductivo" un circuito o potencial dado, pero este hecho no excluye la existencia de propiedades específicamente deductivas en el procesamiento neural. Las investigaciones para este nivel de análisis, en un inicio se centraron en la inspección directa de las lesiones, incluyendo de manera esencial la actividad eléctrica y magnética ocasionada por los procesos neurales en el cerebro (Blank, Kanwisher, & Fedorenko, 2014). Actualmente, hay una gran profusión de estudio con resonancia magnética funcional (fMRI) contribuyendo a la localización espacial y topológica del razonamiento (Coetzee, Johnson, Wu, Iacoboni, & Monti, 2019).

No tenemos a nuestra disposición una macroteoría capaz de explicar el fenómeno deductivo de forma coherente en los tres niveles en los que se produce: el nivel normativo o lógico, el nivel psicológico de razonamiento y el nivel neural o cerebral de análisis. Ni siquiera podemos presuponer que uno y el mismo fenómeno ocurra en los tres niveles.

1.2. El razonamiento deductivo como fenómeno de desarrollo psicológico: estado del arte y cuestiones abiertas

1.2.1. Teorías psicológicas sobre el razonamiento deductivo

Estudios clásicos de la psicología del desarrollo se esforzaron en demostrar que el razonamiento se construye en etapas sucesivas desde el neonato hasta el adolescente (Piaget, 1960, 1976). En particular, las etapas del desarrollo del razonamiento van desde los reflejos, pasando por adaptaciones sensoriales y motrices, adaptaciones cognitivas concretas para finalmente lograr el modo ideal de razonamiento, formal o abstracto. Además, Piaget contemplaba una correspondencia cerebral con las operaciones formales que no pudo ser probada por carecer de métodos de estudio de neuroimagen en aquella época. Posteriormente, en la década de los noventa estudios que combinaban herramientas de análisis de los sistemas dinámicos con neuroimagen, mostraron relación entre los ciclos de crecimiento en el desarrollo cognitivo y cerebral proporcionando una base para el estudio del comportamiento en desarrollo, obsérvense revisiones críticas en Carey (2009) y Carey, Zaitchik, & Bascandzhev (2015). En particular, el estudio con EEG de Fischer y Rose (2007) evidenció curvas de crecimiento de conexiones nerviosas para cada una de las bandas de frecuencia (alfa, theta, beta y delta) coincidiendo con las etapas de desarrollo de razonamiento propuestas por Piaget (1960, 1976) en participantes entre 1 y 21 años. Por otro lado, el estudio de Fjell, Grydeland, & Krogsrud, (2015) muestra que los eventos de neurodesarrollo programados genéticamente causan un impacto duradero en la organización de la corteza cerebral a lo largo de toda la vida. Se emplearon un total de 1.633 imágenes de resonancia magnética de 974 participantes de 4,1 a 88,5 años de edad para medir los cambios longitudinales en el grosor cortical y el patrón de cambio topográfico se comparó con la influencia genética obtenida a partir de una muestra independiente de 406 gemelos de mediana edad. El estudio concluye que los cambios corticales debidos a la maduración y los cambios en la edad adulta se ajustan a principios organizativos genéticos (Figura 1.a.). Por consiguiente, la diferencia en la arquitectura cortical tiene su origen en el neurodesarrollo y los factores genéticos afectan los cambios corticales a lo largo de la vida.

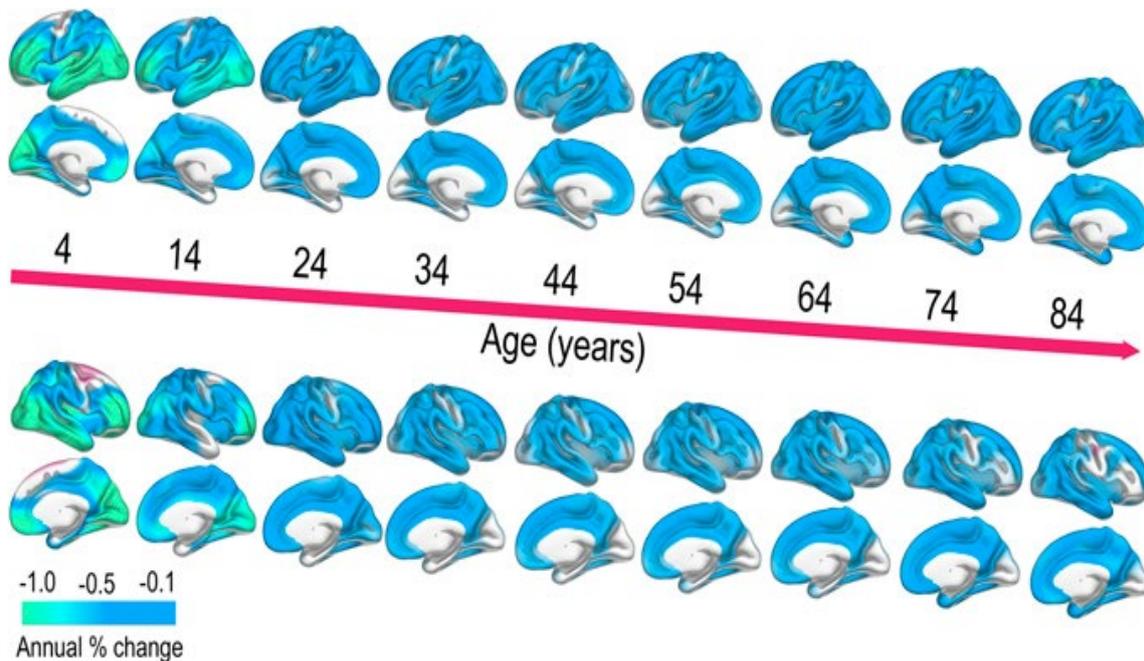


Figura 1. a. Porcentaje anual de la disminución (color azul) del grosor cortical a lo largo de la vida entre 4 a 84 años. En la parte superior se muestra el hemisferio izquierdo y en la inferior el hemisferio derecho (Fjell et al., 2015).

El razonamiento deductivo es un ejemplo paradigmático de habilidad cognitiva que pretendidamente atraviesa diversos dominios, que en la perspectiva piagetiana se asocia a peculiaridades formales descriptibles abstractamente (Osherson, 2019). Por ello, en un primer momento la revolución cognitiva es consistente con el formalismo piagetiano y de hecho los primeros modelos formales del razonamiento deductivo propusieron una “lógica mental” primero (Braine & O’Brien, 1998) y posteriormente propusieron con más matices colecciones de reglas formales instanciadas en la mente (O’Brien & Manfrinati, 2010). Rips en su obra “*Psychology of Proof. Deductive Reasoning in Human Thinking*” (1994) revisa desde esta perspectiva las principales analogías y diversidades entre los procesos psicológicos y computacionales de deducción, comprobando que la mayor complejidad lógica de la tarea no se comparece con su mayor dificultad psicológica ni mayor tiempo de procesamiento.

Paulatinamente se van abriendo paso concepciones menos formalistas de la deducción, como la influyente teoría de los modelos mentales (Johnson-Laird, 2001; Johnson-Laird, 2008), que se fundamenta no en el proceso formal sintáctico de demostración, sino en la construcción de modelos y contramodelos semánticos.

Mientras que la teoría de las reglas formales comprende el proceso psicológico de deducción de modo análogo a una prueba formal, la teoría de los modelos mentales fija un modelo ejemplar y juzga la validez o invalidez deductiva a partir de la verdad o falsedad en ese modelo. En las décadas alrededor del cambio de siglo abundaron los estudios experimentales sobre deducciones en múltiples contextos psicológicos aplicando la teoría de los modelos mentales (García-Madruga, Gutiérrez, Carriedo, & Moreno, 2002; Markus Knauff, 2009; Santamaría, Tse, Moreno-Ríos, & García-Madruga, 2013). A pesar de su notable desarrollo y de haberse aplicado con éxito en algunos campos (Khemlani & Johnson-Laird, 2017; W Schaeken, Vandierendonck, & Schroyens, 2013), la teoría de los Modelos Mentales no se ha logrado imponer por completo como explicación psicológica de las habilidades deductivas humanas respecto de las reglas formales (López-Astorga, 2012). Más aún, desde el cambio de siglo se han propuesto teorías psicológicas de la deducción que son aún menos formalistas, ya que consisten en heurísticas impredecibles para la solución de problemas (Gigerenzer, 2000) que no se distinguen esencialmente de procesos de inducción o abducción (Singmann, Klauer, & Beller, 2016).

Existen por tanto tres grandes familias de teorías psicológicas de la deducción (Reglas Formales, Modelos Mentales y Heurística) que a su vez conviven con distintos paradigmas normativos o lógicos, que incluyen el razonamiento extensional o veritativo funcional (operaciones booleanas) y sus extensiones modales, el razonamiento probabilístico (fundamentalmente bayesiano) y el razonamiento rebatible o no monotónico. Por lo tanto, no existe desde el punto de vista teórico una teoría psicológica estándar que explique satisfactoriamente los fenómenos deductivos, por mucho que se trate de una disciplina tan vieja como la propia ciencia.

1.2.2. Psicometría del razonamiento deductivo

Otra carencia fundamental en el estado del arte sobre la deducción radica en la ausencia de un constructo deductivo que se corresponda con medidas empíricas conocidas y aceptadas generalmente. Para encontrar una explicación debemos retrotraernos a los primeros estudios que midieron el razonamiento, que se concentraron en la evaluación psicológica de la distinción fáctica (no normativa)

entre el razonamiento inductivo y deductivo. Estos estudios dieron lugar a resultados dispares por Colberg, Nester & Trattner (1985) y Shye (1988) que finalmente fueron sistematizados y unificados por Carroll (1993). Emergieron entonces cuatro dimensiones básicas del razonamiento como proceso psicológico:

- **Dimensión operacional**, que es básicamente la distinción entre razonamiento deductivo/inductivo.
- **Dimensión del contenido**, que aborda los tipos de representación involucrados en el razonamiento (sentencial, figurativo y visual fueron los primeros tipos reconocidos).
- **Dimensión de la instanciación**, que distingue entre ítems abstractos (como las pseudopalabras) e ítems concretos.
- **Dimensión de las estrategias**, que discrimina entre diferentes modos de afrontar el mismo problema inferencial (a menudo hay múltiples soluciones equivalentes normativamente, pero distintas estratégicamente).

Con estas medidas, el trabajo de Wilhelm (2005) y Schoeders y Wilhelm (2010) confirmó que la distinción entre procesos deductivos e inductivos tiene menos impacto explicativo en el razonamiento que el tipo de representaciones involucrado (contenido). En consecuencia, en estudios subsiguientes la deductividad dejó de ser una variable relevante y se substituyó por variables no normativas (como la memoria de trabajo o incluso la función ejecutiva) o variables de razonamiento matricial o analógico.

A pesar de su influencia, es importante destacar que el resultado de Wilhelm (2005) está solamente basado en medidas generales de razonamiento, y no incluye medidas específicamente deductivas. Para verificar la irrelevancia psicológica de la deductividad sería necesario considerar propiedades abstractas que definan normativamente la deducción. El equipo de la doctoranda ha realizado algunos estudios piloto (Álvarez-Merino et al., 2016, 2018b) en relación a propiedades específicamente deductivas como la validez, la computabilidad, ratio entre la complejidad lógica y relacional, integración y niveles de formalidad. Con objeto de revisar estas propiedades en los test de medida de razonamiento, se llevó a cabo una

revisión de todas las herramientas de medida validadas por APA o EFTA en las que se involucra el razonamiento con el objeto de comprobar hasta qué punto incluyen o no variables genuinamente deductivas. En la Tabla siguiente, que procede de un trabajo aún sin publicar, revisamos las medidas de razonamiento en lengua española e inglesa para determinar si miden o no variables deductivas. Se comprueba que masivamente donde reza “razonamiento” no se miden en general inferencias deductivas (Tabla 1.a).

El resultado de la revisión psicométrica y bibliográfica sobre inferencia deductiva concluye que:

– Hay dos acepciones distintas de inferencias o razonamientos deductivos. En su acepción lata o extendida, una deducción es cualquier conclusión inferida de unas premisas sin apelar a informaciones adicionales. En su acepción estricta, una deducción sólo incluye las conclusiones que se implican válidamente desde las premisas.

–Ambas acepciones carecen de medidas específicas en el cuerpo de test de razonamiento. La Tabla 1.a muestra que las propiedades peculiares de la deductividad están en general ausentes de las medidas de razonamiento.

–Para medir ambas acepciones de deducción y a la vez medir las diferencias con otras formas de razonamiento, nuestro trabajo exploratorio y conceptual ha dado como resultado una serie de medidas que pueden estar en la base de la distinción factual entre formas deductivas y no deductivas de inferencia: (1) comparar la complejidad relacional (número de variables) con la complejidad lógica. Sólo las inferencias deductivas covarían con la segunda complejidad y no con la primera. (2) definir con precisión el concepto de “integración” de las premisas con la conclusión, de modo que se mida el grado de integración de las inferencias. (3) Las inferencias deductivas tienen mayor nivel de formalidad o abstracción que las no deductivas, para lo cual ha de definirse una medida de formalidad. (4) las inferencias deductivas son computables recursivamente a diferencia de las inductivas. (5) la validez probabilística o lógica es medible con precisión y distingue la acepción estricta de deducción de otras formas de inferencia.

Tabla 1. a

Medidas de razonamiento deductivo. Elaboración propia.

	Validez Lógica	Validez prob.	Complejidad Lógica	Complejidad relacional	Computabilidad	Varianza de formato	Integración	Niveles de formalidad	Medida
Razonamiento abstracto BPR	Microded		Presente	Estimado	Semicomputable	Visual	+	1	Razonamiento abstracto
Matrices WAIS IV	Microded		Presente	Estimado	Semicomputable	Visual	-	2	Razonamiento perceptivo
SX	Medido		Estimado	Estimado	Computable	Visual	+	2	Razonamiento Lógico
FX	Medido		Estimado	Estimado	Computable	Visual	+	2	Razonamiento Lógico
Proposición Erotética	Medido		Estimado	Estimado	Computable	Verbal/ Visual	+	2	Verbal, Deductivo
Aritmética WAIS	Medido		Estimado	Estimado	Computable	Verbal	-	1	
Aritmética WAIS	Presente	Presente		Estimado	Computable	Numérico	+	1	Razonamiento numérico
Numérico BPR	Presente	Presente		Estimado	Computable	Numérico	+	1	Razonamiento numérico
Pesos Figura WAIS	Microded	Presente	Presente	Estimado	Computable	Visual	-	2	Razonamiento perceptivo
Analítico BPR	Medido	Medido	Estimado	Estimado	Computable	Verbal	-	2	Razonamiento deductivo
Cubos WAIS	Microded		Estimado	Estimado	Semicomputable	Verbal	+	1	Razonamiento perceptivo
Espacial BPR	Microded		Estimado	Estimado	Semicomputable	Visual	+	1	Razonamiento espacial
R30	Medido		Estimado	Estimado	Computable	Visual/ Verbal	+	2	Lógica proposicional
TOLT	Medido		Estimado	Estimado	Computable	Visual/ Verbal	+	2	Aprendizaje deductivo
Flexibilidad Deductiva	Medido		Estimado	Estimado	Computable	Verbal	+	1	

1.2.3.El razonamiento deductivo desde la perspectiva del ciclo vital

Nuestra cultura distingue en la racionalidad desde hace milenios entre la capacidad de cálculo (entendimiento) y la capacidad de ponderar fines, objetivos y sentidos (razón). A diferencia de la cultura griega clásica o ilustrada europea, la ciencia de la psicología parte de datos psicométricos y propone un **modelo de proceso dual** de funcionamiento intelectual adulto, que se construye a partir del trabajo de Horn y Cattell (1966) acerca de inteligencia fluida y cristalizada. Éste no es sin duda el único modelo psicológico (Sternberg, 2019) aunque sí resulta especialmente adecuado para distinguir evolutivamente entre procesos psicológicos que se desarrollan en el tiempo, al distinguir entre aspectos de inteligencia que están sujetos a deterioro, y otros que pueden continuar progresando en el tiempo. En particular, desde la perspectiva del lifespan, Baltes y Staudinger (1993) emplean este modelo de proceso dual para diferenciar dos tipos de componentes, que en términos informáticos se corresponden con el hardware y software de la cognición. El hardware o **mecánica de la cognición** incluye un amplio espectro de procesos que incluye los elementales de entrada de la información sensorial, la memoria visual, auditiva y motora, los procesos de discriminación, categorización y coordinación, la velocidad de procesamiento, fluidez lingüística y razonamiento (un ejemplo excelente es el razonamiento en matrices y compleción de series). Por otra parte, la **pragmática de la cognición** incluye las características especializadas de la inteligencia determinadas por su uso, así como los sistemas acumulados de conocimiento y cultura. Naturalmente, la pragmática intelectual no puede operar sin la mecánica cognitiva, y viceversa.

La mecánica y la pragmática presentan groseramente perfiles evolutivos distintos, ya que la mecánica decae a partir de la juventud, mientras que la pragmática se preserva e incluso puede mejorar. Esta primera perspectiva del desarrollo (llamémosla perspectiva tradicional) es globalmente consistente con los resultados psicométricos que sustentan que con la edad hay un declive cognitivo (mecánico) en la inteligencia fluida, la capacidad de procesamiento y la búsqueda de soluciones nuevas (Brose, De Roover, Ceulemans, & Kuppens, 2015). Algunos estudios estiman que el declive en tareas de razonamiento puede suponer una pérdida irreversible de más de tres

puntos de media de CI por década de vida, aludiendo a la reducción de sustrato neural que dan soporte a las funciones mentales como el razonamiento (Salthouse, 2016). A lo largo de la primera década del siglo XXI se van acumulando evidencias científicas que cuestionan parcialmente esta perspectiva tradicional marcada por las pérdidas cognitivas con la edad. Por una parte, la teoría de la reserva cerebral y cognitiva revela diferencias notables del funcionamiento y comportamiento en respuesta al desgaste, la enfermedad o lesión neuronal en población mayor (Figura 1.b.) que invitan a considerar que el declive cognitivo no está generalizado.

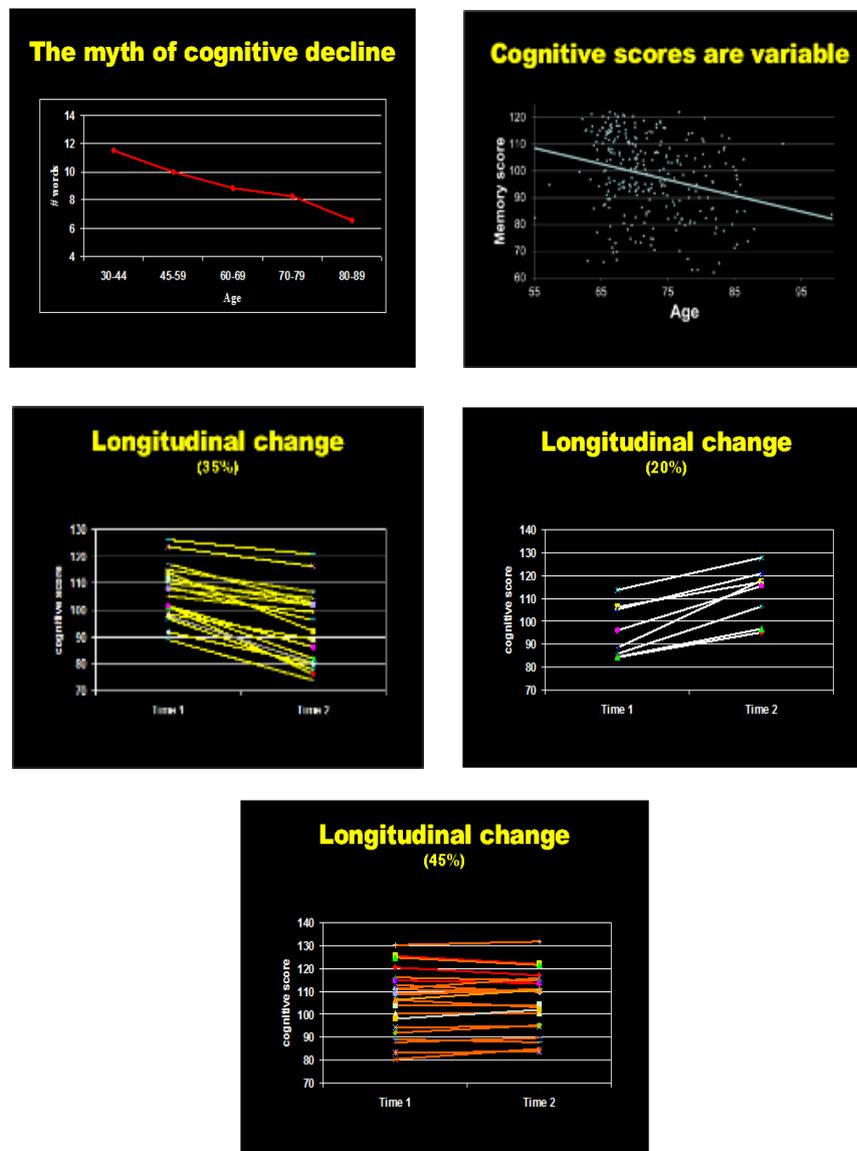


Figura 1. b. Perfiles de envejecimiento (Wecker, Kramer, Hallam, & Delis, 2005).

La teoría de la reserva (Stern, 2009) es consistente con la teoría general de plasticidad del envejecimiento cognitivo (Willis, Schaie, & Martín, 2009) que postula la adaptación continua al entorno a nivel neuronal (por ejemplo, remodelación de las neuronas, conexiones sinápticas y neurogénesis) y cognitivo (adquisición de nuevas habilidades) como forma de funcionamiento normal del cerebro (Draganski & May, 2008; Mercado, 2008; Pascual-Leone, Amedi, Fregni, & Merabet, 2005) (Figura 1.c).

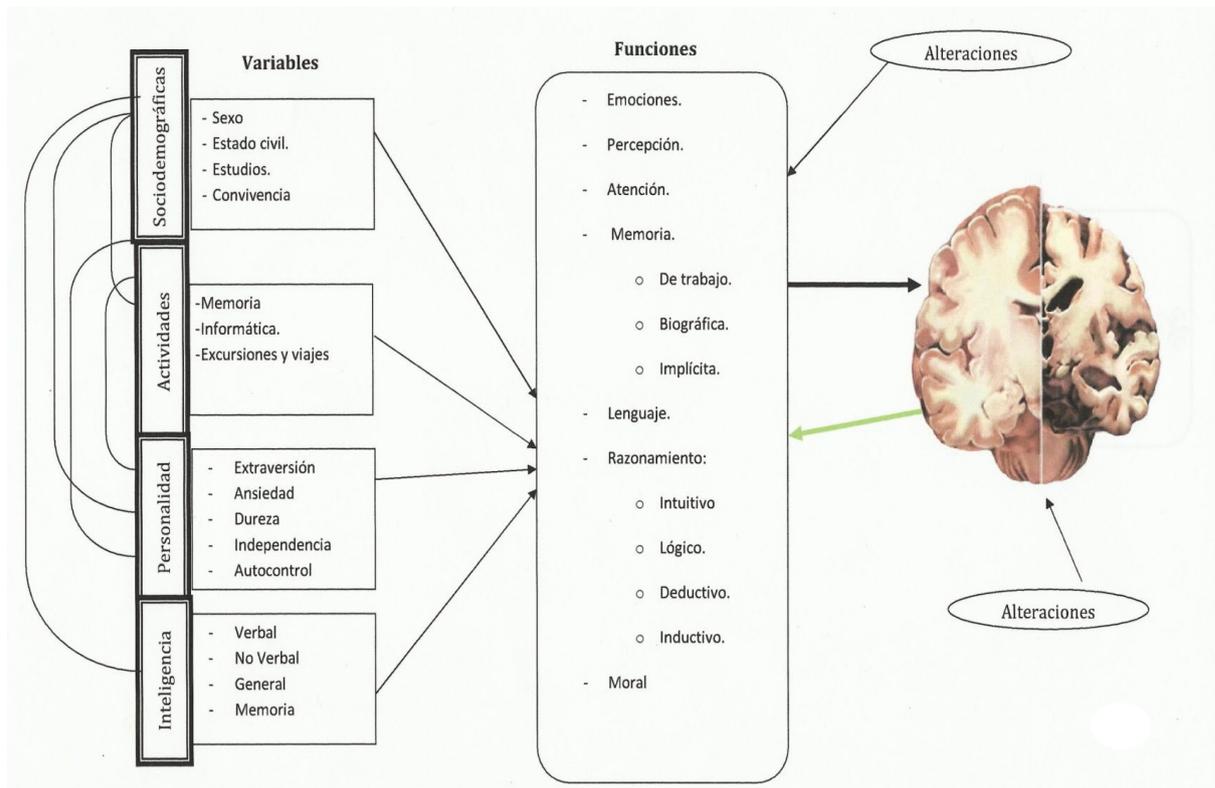


Figura 1. c. Variables formativas y reflectivas de reserva cognitiva. Elaboración propia.

La evidencia de estos datos motivó que con el cambio de siglo proliferasen estudios del efecto de programas de psicoestimulación dirigidos a población mayor. El modelo de reserva que impera detrás del uso de programas de psicoestimulación cognitiva es que tienen el potencial de proporcionar protección contra la manifestación clínica del deterioro cognitivo y cerebral (Siedlecki et al., 2009). En este sentido Valenzuela y Sachdev (2006) en su metaanálisis, encontraron que la participación en actividades mentalmente estimulantes fue la medida de reserva más robusta (en relación a la educación, ocupación, y el CI premórbido). Por otro lado, Scarmeas, Levy, Tang, Manly y Stern (2001) encontraron que la incidencia de la demencia estaba relacionada

con la actividad intelectual, física y social. Tal evidencia es muy importante puesto que sugiere que las personas mayores, pueden modificar el riesgo del deterioro cognitivo y mantener la independencia a través de la actividad mental. Las intervenciones han demostrado que mejoran las habilidades cognitivas entrenadas (Ball, Berch, Helmers, Jobe, & Leveck, 2002), y logran transferencia a otras habilidades cognitivas no entrenadas (Valenzuela & Sachdev, 2006; SL Willis, Tennstedt, Marsiske, Ball, & Elias, 2006). Aún más, el estudio ACTIVE pone de manifiesto que, a diferencia de la memoria, la velocidad de procesamiento y la fluidez lingüísticas, sólo el razonamiento se preserva con el entrenamiento después de diez años de seguimiento. Sin embargo, hasta el momento no se ha podido corroborar el efecto que este tipo de programas tienen sobre la funcionalidad de la vida diaria (Rebok et al., 2014; Requena, Turrero, & Ortiz, 2016).

El perfil de desarrollo del razonamiento deductivo es distinto de los otros modos de razonamiento (inductivo o abductivo), a juzgar por los resultados inconexos de la literatura y a falta de investigaciones longitudinales definitivas (Singmann et al., 2016). El razonamiento deductivo se preserva funcionalmente en el tiempo con una notable estabilidad (Malaia, Tommerdahl, & McKee, 2015; Yuan, Voelkle, Raz, & 2018, 2018) que contrasta con el razonamiento inductivo. Aún más, la inferencia deductiva responde al entrenamiento de modo plástico y exitoso tanto funcional como cerebralmente (Álvarez-Merino et al., 2018a, 2018b; Álvarez-Merino, Requena, & Salto, 2019). Por tanto, el razonamiento deductivo parece ser una competencia mecánica que sin embargo se preserva, y una capacidad fluida cuyo perfil de desarrollo no decae significativamente en el tiempo.

Pero no es ésta la única peculiaridad sorprendente del desarrollo deductivo humano, ya que debemos explicar dos hechos aparentemente contradictorios:

- Si una inferencia deductiva es válida, entonces es demostrable aplicando finitas reglas triviales. Por ejemplo, deducir que la suma de los ángulos internos de un triángulo es de exactamente 180° puede realizarse del mismo modo tanto por un niño como por un adulto de diferentes cohortes (año 1019 o 2019).

- Hay no sólo desarrollo sino progreso en el conocimiento deductivo humano, ya que hay novedad y originalidad en el curso del tiempo. Por ejemplo, los niños o adolescentes de 2019 entienden y resuelven problemas deductivos que la humanidad ha necesitado siglos o milenios en demostrar (teoremas del límite, geometría no euclídea, recursión transfinita, ...).

Las cuestiones últimas que conciernen a la psicología de la deducción en el desarrollo podemos plantearlas entonces del siguiente modo: Si hacer una deducción es como hacer un camino ya andado por el pensamiento, ¿cómo puede haber tantos descubrimientos como errores deductivos? Una vez excluida la opción apriorística o platónica, que es aún la concepción imperante de la racionalidad, ¿cómo explicar la realidad psicológica de los procesos deductivos y su implicación en el desarrollo? Estas cuestiones últimas superan los límites de esta Tesis Doctoral, pero marcan el camino para las primeras cuestiones que se plantearán en ella.

1.3. La deducción como fenómeno neural: Estado del arte y cuestiones abiertas.

La primera fuente de evidencia sobre la organización neuronal del razonamiento deductivo proviene de los estudios de lesiones cerebrales y neurales (Goel, Stollstorff, Nakić, Knutson, & Grafman, 2009; Goel, 2007). Refinados estudios de localización cerebral sitúan al razonamiento en regiones frontales laterales y parietales (Langdon, 2000) confirmadas por (Oaksford, 2015; Reverberi et al., 2010). Sin embargo, estos resultados adolecen de problemas metodológicos de diversa profundidad, pues los estudios de lesiones son difícilmente reproducibles y las tareas deductivas que se miden son muy heterogéneas.

Los primeros estudios neurales del razonamiento pretendieron decidir entre las dos familias de teorías psicológicas del proceso deductivo entonces imperantes. Algunos resultados favorecían a la Teoría de los Modelos Mentales (Knauff & Johnson-Laird, 2002; Knauff, Mulack, Kassubek, Salih, & Greenlee, 2002; Ragni & Knauff, 2013), puesto que se identificaron mecanismos visoespaciales que se activan en circuitos parietales y occipitales. Sin embargo, otros resultados favorecieron la Teoría de las

Reglas Formales, al identificar activación en la región del giro frontal inferior izquierdo, asociado a procesos formales o independientes del contenido (Parsons & Osherson, 2001). Durante la primera década del siglo XXI los investigadores intentaron determinar si la actividad neural asociada al razonamiento deductivo proviene de áreas asociadas a una u otra teoría del razonamiento. Sin embargo, los resultados por el momento son inconclusos e inconsistentes dado que muestran una notable variabilidad en la localización, intensidad, conectividad y relaciones tiempo-frecuencia. La actividad cerebral que acompaña a deducciones ha ofrecido resultados inconsistentes en estos primeros años, ya que algunos resultados muestran regiones relacionadas con el lenguaje (Goel & Dolan, 2004; Knauff et al., 2002; Monti, Osherson, Martinez, & Parsons, 2007; Monti, Parsons, & Osherson, 2009; Reverberi, D'agostini, Skrap, & Shallice, 2005; Reverberi et al., 2010), y otros incluso ninguna de las dos (Kroger, Nystrom, Cohen, & Johnson-Laird, 2008).

Ha sido recientemente, con el desarrollo de la neuroimagen, que se ha extendido el estudio del cerebro a la población sana y también ha avanzado el conocimiento de los circuitos neuronales que dan base a la deducción. La tomografía de emisión de positrones y la resonancia magnética funcional han permitido estudiar las habilidades deductivas respecto de la inferencia probabilística (Yang & Shadlen, 2007), las transformaciones gramaticales (Monti, Parsons, & Osherson, 2012), las operaciones matemáticas (Kroger et al., 2008) y el razonamiento deóntico y moral (Solway & Botvinick, 2012). De especial interés directo para esta Tesis Doctoral son las investigaciones que han estudiado distintos tipos de razonamiento deductivo con resonancia magnética funcional, alcanzando conclusiones divergentes en relación a la localización de las fuentes neurales y conectividad (Cutmore, Halford, Wang, & Ramm, 2015). Consideremos el caso de las inferencias deductivas simples, como *modus ponens* o silogismo disyuntivo, y en general los razonamientos proposicionales. Los experimentos de Monti, Parsons y Osherson (2007, 2009, 2012) sitúan la fuente cerebral de estas deducciones independiente de regiones lingüísticas apoyando de este modo la eventual existencia de un módulo formal en el razonamiento deductivo. Sin embargo, otros registros de resonancia magnética sobre ejercicios deductivos proposicionales (Goel, Buchel, Frith, & Dolan, 2000; Goel,

2007; Goel & Dolan, 2004; Prado, Van Der Henst, & Noveck, 2010; Prado, Chadha, & Booth, 2011), y silogismos relacionales (Prado, Mutreja, & Booth, 2012) sitúan su fuente en zonas lingüísticas y dependientes del contenido. Esta divergencia notable se reproduce en otras inferencias deductivas, como el silogismo categórico (Rodríguez-Moreno & Hirsch, 2009), los silogismos relacionales (Ragni & Knauff, 2013) e incluso la inferencia probabilística (Oaksford, 2015).

Aunque con mucha menos profusión y profundidad, las técnicas de electroencefalografía (EEG) y magnetoencefalografía (MEG) han mostrado experimentalmente la existencia de un comportamiento eléctrico de la deducción Bonnefond (2012, 2013, 2014). Sin embargo, se reproducen las dificultades expuestas con la resonancia magnética (Monti et al., 2009) a la hora de distinguir entre la actividad de comprensión lingüística de la tarea y las premisas, y la actividad deductiva en sentido estricto. Para superar las limitaciones metodológicas de EEG y MEG en la identificación de fuentes cerebrales, se han propuesto recientemente distintas estrategias, como el análisis de componentes y el análisis tiempo-frecuencia (Prado et al., 2011) que permiten descubrir experimentalmente la coherencia y conectividad de circuitos cerebrales asociados a distintos sucesos funcionales. Es importante señalar que la inferencia deductiva con proposiciones no verbales (basadas en la representación espacial) muestra los mismos resultados inconclusos que con la inferencia lingüística (Knauff, 2009; Prado, Van Der Henst, et al., 2010; Rodríguez-Moreno & Hirsch, 2009; Salto, 1998; Solernó, Chada, Guinjoan, & Lloret, 2012).

La aparente falta de consistencia en los resultados se logra organizar a partir del metaestudio realizado por Prado y colaboradores (2011). El autor identifica distintas fuentes cerebrales asociadas con tres grupos de inferencias deductivas, ofreciendo una perspectiva más consistente en el sentido de que no existe un único procesamiento deductivo neural. Esto es, las fuentes cerebrales varían en función de si el razonamiento es relacional, categórico o proposicional (Tabla 1.b).

Tabla 1. b

Fuentes cerebrales del razonamiento deductivo. Elaboración propia

Relacional	Categorico	Proposicional
GFI izquierdo	GFI bilateral	GFI izquierdo
GFMe izq ----		GFMe izq
GFMe dere ----		GFMe dere
----	GP	PG
	CPP ----	CPP
-----		CPP izqu
----	GB ----	

Las áreas en negrita son lingüísticas. GFI Giro frontal inferior, GFMe Giro frontal medio, CPP Corteza parietal posterior, GP Giro precentral bilateral, GB, glándulas basales.

Desde un punto de vista cuantitativo, el compendio global de veintiséis investigaciones sobre razonamiento deductivo con neuroimagen acredita cierta consistencia en las áreas y circuitos utilizados que coinciden en parte con los mecanismos neuronales que corresponden al lenguaje natural, al contenido semántico y visoespacial (Bonfond et al., 2014; Prado et al., 2015). Sin embargo, desde un punto de vista cualitativo hay diferencias notables en la conectividad y localización neuronal de las inferencias deductivas formales y el contenido del lenguaje natural (Monti et al., 2012; Monti & Osherson, 2012). Entre los descubrimientos de alcance reconocidos generalizadamente por la literatura destaca el carácter disperso y parcialmente distribuido de la deducción, así como su dependencia de distintos tipos de argumentación (proposicional, relacional, silogística o categórica).

1.3.1. Razonamiento deductivo y lenguaje

Casi dos decenios de investigación con las cuatro familias de técnicas de neuroimagen (EEG, MEG, fMRI, PET) sobre las bases neurales de la deducción no ha producido consenso sobre este punto central: se desconoce si la localización y conectividad cerebral de la inferencia deductiva elemental responde a operaciones de carácter formal, o bien por el contrario es subsidiaria de las operaciones que codifican contenidos, y en particular significados (Figura 1.d). Existen en esencia dos hipótesis rivales:

- Hipótesis de Monti-Osherson (Baggio et al., 2015; Coetzee, 2018; Coetzee & Monti, 2018; Coetzee, Monti, Iacobini, Wu & Johnson, 2019; Malaia et al., 2015; Monti & Osherson, 2012; Monti et al., 2007): hay en la inferencia deductiva un componente conectivo cerebral propiamente formal, independiente del procesamiento del lenguaje natural y bilateralizado.

- Hipótesis de Prado (Bonnefond et al., 2014; Goel, Navarrete, Noveck, & Prado, 2017; Prado et al., 2015, 2012; Prado, Van Der Henst, et al., 2010; Prado et al., 2011; Schwartz, Epinat-Duclos, Léone, Prado, 2017): la inferencia deductiva se produce en los circuitos y fuentes del lenguaje natural, no es formal sino dependiente del contenido semántico o visoespacial .

Una vez que Prado (2011) con un importante metaestudio sistematiza los resultados neuroeléctricos y neuromagnéticos sobre deducción, demuestra la existencia de diversos canales cerebralmente distintos en inferencias deductivas (por ejemplo, las inferencias transitivas evocan zonas espaciales posteriores claramente ajenas a las inferencias proposicionales frontales), el fondo de la diferencia entre ambas hipótesis radica en si las inferencias proposicionales permiten disociar o no entre circuitos propiamente formales o por el contrario se solapan con el procesamiento lingüístico.

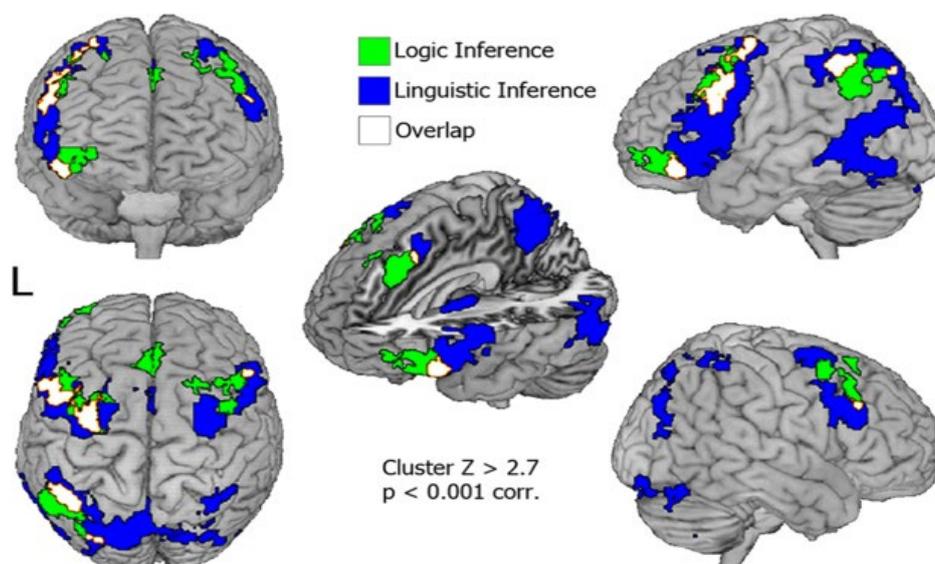


Figura 1. d. Disociación neural entre lenguaje e inferencia formal que avala la hipótesis de Monti (Monti, Parsons, & Osherson, 2009).

Esta Tesis Doctoral aborda el problema de fondo planteado por estas hipótesis rivales con la estrategia de comparar inferencias deductivas lingüísticas y visuales presentadas de modo que los mismos tipos de inferencia se realicen en soportes distintos medibles cerebralmente. La invarianza respecto del formato (visual o lingüístico) es un elemento clave para demostrar o refutar la existencia de circuitos específica y exclusivamente deductivos.

Por otra parte, ambas hipótesis son compatibles con los enfoques teóricos rivales en relación al razonamiento deductivo y la discusión se plantea en términos de dos descripciones distintas consistentes con la mayoría de los resultados disponibles. Los motivos de esta falta de consenso en un punto crucial pueden ser remotamente de carácter teórico, pero en primera instancia son de naturaleza experimental:

1. El grado de varianza en las fuentes y patrones cerebrales es notable. Por ejemplo, las conclusiones de Monti (2009), Coetzee & Monti (2018) y Prado (2011) resultan inconmensurables debido a los distintos criterios de complejidad deductiva empleados.
2. No existe una determinación general de las tareas de línea basal que filtren la intervención tanto de procesos deductivos como de otros procesos cognitivos (tales como la atención o la memoria). La propia secuencia del proceso deductivo, el orden y duración de las premisas, la interferencia de otros procesos asociados a la comprensión de premisas, las diferencias individuales, todo ello explica la amplia variabilidad de fuentes. Véase por ejemplo el llamativo contraste entre los procedimientos de filtrado entre oel et al. (2000) y Parsons & Osherson (2001), así como de nuevo entre Prado et al. (2015) y Monti (2017).
3. No existe una evidencia experimental de que una única operación cognitiva subyazca ni siquiera a todas las formas proposicionales de inferencia, más bien a juzgar por las distintas bases neurales, distintos tipos de razonamiento deductivo convocan circuitos y fuentes distintas (Prado et al., 2011).

4. Limitaciones técnicas relativas tanto a la resolución física como a la programación de algoritmos de interpretación de la señal de los distintos instrumentos de medida electromagnética (EEG, MEG, fMRI).

Para afrontar algunas de estas dificultades, esta Tesis Doctoral ha dispuesto de recursos materiales en el laboratorio de EEG, pero también ha empleado crucialmente recursos de carácter conceptual. En particular, nos centramos en una propiedad del razonamiento deductivo que la literatura ha desatendido y que puede explicar en parte la no reconciliación entre las hipótesis de Monti (2017) y Prado (2018): la integración. La integración considera que la inferencia sucede sólo entre premisas (o en general cuerpos de información visual, verbal, etc.) que sean **integrables** (Holyoak, 2012; Reverberi et al., 2010). La integración de premisas, bajo nociones y nomenclaturas diversas, tiene un amplio fundamento en la investigación psicológica del razonamiento deductivo (Evans, 2012) y también es imprescindible en el registro neural de la deducción. Por ejemplo, Goel (2007) toma como tarea de control secuencias no integrables de enunciados incluso aunque resulten ser deductivamente válidos.

Sin embargo, las inferencias deductivas válidas no tienen que ser integrables y en ocasiones de hecho no lo son. Esta diferencia conceptual notable nos ha ofrecido una oportunidad metodológica para trabajar con inferencias deductivamente válidas que la literatura psicológica ha relegado. No es casual que parte del disenso en los resultados de investigación cerebral de la deducción se deba a emplear diversos criterios de integración, además de la ausencia de criterios de comparación y medida. Las discrepancias sobre la conectividad y las fuentes de la deducción elemental pueden deberse en parte a la ausencia de criterios comunes de integración de premisas [compárese por ejemplo Goel (2007) con Parsons y Osherson, (2001) y Prado, Chadha y Booth (2011)]. En ocasiones, se toma como criterio de integración la presencia de términos o palabras comunes en las distintas premisas (criterio sintáctico), en otras ocasiones se toman criterios semánticos o contextuales, a su vez de muy distinto carácter en los distintos estudios experimentales (Gerken, 2012; Moreno-Ríos & García-Madruga, 2002; Parkin, Hellyer, Leech, & Hampshire, 2015; Santamaría et al., 2013). Empleamos en este sentido la noción de *compartición de*

variables (Méndez, Robles, & Salto, 2012), para determinar un criterio preciso y verificable de integración, y aprovecharemos también la posibilidad de distinguir con precisión entre las inferencias integrables (relevantes) y válidas.

En otro sentido, los *razonamientos* o inferencias se clasifican en deductivos, inductivos y abductivos (Peirce, 1965), en base a una distinción normativa planteada en función de cómo se justifican sus conclusiones, y no en virtud de qué procesos psicológicos reales los distinguen, si es que los hay. Aunque los razonamientos deductivos, inductivos y abductivos son lógicamente distintos, no disponemos a priori de evidencias que garanticen la existencia de procesos psicológicos distintivamente deductivos, opuestos a procesos inductivos o abductivos. En esta Tesis Doctoral, su autora hipotetiza que existen diferencias psicológicas de hecho entre los procesos de deducción e inducción. Sin embargo, esto no significa que haya inferencias *sistemáticamente* deductivas. En abstracto, las deducciones se agrupan en sistemas computacionales, pero en la realidad mental y cerebral la deducción puede ser un proceso eventual, fraccionado. Cuando razonamos lo hacemos habitualmente de modo inductivo o abductivo. Pero cuando queremos confirmar la seguridad de nuestro razonamiento, por ejemplo, si queremos una demostración o una prueba, actuamos como científicos y es cuando interviene el razonamiento deductivo o normativo con el objeto de monitorizar si estamos o no razonando adecuadamente.

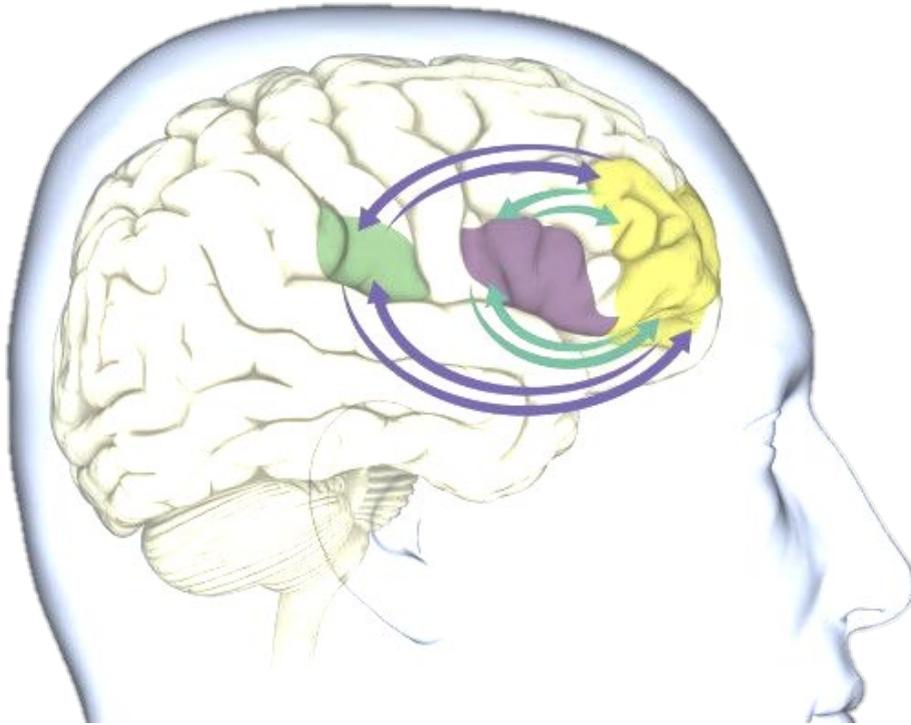
1.4. Planteamiento erotético del problema

La razón es una colección compleja de habilidades de las que las ciencias psicológicas sólo tienen un conocimiento muy parcial. Esta Tesis Doctoral se centra específicamente en el razonamiento deductivo, respecto del cual pretende contribuir a la definición futura de un constructo deductivo conceptualmente preciso, experimentalmente verificable, adaptado a los cambios evolutivos en el desarrollo y eventualmente útil para medir y mejorar la funcionalidad razonadora.

Planteado erotéticamente en términos de preguntas, las cuestiones son:

- ¿Cómo definir, diseñar y desarrollar un constructo específicamente deductivo que permita medir la deductividad de inferencias y razonamientos? ¿Qué propiedades específicas y qué medidas se asocian exclusivamente a inferencias deductivas y no están presentes en otro tipo de inferencias?
- ¿Responden las diferencias normativas entre razonamientos deductivos a diferencias reales en procesos psicológicos y/o neurales? Dado que la literatura ha encontrado dificultades para determinar qué procesos neurales y qué procesos psicológicos son específicamente deductivos, se trata de una cuestión experimental abierta.
- ¿Dependen los procesos de razonamiento de su soporte lingüístico o visual? Dado que un problema crucial en la comprensión del razonamiento deductivo es si existe (Hipótesis de Monti (2017)) o no (Hipótesis de Prado (2018)) un módulo formal de inferencia independiente del contenido visoespacial o lingüístico.
- ¿Es la habilidad deductiva entrenable mediante la práctica y es posible medir los efectos cerebrales del entrenamiento deductivo? En la educación, en la ciencia y en la vida ordinaria es extraordinariamente útil desarrollar con éxito los procesos deductivos, ¿son verdaderamente computaciones los procesos cerebrales de cálculo deductivo?
- ¿Hay propiedades idiosincráticas de la deducción en la vejez? Las investigaciones sobre el desarrollo cerebral indican la predominancia de áreas posteriores, la desdiferenciación y deslateralización en tareas con demanda cognitiva (ver la revisión de modelos de envejecimiento cerebral HAROLD, PASA, CRUNCH, ELSA realizada por Grandí y Tirapu-Ustárrroz (2017)). Pero, por otro lado, la investigación funcional muestra que el razonamiento deductivo se preserva con la edad incluso a pesar del deterioro cerebral.

No podemos pretender que responder a estas cuatro preguntas sea una condición suficiente para definir un constructo de razonamiento deductivo, pero sin duda son condiciones necesarias que en el actual estado del arte no se conocen y constituyen la aportación científica de la presente Tesis Doctoral.



② Objetivos

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Generales

Objetivo 1. Identificar las variables que componen el constructo de razonamiento deductivo frente a otros tipos de razonamientos.

Objetivo 2. Determinar eléctricamente si la inferencia deductiva se corresponde con procesos neurales y psicológicos distintos de otros tipos de razonamiento.

Objetivo 3. Determinar eléctricamente si hay un módulo formal independiente del contenido (Hipótesis de Monti (2017)) o el razonamiento es dependiente del contenido y significado (Hipótesis de Prado (2018)).

Objetivo 4. Comprobar la implicación de áreas en los patrones de actividad eléctrica y cerebral provocados por el entrenamiento en monitorización de la validez del razonamiento.

Objetivo 5. Determinar si con la edad hay diferencias en el uso del razonamiento deductivo a nivel psicológico y cerebral. Por otra parte, identificar la implicación del entrenamiento en monitorización de la validez del razonamiento, en dichos niveles en las personas mayores.

2.2. Objetivos Específicos

A continuación, se detalla cada uno de estos objetivos y se plantean diversos objetivos específicos para cada uno de ellos.

Objetivo 1. Definir las medidas de validez, integración, formalidad, complejidad lógica y relacional, computabilidad y modalidad que componen el constructo de razonamiento deductivo. Una revisión o metaestudio de variables presentes en los test de razonamiento (subobjetivo 1a) establece la ausencia o presencia de medidas estrictamente deductivas. Se definen con precisión cada una de las propiedades propuestas (validez, integración, niveles de formalidad, relación entre la complejidad

lógica y la complejidad relacional, computabilidad (composicionalidad) y modalidad (subobjetivo 1b), proponiendo finalmente medidas cuantitativas específicas para cada una de ellas (subobjetivo 1c).

Objetivo 2. El segundo objetivo de este proyecto de investigación es determinar si se encuentran o excluyen evidencias psicológicas y neuroeléctricas que correspondan específica y exclusivamente a las inferencias deductivas, a diferencia de otros modos de inferencia. Por tanto, se trata de determinar si además de ser un modo de justificar argumentos o inferencias mediante pruebas o demostraciones (un proceso puramente normativo) las deducciones se corresponden con procesos neurales o psicológicos específicos que se dan en la realidad. La literatura está dividida sobre esta cuestión de hecho y un exhaustivo repaso del estado del arte ha mostrado que no es evidente que formas de razonamiento normativamente alejadas entre sí estén psicológica o neuralmente diferenciadas, y a la inversa, tampoco hay acumulada evidencia psicométrica del impacto de la deductividad en el montante general del razonamiento respecto de inferencias inductivas o abductivas.

- *Objetivo específico (2a).* Encontrar o excluir patrones de actividad eléctrica mediante localización de fuentes, que sean distintivas o exclusivas del razonamiento deductivo. (2b) Encontrar o excluir correlaciones de tales patrones con procesos psicológicos de deducción, en concreto en términos de aciertos, velocidad de procesamiento e integración. (2c) Como consecuencia de los puntos anteriores, encontrar o descartar la presencia de procesos deductivos en los tres niveles de análisis de Marr (1982). Este objetivo específico (2a) consiste en mostrar o refutar que el razonamiento deductivo tiene un substrato neural específico que se corresponde con un patrón de activación eléctrica cerebral que (1) está presente cuando se razona deductivamente, y (2) está ausente cuando no se razona deductivamente. Los subobjetivos (1) y (2) pretenden asegurar que la relación entre procesos de razonamiento deductivo válido y la presencia de un patrón específico de activación neural no es casual o adventicia.

- *Objetivo específico (2b)*. Establecer correlaciones sólidas entre propiedades psicológicas y neurales de razonamientos deductivos. En particular, para aquellos casos en los que los objetivos (1a) y (2a) hubieran sido establecidos, refutarán la covarianza de los aciertos conductuales y la velocidad de procesamiento con propiedades neurales.
- *Objetivo específico (2c)*. Una vez establecidos eventualmente estos objetivos específicos, se podrá constatar si las inferencias deductivas son procesos cognitivos reales que ocurren a nivel neural (físico), psicológico (algorítmico) y lógico (computacional).

Objetivo 3. El tercer objetivo específico de esta investigación es aportar nuevos datos que permitan decidir la cuestión abierta en relación a la oposición entre las hipótesis de Prado (2018) y Monti (2017), que se describe detalladamente en los antecedentes, donde también se describen las dificultades experimentales y conceptuales que han encontrado los investigadores. Para afrontar esta cuestión técnica compleja, esta investigación doctoral cuenta tanto con los recursos conceptuales como técnicos disponibles en el Laboratorio de EEG de la Universidad de León y la colaboración del grupo GENLA (Grupo de investigación en Envejecimiento y Lógica Aplicada) con la participación de investigadores de las Universidades de León y Salamanca.

Por consiguiente, en este objetivo se persigue comprobar la concordancia espacial y temporal en la activación eléctrica de tareas visuales deductivas y no deductivas en regiones occipitales (tareas perceptivas), regiones lingüísticas como el área de Brocca (Hipótesis de Prado (2018)) y el giro inferior frontal izquierdo (Hipótesis de Monti (2017)).

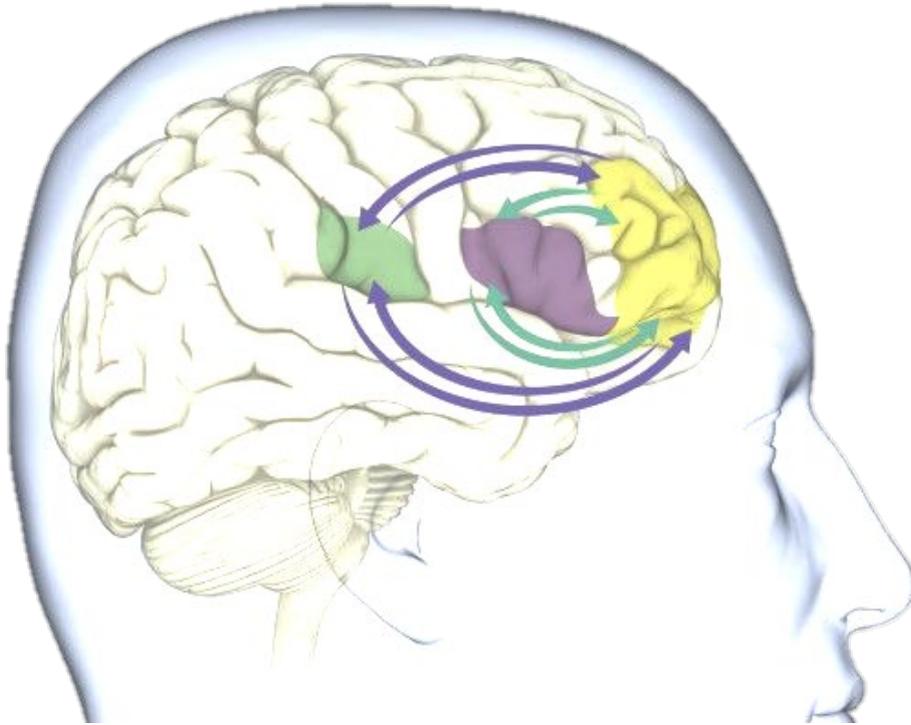
Objetivo 4. Según el trabajo de Houdé (Houdé, 2019a, 2019b; Houdé & Tzourio-Mazoyer, 2003) sobre la toma de conciencia de sesgos de razonamiento en el condicional material supone activación de áreas asociadas con la activación del área ventromedial. En este estudio se persigue:

- *Objetivo (4a)*. Identificar si hay regiones cerebrales asociadas con peor o mejor eficacia en tareas de razonamiento deductivo.

- Objetivo (4b). Comprobar si el entrenamiento en monitorización de la validez del razonamiento compromete la activación de la región prefrontal ventromedial, a la vez que aumenta la eficiencia en tareas de razonamiento deductivo.

Objetivo 5. Llamamos “idiosincrasia del razonamiento deductivo adulto” a los cambios funcionales en el razonamiento asociados a la edad. En general, los cambios idiosincráticos acompañan el desarrollo funcional de personas mayores e incluso en edades avanzadas con cierta independencia del deterioro físico que suceda a nivel cerebral. La descripción completa de esta idiosincrasia supera los límites de este proyecto, pero elementos o resultados básicos de esta descripción se incorporan en este objetivo.

Dado que la literatura identifica un desarrollo cerebral peculiar asociado a la edad consistente con mayor activación de áreas posteriores. En este quinto objetivo se propone comprobar la mayor eficiencia del razonamiento después del entrenamiento en monitorización de la validez del razonamiento, en tareas de razonamiento deductivo en personas mayores. La eficiencia se mide en términos psicológicos en número de aciertos y velocidad de procesamiento. En términos de actividad cerebral se espera la activación de regiones anteriores, en particular, la activación de la región prefrontal ventromedial.



③ Hipótesis

3. HIPÓTESIS

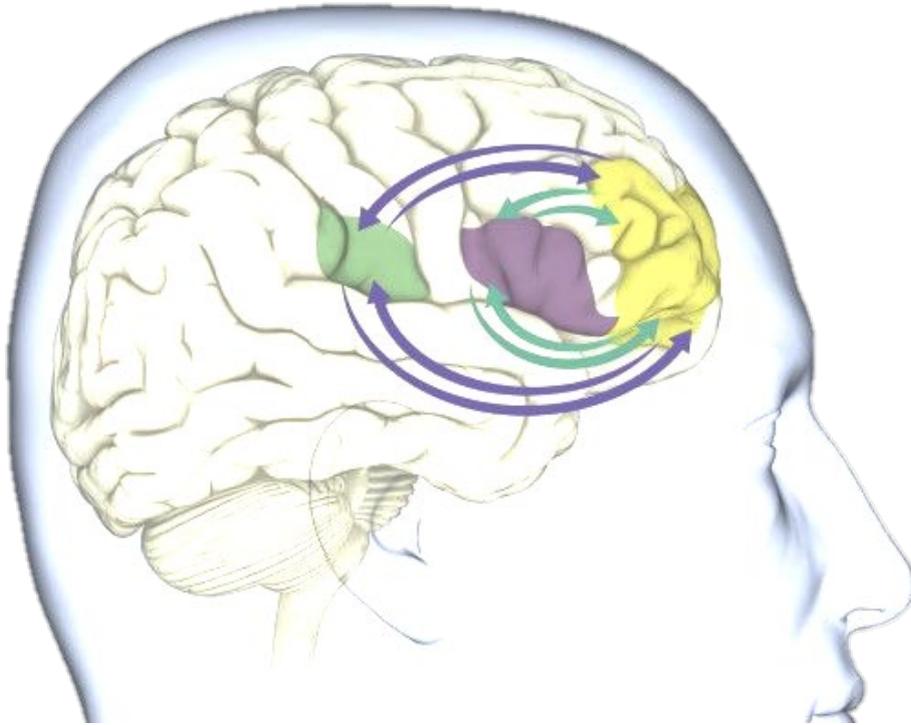
H1: Las pruebas psicométricas de razonamiento carecen de suficientes variables deductivas, entendiendo por tales propiedades computacionales o normativas que no están presentes en inferencias inductivas. Por ello, es factible definir un constructo de razonamiento deductivo que incorpore medidas ausentes en los test estándar de razonamiento.

H2: Las tareas que siguen instrucciones en las que se aplican inferencias deductivas se asocian con regiones cerebrales diferentes a cuando siguen otro tipo de inferencias. Se espera que la inferencia deductiva se diferencie de otros modos de razonamiento, en un nivel psicológico y cerebral.

H3: Según la hipótesis de Monti y Osherson (Baggio et al., 2016; Baggio, Van Lambalgen, & Hagoort, 2015; Coetzee, et al., 2019; Coetzee & Monti, 2018; Coetzee, Monti, et al., 2019; Monti, 2017; Monti, Parsons, & Osherson, 2012; Monti & Osherson, 2012; Monti et al., 2007, 2009), hay en la inferencia deductiva un componente conectivo cerebral propiamente formal, independiente del procesamiento del lenguaje natural. Por otro lado, según la hipótesis de Prado (Bonfond, Castelain, et al., 2014; Bonfond & Henst, 2013; Bonfond, Kaliuzhna, Van der Henst, & De Neys, 2014; oel et al., 2009, 2017; Prado, 2018; Prado et al., 2015; Prado, Chadha, & Booth, 2011; Prado et al., 2012; Prado & Schwartz, 2019; Prado, Van Der Henst, & Noveck, 2010): la inferencia deductiva se produce en los circuitos y fuentes del lenguaje natural, no es formal sino dependiente del contenido semántico o visoespacial. En base a estos presupuestos se espera que predominen los presupuestos psicológicos de la teoría de los Modelos Mentales cuando la tarea de razonamiento tiene un soporte no verbal y predominan los presupuestos de la Teoría de la Regla Formal en tareas con soporte lingüístico.

H4: Las tareas que siguen instrucciones en las que se aplican inferencias deductivas válidas se asocian con regiones cerebrales comprometidas con áreas anteriores. Se espera la activación de regiones anteriores después del entrenamiento en monitorización de la validez del razonamiento. Además, la activación de esta región se corresponderá con una mayor eficiencia en tareas de razonamiento deductivo.

H5: Los razonares adultos con más edad tienden a activar procesos psicológicos y regiones cerebrales asociados con procesamiento perceptivo. Esto es, independientemente del soporte, los adultos más mayores activan regiones cerebrales posteriores. Sin embargo, después del entrenamiento en monitorización de la validez del razonamiento, mejorará la eficiencia en tareas de inferencia deductiva en personas mayores.



④ Metodología

4. METODOLOGÍA

La investigación se organiza en función de tres estudios experimentales:

1. Elaboración y aplicación de una medida psicológica del razonamiento deductivo.
2. Identificación de un potencial evocado asociado al razonamiento deductivo.
3. Diseño y aplicación de un programa de entrenamiento en razonamiento deductivo.

Estudio 1.

Para la elaboración de la medida psicológica del razonamiento deductivo, que se corresponde con el objetivo 1 de la investigación, se emplea un proceso que incluye la validez de contenido y de constructo. En cuanto a la validez de contenido, se emplean jueces expertos en el tema para valorar la congruencia entre los diversos ítems y objetivos. En particular, el procedimiento cuantitativo que se emplea es:

- Especificar las diversas áreas de contenido que se pretenden evaluar.
- Elaborar varios ítems para cada objetivo.
- Seleccionar una muestra de expertos en la materia objeto de estudio en el test.
- Pedir a los expertos que asignen cada ítem al objetivo que pretende medir.
- Seleccionar los ítems en los que los expertos manifiestan mayor acuerdo en sus clasificaciones.

Simultáneamente, para la validez de constructo, en este caso del razonamiento deductivo, se emplean como indicadores los ítems del test. Éstos nos permiten comprobar empíricamente que resultan adecuados para reflejar el constructo de referencia. Las fases que se incluyen en este tipo de validez son:

- Formular hipótesis relevantes a partir de deducciones teóricas en las que aparezca el constructo que pretendemos evaluar con el test.
- Efectuar en la práctica mediciones oportunas de las variables o constructos involucrados en las hipótesis.

- Determinar si se verifican o no las hipótesis planteadas. En el caso de que así sea, queda confirmado que el test mide el constructo de interés.

Para contrastar las hipótesis de partida se aplica la técnica multivariada del Análisis Factorial (exploratorio o confirmatorio) sobre la matriz de correlaciones entre ítems, para descubrir estadísticamente las variables o dimensiones subyacentes (factores) a la covariación entre los elementos.

Estudio 2.

La metodología que se seguirá para el análisis de los registros de EEG, implementados en los objetivos 2 y 3, se compone de las siguientes tareas:

Procesado de la señal de EEG

1. Carga y acomodación de los datos

Mediante el toolbox de Matlab “EEGLAB” y empleando el plugin que proporcionan los fabricantes del electroencefalógrafo (amplificador IC de 64 canales compuesto por: Unidad de Control Modelo ND001M / N° Serie: 09AND001M-032 (Neuronic, SA Cuba), Bloque de Amplificadores Modelo ND1400 / N° Serie: 09AND1400-003 (Neuronic, SA Cuba)) se cargarán las señales y se cargarán como estructuras de Matlab (.mat).

2. Filtrado de datos

Este paso consiste en el filtrado de la señal para eliminar el ruido de red y limitar el ancho de banda del ruido. Para ello, se aplicaron dos filtros:

- Filtro FIR paso de banda con ventana de Hamming de orden de 2000 entre 0,4-98 Hz, para limitar el ancho de banda del ruido.
- Filtro FIR para eliminar la banda con ventana de Hamming de orden 2000 entre 4.9-50,2 Hz para eliminar el ruido de red.

3. *Eliminación de artefactos*

Tras una inspección visual de los datos se procede a eliminar los artefactos asociados al parpadeo mediante un análisis de componentes independientes (ICA) para eliminar estos efectos indeseados.

4. *Segmentación*

Para realizar la segmentación, se busca el conjunto de eventos “estímulo”- “respuesta”- “estímulo” para evitar estímulos sin respuesta, respuestas duplicadas o anómalas que pudiesen alterar los datos. Para cada trial, la primera muestra es aquella en la que ocurre el primer evento “estímulo”, y la última, la muestra previa al segundo evento “estímulo” de la triada estímulo-respuesta-estímulo. Se estudiarán las siguientes variables:

- Tiempo de estímulo-respuesta o tiempo de respuesta: es el tiempo (mínimo de 700 muestras) que tarda el sujeto en responder al estímulo.
- Tiempo de estímulo-estímulo o tiempo de trial: es el tiempo que transcurre entre la aparición de un estímulo y la aparición del siguiente, lo cual corresponde al tiempo total de cada trial.

Se emplea una longitud de trial de 1,5 segundos para limitar el ruido y poder conservar un mayor número de trials al llevar a cabo el siguiente paso de umbralización. Además, se descartan todos los trials con un tiempo inferior de respuesta a 100 ms.

5. *Umbralización*

Tras llevar a cabo la segmentación, el siguiente paso (último del procesado) de la señal, consistirá en establecer un umbral en amplitud. Este umbral se establecerá en 5 desviaciones estándar de la señal. Se considera que un trial está contaminado por ruido y, por lo tanto, se descarta si al menos 5 canales superan este umbral en al menos dos muestras. A partir del proceso de umbralización se calculará el promedio de los potenciales evocados con todos los trials de todos los sujetos, para hacernos una idea de los potenciales evocados obtenidos. Para representar los potenciales evocados se empleará un filtro FIR paso bajo con ventana de Hamming de orden 200

a 20 Hz, para eliminar el contenido espectral que no resulte de interés en el experimento.

6. *Promedio de los potenciales por grupos, condiciones de estudio y ROIs.*

Para tener una visión general de los potenciales evocados en cada grupo y para cada condición, se han promediado los potenciales obteniendo así un promedio “grand-average” de cada ROI. En el cálculo de los potenciales se han incluido 300 muestras (1500 ms), organizando los canales en 13 regiones de interés (ROIs). Los cálculos se han realizado con el número de aciertos de 58 sujetos (se descartaron dos sujetos, un adulto y una persona mayor) porque no cumplían los criterios de umbralización.

Los criterios de organización de los canales en los 13 ROIs se describen a continuación:

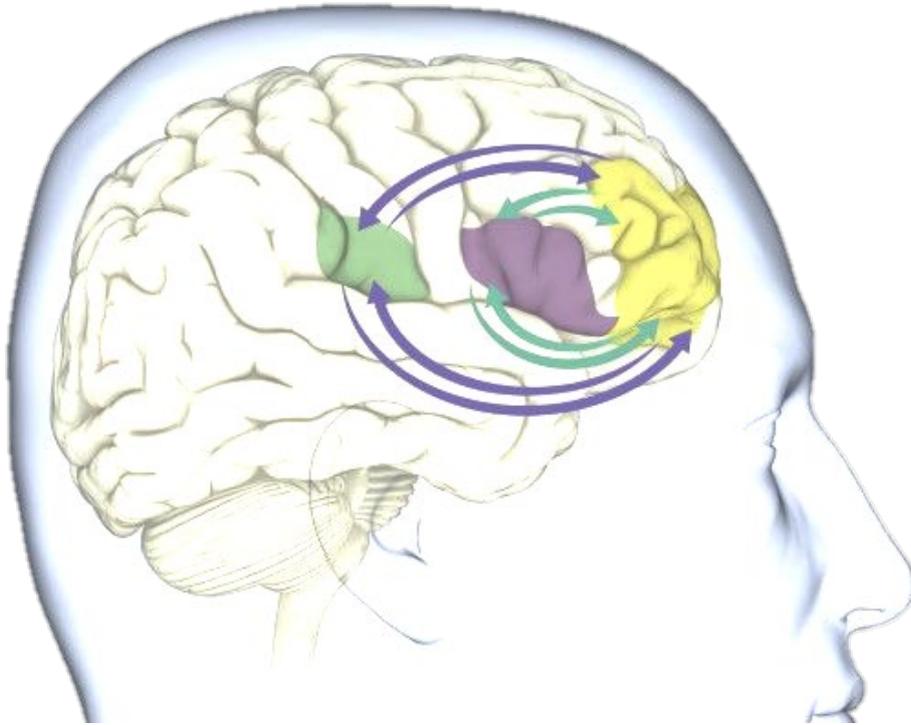
- Prefrontal: FP1, FP2, AF3, AF4, FPz
- Frontal derecho: F4, F8, FC6, F6, FC4
- Frontal izquierdo: F3, F7, FC3, F5, FC5
- Frontal medial: Fz, F1, F2, FCz, FC1, FC2,
- Temporal derecho: T4, T6, TP8, TP10
- Temporal izquierdo: T3, T5, TP7, TP9
- Central derecho: C4, C6, CP4, CP6
- Central izquierdo: C3, C5, CP3, CP5
- Central medial: Cz, CPZ, CP1, CP2, C1, C2
- Parietal derecho: P4, P6, PO8, PO4
- Parietal izquierdo: P3, P5, PO7, PO3
- Parietal medial: Pz, P1, P2, POz
- Occipital: O1, O2, Oz

Estudio 3

Finalmente, dado que los objetivos 4 y 5 se centran en el análisis del efecto del entrenamiento del razonamiento deductivo y el efecto de la edad, se llevan a cabo diferentes métodos de análisis exploratorios.

- En primer lugar, se realiza un análisis de campos evocados por evento (ERF en su terminología anglosajona) a nivel de sensores, con el que se estudian las diferencias de activación potencial neurofisiológica entre cada una de las condiciones.
- Para realizar los test estadísticos se realizan en primer lugar el test de normalidad (Lilliefors) y homocedasticidad (Chi-cuadrado), y en caso de no cumplirse, hacer transformaciones sobre los datos que permitan aplicar test estadísticos paramétricos, y de este modo aumentar la potencia estadística de los resultados.
- Los test aplicados se deben adaptar a las distribuciones de los datos, pero inicialmente se pretende usar los siguientes test:
 - (a) En comparaciones pre vs post un t-test pareado.
 - (b) En comparaciones entre grupos, dentro del mismo paradigma, t-test no pareado.
- Para la realización de los análisis estadísticos se utilizan modelos de T-test, ANOVA y ANCOVA considerando los grupos, las condiciones experimentales y posibles variables extrañas a controlar.
- Para delimitar los links de frecuencia acumulada relativa (FC) significativos entre grupos en cada condición de la tarea cognitiva se utiliza un test de permutaciones que permita delimitar el valor de la P sirviendo como modelo no paramétrico de corrección de las comparaciones múltiples en los registros de electroencefalografía (EEG). En este paso se realizan comparaciones entre los parámetros calculados. Se enfrentan paradigmas dentro de cada grupo. Del mismo modo, se enfrentan grupos dentro de cada paradigma. De esta manera se exploran todas las posibles diferencias estadísticas entre distribuciones en los datos.

- Además de esto, también se realizan representaciones gráficas de las comparaciones de los potenciales en tiempo y localización de fuentes, tanto entre paradigmas, como entre grupos.



⑤ Resultados

5. RESULTADOS

5.1. Estudio 1. Variables de medida para el razonamiento deductivo

Estudio 1

Variables de medida para el razonamiento deductivo

A continuación, se presenta una réplica exacta del contenido completo que conforma el manuscrito publicado en Revista Iberoamericana de diagnóstico y evaluación psicológica como Álvarez-Merino, P., Requena, C., & Salto, F. (2018). Variables de Medida para el Razonamiento Deductivo. Revista Iberoamericana de Diagnóstico y Evaluación – e Avaliação Psicológica, 49(4), 59–75. <https://doi.org/10.21865/RIDEP49.4.05>

Variables de medida para el razonamiento deductivo

Paula Álvarez Merino¹, Carmen Requena Hernández¹, Francisco
Salto Alemany¹

1. Cátedra de Envejecimiento en todas las Edades, Facultad de Educación.
Universidad de León.

Resumen

Hay doble pulsión en el centro de la discusión del razonamiento deductivo. Una conduce aparentemente a la abstracción y dominios arbitrarios, mientras que la otra conduce a la concreción y la dependencia del contenido. El objetivo de esta investigación es diseñar, aplicar y validar un instrumento de evaluación que nos permita corroborar si el razonamiento deductivo maneja reglas lógicas o contenidos. La muestra de estudio se compuso de 80 participantes (edad 18-77 años). El test consta de 60 ítems categorizados en: formalidad, integrabilidad, complejidad y modalidad. Los resultados ponen de manifiesto la fiabilidad del test de razonamiento deductivo con un alpha de Cronbach .775 y con un índice de validación .850 para el índice de inteligencia no verbal (INV) del RIAS. Como conclusión inferimos que el razonador deductivo no dispone de un cuerpo preciso de reglas generales deductivas, sino que usa colecciones de reglas heurísticas cada vez menos abstractas.

Palabras Clave.

Razonamiento deductivo, Validez, Fiabilidad, Formalidad, Integrabilidad.

Abstract

There is a double drive at the center of the discussion on deductive reasoning. One seems to lead to abstraction and domain independency, while another leads to concretion and content dependency. The objective of this research is to design, apply and validate an evaluation instrument that allows us to corroborate whether deductive reasoning handles logical or content rules. The sample consisted of 80 participants aged among 18 and 77 years. The test consists of 60 items categorized in levels of formality, integrability, complexity and modality. The results demonstrate the reliability of the deductive reasoning test with a Cronbach alpha of .775 and a validation index of .850 to the non-verbal intelligence index (INV) of RIAS. As a conclusion, we infer that tested deductive reasoners lack a definite corpus of general deductive rules, and on the contrary, they use collections of decreasingly abstract heuristic rules.

Keywords

Deductive reasoning, Validity, Reliability, Formality, Integrability.

Introducción

En la literatura actual, podemos encontrar presentes las siguientes teorías sobre razonamiento deductivo, que se describen cronológicamente a continuación. El modelo teórico tradicional del razonamiento deductivo ha aprovechado los notables desarrollos lógico-matemáticos que a partir de la obra de Frege(1967), Van Heijenoort(1967) y Gabbay(2002) han permitido caracterizar semánticamente y demostrar la computabilidad de toda una clase de inferencias deductivas que en primera instancia se han aplicado para modelar el razonamiento deductivo en contextos lingüísticos a partir de la obra de Montague (1970) y en contextos psicológicos con la obra de Inhelder y Piaget(2013) y Henle (1962). Estas concepciones asignan un papel central a la lógica elemental clásica en el razonamiento deductivo y se siguen aplicando en contextos matemáticos (Tait, 2005), lingüísticos (Texier et al., 2017) o psicológicos (Martin Monti & Osherson, 2012). La lógica que se utiliza en el pensamiento deductivo sigue unas reglas demostrablemente válidas en el sentido que (a) preservan la verdad de sus premisas, y (b) necesariamente las conclusiones se implican de las premisas, siendo precisamente estas dos peculiaridades las que diferencian el razonamiento deductivo de otros razonamientos como el inductivo (Heath, 2017)

Los modelos y concepciones más realistas de la inferencia deductiva no presuponen las capacidades inferenciales ilimitadas propias de los sistemas deductivos en abstracto. En este sentido, el modelo teórico y experimental de la lógica mental (M. Braine & O'Brien, 1998) asume que el razonamiento humano emplea y maneja finitas representaciones semánticas aplicando reglas de inferencia análogas a las reglas deductivas de la lógica. Distintas versiones de la lógica mental difieren sobre las reglas precisas (proposicionales, cuantificacionales, modales o probabilísticas) que se empleen en cada razonamiento deductivo específico. El modelo empleado más extendido coincide en líneas generales con los sistemas de reglas de la deducción

natural para la lógica elemental clásica, incluyendo reglas como *Reductio ad Absurdum* (Lance Rips, 2001). Al reproducir los patrones de argumentación y metaargumentación de los sistemas de deducción natural, afrontan distintas dificultades prácticas (repeticiones, ausencia de normalización de pruebas, etc.) que los hacen en ocasiones poco atractivos para razonamientos complejos (Byrne & Johnson-Laird, 2009). Las teorías del razonamiento deductivo que aceptan la lógica mental asumen que la complejidad lógica de una tarea deductiva se corresponde con su complejidad psicológica, de modo que por ejemplo se explica que *Modus Tollens* sea más complejo que *Modus Ponens*, puesto que no basta para la deducción la representación de la premisa condicional (Byrne & Johnson-Laird, 2009). Desde 2004, con el desarrollo de modelos probabilísticos bayesianos de razonamiento deductivo en condiciones de incerteza (Hahn & Oaksford, 2007), existen versiones probabilísticas de la lógica mental (Jonathan St. Evans et al., 2015; Pfeifer & Kleiter, 2010).

La teoría de los modelos mentales, es el marco teórico rival a la lógica mental y está basada en simulaciones o interpretaciones semánticas específicas (Philip Johnson-Laird, 2006, 2010, 2012). En una inferencia dada, el razonador construye modelos que representan los estados posibles del dominio compatibles con las premisas. Entonces, sin aplicar leyes lógicas, sino en virtud del contenido informacional, se formula una conclusión que habría de ser relevante e informativa. Ulteriormente debe comprobarse si el modelo no contiene contraejemplos a la conclusión. Por ejemplo, dado el condicional material con las premisas "si p, q" podemos establecer tres modelos posibles, a saber $\{p, q\}$, $\{\text{no } p, q\}$, $\{\text{no } p, \text{no } q\}$. Siguiendo la teoría de los modelos mentales se trataría de reconocer (Walter Schaeken, Vandierendonck, Schroyens, & D'Ydewalle, 2008) las diferencias de contenido que se producen al evaluar los argumentos deductivos, que básicamente consisten en contrastar si los criterios de validez deductiva coinciden con las condiciones de verdad en los tres modelos señalados.

La confrontación entre las concepciones de la deducción en términos de reglas o de modelos no ha permitido refutar experimentalmente ninguna de ambas teorías de la deducción (Byrne & Johnson-Laird, 2009; López Fernández, 2012), por lo que

recientemente se apuntan versiones unificadoras o simbióticas (Johnson-Laird & Khemlani, 2013) que aprovechan que ambas concepciones resultan compatibles con la existencia de dos sistemas distintos (deliberativo y automático) de razonamiento deductivo. Mientras que un sistema 1 es rápido, automático y no exige movilización de contenidos, el otro sistema es lento, deliberador y dependiente del significado (Jonathan Evans, 2008).

Por otra parte, la teoría de los mecanismos específicos renuncia a una única herramienta lógica general para explicar el razonamiento deductivo, introduciendo distintos sistemas de reglas heurísticas para distintos modos de razonamiento deductivo (probabilístico, numérico, relacional, etc.). Un ejemplo ilustrativo se pone de manifiesto en la teoría del experimento condicional de la tarea de Wason (1966), en la que se introducen distintas heurísticas para interpretar los distintos contextos condicionales. En el análisis que realizan Slovic, Finucane, Peters y McGregor (2007) y también Blackburn, van Benthem y Wolter (2006) introducen la noción de esquemas de razonamiento y reglas sensibles al contexto. Análogamente, Cósmites identifica un paquete heurístico deductivo pretendidamente específico para el trato entre humanos y guiado por fines sociales. Por consiguiente, el razonamiento de los sujetos en esta concepción no parece estar presidido por reglas lógicas formales sino por reglas heurísticas que gestionan representaciones mentales sin someterse a criterios de validez deductiva (Johnson-Laird & Byrne, 1991).

Cabe concluir a la vista de esta disparidad que hay dos pulsiones o necesidades teóricas distintas que se requieren del razonamiento deductivo. Una dirección apunta progresivamente a prescindir de un único corpus de reglas generales en la deducción, y sustituirlo por colecciones de reglas heurísticas cada vez menos abstractas. Por otra parte, si el razonamiento deductivo se reduce a aplicar reglas heurísticas *ad hoc* para cada caso, entonces no reconocemos en la deducción los patrones normativos que dan razones para que las premisas deban necesitar las conclusiones (Hanna, 2008; Stenning & Van Lambalgen, 2012). Por tanto, ésta es la dirección inversa. Es importante observar que aquí decimos “deban necesitar” en lugar de “necesiten” con objeto de dejar abierta la posibilidad de que no haya necesidad en la naturaleza. Pero incluso en la no necesidad, el carácter normativo de la implicación

deductiva debe estar presente (Engel & Kochan, 1991; Stenning & Van Lambalgen, 2012; Tenenbaum, Griffiths, & Kemp, 2006). Por tanto, parece imposible satisfacer esta doble pulsión en el centro de la inferencia deductiva, pues una nos conduce aparentemente a la abstracción y otra a la concreción.

El objetivo de esta investigación es diseñar, aplicar y validar un instrumento de medida del razonamiento deductivo atendiendo a las variables específicas de este tipo de razonamiento como son los niveles de formalidad, integrabilidad, complejidad y modalidad que nos permita corroborar si el razonamiento deductivo maneja el contenido como plantea la teoría de la lógica mental o por el contrario aplica reglas lógicas como plantean el modelo teórico tradicional y la teoría de los modelos mentales.

Variables específicamente deductivas

Formalidad

Las inferencias se clasifican en tres niveles de abstracción (formal, analítico y sentido común) en función de su grado de independencia del contenido. Las inferencias formales son sincategoremáticas o independientes de los contenidos semánticos o mentales involucrados, por ejemplo “Todos los pisos grandes y céntricos son caros. Este piso es grande y luminoso. Además, no es caro. ¿Es céntrico?”.

$$\left. \begin{array}{l} \forall x ((\text{PISO}(x) \wedge \text{CENTRICO}(x) \rightarrow \text{CARO}(x)) \\ \text{PISO}(a) \wedge \text{LUMINOSO}(a) \wedge \text{CARO}(a) \\ \text{¿Se deduce CENTRICO}(a)? \end{array} \right\}$$

Las inferencias analíticas dependen de las definiciones de alguno de los términos categoremáticos empleados, por ejemplo “Todos los pisos grandes y céntricos son caros. Este piso céntrico no es pequeño / ¿Es caro?”. En este ítem el sujeto maneja

definiciones de las palabras “piso”, “grande”, “céntrico”. Las inferencias que llamamos “de sentido común” dependen de la interpretación y evaluación pretendida de las premisas, por ejemplo “Todos los pisos grandes y céntricos son caros. Este piso es grande y luminoso / ¿Es caro?”. En este tipo de ítems, el sujeto va a responder en función de la experiencia acumulada en relación a los pisos.

La concepción del razonamiento deductivo basado en reglas predice que las inferencias lógicas o probabilísticamente válidas tienen un alto nivel de formalidad, puesto que o son instancias de reglas generales o son fácilmente generalizables. Por el contrario, la concepción del razonamiento deductivo basado en modelos, predice inferir una conclusión en ausencia de contraejemplos en el modelo de sus premisas, por lo que no es generalizable. La concepción heurística es compatible con los niveles más bajos de formalidad y predice una mayor dependencia del contexto incluso para las mismas premisas.

Integrabilidad

La conclusión de un razonamiento se dice integrable si y sólo si es pertinente a la verdad de las premisas. Tanto los estudios conductuales como neuropsicológicos sobre razonamiento requieren que las inferencias integrables compartan características léxicas, por ejemplo “Si el piso es grande y céntrico, entonces es caro. El piso es barato / El piso no es ni grande ni céntrico” mientras que las no integrales no comparten este tipo de características, por ejemplo “Si el piso es grande y céntrico, entonces es caro. El piso es amplio y elegante / El piso es caro”.

La concepción basada en reglas predice inferir conclusiones lógicas o probabilísticamente válidas incluso si las premisas no son integrables. Por ejemplo, si las propias conclusiones son válidas o altamente probables. Por el contrario, la concepción basada en modelos no puede recorrer todos los contraejemplos no integrables, por lo que es dependiente de la integrabilidad de las premisas. La concepción heurística también predice que las conclusiones deducidas sean pragmáticamente relevantes para sus premisas, por lo que no predice deducir conclusiones no integrables, aunque sean válidas.

Complejidad

Distinguimos entre la complejidad lógica de una tarea y la complejidad lingüística (o en su caso visual) correspondiente al procesamiento del planteamiento de la propia tarea. La complejidad de cada inferencia se cuantifica en función del número de ocurrencias de operadores formales o constantes lógicas que aparezcan en ella. En cambio, la complejidad lingüística de una tarea la medimos en términos de su tamaño sintáctico o número de palabras. Por ejemplo, inferencias de complejidad lógica 1 como “Si trabajas, entonces cobras un sueldo. Trabajas / Cobras un sueldo”, presentan una única constante lógica (si... entonces) con independencia de su mayor o menor complejidad sintáctica. Otras inferencias tienen cualquier número finito o cero de ocurrencias de operadores.

La concepción de la deducción basada en la aplicación de reglas predice que la complejidad en el procesamiento cognitivo acompaña la complejidad lógica, lo que es consistente con que el procesamiento sea composicional (elemento a elemento) en lugar de holístico. En cambio, la concepción modelística de la deducción predice que la complejidad del procesamiento psicológico sólo reproduce la complejidad del contraejemplo que se evalúa, y por tanto la tarea deductiva con más complejidad lógica no necesariamente tiene más complejidad en su procesamiento. En la concepción heurística, la independencia entre la complejidad lógica y la complejidad del procesamiento es aún mayor, de modo que en general a mayor complejidad lógica no se acompaña mayor tiempo de procesamiento ni mayor éxito deductivo.

Modalidad

Una inferencia deductiva es modal si y sólo si su validez depende no sólo de operadores extensionales (como las conectivas y cuantificadores), sino también de operadores modales, que se caracterizan por presentar condiciones de verdad relativas a un índice o modalidad, que puede ser temporal, doxástico, deóntico o alético. Por ejemplo, "creo que x" sitúa x en un contexto modal, puesto que puedo creer que no soy culpable con independencia de si soy o no culpable. De este modo se entiende que no sea deductivamente válida la inferencia: Creo que no soy culpable. Soy culpable. Por lo tanto, creo que merezco castigo. Otras modalidades no son

doxásticas sino prácticas, como “El piso que me interesa es grande o céntrico; El piso que me ofreces es pequeño y céntrico / ¿Me interesa el piso?”. Un ejemplo de ítem no modal es “Todas las llamadas diurnas a fijo o a internacional son gratis / No todas las llamadas son gratis”.

La concepción de la deducción basada en reglas computa en los contextos modales de acuerdo a reglas normativas que determinan cómo evaluar cada tipo de modalidad involucrada. Por el contrario, la concepción basada en modelos o simulaciones predice en función del modelo que permita encontrar o no un contraejemplo entre los modelos explícitos presentes (Gutiérrez, García-Madruga, Johnson-Laird, & Carriedo, 2002; Johnson-Laird et al., 2015). Finalmente, la concepción heurística de la deducción carece hasta este momento de una versión modal articulada.

Hipótesis del estudio

Las hipótesis de este estudio se formulan en los siguientes términos:

Hipótesis 1. Si los sujetos resuelven mejor las tareas de sentido común y analíticas que las tareas abstractas, estaríamos ante un tipo de razonamiento basado en el uso del contenido.

Hipótesis 2. Si los participantes del estudio resuelven mejor las tareas integrables que las tareas no integrables estaríamos ante un tipo de razonamiento en el que el sujeto basa su deducción en contenidos y no en reglas formales.

Hipótesis 3. Si el número de aciertos de los participantes está en función de la complejidad lógica de la tarea deductiva y es independiente de su complejidad lingüística, entonces los sujetos deducen de acuerdo a computar reglas formales.

Hipótesis 4. Si los participantes resuelven mejor los ítems modales que los no modales, los resultados serían consistentes con un razonamiento basado en reglas deductivas.

Método

Participantes

La muestra de estudio se compuso de 80 participantes con edades comprendidas entre 18 y 77 años. La captación de la muestra se hizo efectiva a través de jóvenes universitarios, sus padres y abuelos.

El criterio de inclusión para la participación en el estudio fue el manejo funcional de la lectura y la escritura y como criterio de exclusión padecer déficit sensorial y/o trastorno psiquiátrico o neurológico.

Todos los participantes leyeron y firmaron el consentimiento informado antes de cumplimentar la evaluación.

Instrumentos de Medida

Cuestionario Sociodemográfico

Consta de 15 ítems con alternativa de respuesta libre. De este modo, los sujetos de estudio cumplimentaron datos relativos a: sexo, situación laboral, nivel de estudios, estado civil, nivel de ingresos, zona rural o urbana, lateralidad, practica de ocio y cargas familiares (ver Tabla 5.1.a). Además, se solicitó datos relativos a edad, fecha de nacimiento y datos de contacto. Finalmente, se requirió información sobre enfermedades físicas, enfermedades psicológicas, dificultades sensoriales (vista y oído) y medicación, que sirvió como criterios de selección de la muestra.

Tabla 5.1. a

Ítems cuestionario sociodemográfico con alternativa de respuesta libre.

Ítems		Nº participantes	Ítems		Nº participantes
Sexo	Hombre	35	Nivel de ingresos	<600€	58
	Mujer	45		600€- 1200€	15
Situación Laboral	Estudiantes	25	Zona rural o urbana	>600€	7
	Activo	13		Rural	20
	Parado	20		Urbana	60
	Jubilado	23		Enfermedades físicas	Si
Primarios	32	No	49		
Nivel de estudios	Secundarios	14	Lateralidad	Diestros	69
	Universitarios	28		Zurdos	11
	Otros	6			

Estado civil	Soltero	28	Practica de ocio	Ver TV Formativa	74
	Casado	32		Física	55
	Viudo	7	Cargas familiares	Si	63
	Divorciado	13		No	45
					35

Test de razonamiento deductivo

El test final consta de 60 ítems con tres alternativas de respuesta: “se deduce que sí”, “se deduce que no”, “no se deduce” en los que se tienen en cuenta cuatro tipos de categorizaciones respecto del razonamiento deductivo a razón de al menos 15 ítems por factor, que coinciden con las cuatro propiedades específicamente deductivas presentadas y definidas en la introducción (formalidad, integrabilidad, complejidad y modalidad) (ver anexo I). Las propiedades medidas por test de razonamiento en general incorporan parcialmente las medidas de formalidad e integrabilidad, pero dan como resultado que la deductividad de las inferencias sea estadísticamente irrelevante (Wilhelm, 2005).

En la distribución de los ítems que componen cada factor se han seguido la propuesta de Luengo, Otero, Romero, Gómez-Fraguelay Tavares-Filho (1999), se ha tenido en cuenta la selección de las estructuras más características de cada uno de ellos. Algunos ejemplos ilustrativos son los siguientes (a) contraste modus ponens/ modus tollens y (b) el orden de presentación de los ítems ha sido aleatorio.

La administración del test de razonamiento deductivo se realizó en formato lápiz y papel de forma colectiva, sin embargo, también podría aplicarse vía internet y de manera individual, en función de las ventajas que esperemos obtener de ella. En el caso que nos ocupa, la forma de administración se determinó por la falta de autonomía en la relación con las nuevas tecnologías de las personas más mayores.

En los criterios de corrección estandarizados se siguieron las directrices del estudio de Auné, Abal y Attorresi (2016) que asignan valores entre 0 puntos, cuando la respuesta dada como solución del problema es incorrecta y 1 punto, cuando la solución es correcta.

De esta manera se está utilizando un sistema de escalamiento cuantitativo, cuyo rango de valores se sitúa entre 0 y 60 puntos como límite máximo, para la puntuación global de la prueba y entre 0-15 para cada una de las cuatro escalas.

En cuanto al tiempo de administración, nuestra prueba se define como un test psicométrico de potencia, es decir, sin limitación de tiempo. La duración promedio estimada para la realización completa es de 60 a 80 minutos.

Escalas de Inteligencia de Reynolds

La escala RIAS proporciona una completa y fiable evaluación de la inteligencia y la memoria de las personas con edades comprendidas entre los 3 y los 94 años. El índice de Inteligencia no Verbal muestra una estimación sintética del razonamiento deductivo que refleja principalmente las funciones intelectuales fluidas. Las puntuaciones obtenidas en esta prueba, se organizan en cinco niveles. Sin embargo, para este estudio hemos agrupado los niveles en tres (0, 1, 2): nivel 1 (por debajo del promedio), nivel 2 (en el promedio) y nivel 3 (por encima del promedio).

Procedimiento

Para la elaboración del test de razonamiento deductivo se operacionalizaron a través de los ítems, las definiciones conceptuales de las categorías de integrabilidad, modalidad, complejidad y niveles de formalidad. En primer lugar, se confeccionó un amplio banco de ítems para poder hacer una buena selección. El test se compuso inicialmente de 72 ítems, aplicado a una muestra piloto formada por 30 participantes (10 jóvenes, 10 adultos y 10 mayores) con el fin de identificar la idoneidad de la tarea, errores de contenido, formales o cualquier otra variable no controlada que supusiese una dificultad añadida a los sujetos. Corregidos los ítems, se procedió a eliminar 12 de ellos porque creaban confusión.

Por otra parte, la imposibilidad material y logística de abordar un muestreo probabilístico, eliminó cualquier intento de representatividad estadística para el conjunto de la población de estudio. Por consiguiente, se seleccionó un muestreo intencional similar al empleado en el análisis cualitativo en el que las unidades de muestreo no se toman al azar, sino de acuerdo a otros criterios. En particular, se optó

por un muestreo opinático, en el que se seleccionan los elementos de la muestra según criterios estratégicos, por ser los de más fácil acceso. Con esta estrategia se persiguió reclutar una población lo más homogénea posible desde el punto de vista cultural.

No obstante, la no representatividad estadística de la muestra no impide que, tal como fue reclutada, se puedan realizar inferencias sociológicas aproximativas sobre el nicho de población elegido. En este sentido en el análisis realizado, más que buscar diferencias entre grupos de edad se enfatizó la influencia de las variables en el promedio de aciertos del test en razonamiento deductivo.

Resultados

Se realizaron análisis descriptivos y comparativos mediante el programa estadístico SPSS para Windows, versión 24.0.

En primer lugar, se describen los datos de validación del test, seguidamente se presentan los datos de correlación entre el subtest de inteligencia no verbal del RIAS y el porcentaje de aciertos de razonamiento deductivo. Finalmente, se realizó la prueba de normalidad de Kolmogorov Smirnov, utilizando la corrección de Lilliefors. Los valores p de la prueba de normalidad son todos inferiores a .05 con lo que se ha procedido a realizar el contraste de muestras relacionadas de Wilcoxon el cual no requiere de los supuestos previos de normalidad.

Análisis estadísticos

Fiabilidad del test

La fiabilidad del test de razonamiento se evaluó mediante el coeficiente alpha de Cronbach, a través del cálculo de las correlaciones entre las cuatro variables que componen el test y se obtuvo un índice de .775. Además, el test obtuvo un índice de validación de .850 para el índice de inteligencia no verbal (INV) del RIAS, subescala que mide el razonamiento deductivo. Por consiguiente, el test pone de manifiesto una buena fiabilidad dada la alta consistencia interna.

Respecto a la capacidad del test para la variable que realmente operacionaliza el concepto que queremos medir se valoró la validez de contenido y de construcción mediante un juicio de expertos. En la selección de ítems participaron 8 expertos, a los que se solicitó que valorasen diferentes aspectos sobre la información inicial, la escala de medida y los ítems del test y una valoración global del mismo (Wiersma, 2001). Con respecto a dichos parámetros se requirió a los jueces expertos que hiciesen una valoración cualitativa (grado de comprensión y adecuación en la redacción) y una valoración cuantitativa de los mismos (escala de 1 a 10), emitiendo sus valoraciones en cuanto a la existencia de una diferenciación clara de las categorías a través de los ítems cumpliendo los principios básicos expuestos por Moriyama(1968): razonable y comprensible, sensible a variaciones en el fenómeno que se mide, justificación de la presencia de cada ítem, definición clara de los ítems y factibilidad de los datos.

De este modo, los jueces indicaron la necesidad de que el ítem formase o no parte del test y en la escala propuesta (de 1 a 10, dónde 1 es la calificación más baja y 10 la más alta) indicaron el grado de pertenencia del ítem al test. Siguiendo la propuesta de Bulger y Housner (2007) se decidió eliminar todos aquellos ítems con valores medios inferiores a 7.

Regresión

Se computó la línea de regresión con los ítems variable razonamiento y el nivel de inteligencia no verbal. Se demuestra una relación estadísticamente significativa y poder predictivo entre las variables (alta concentración de puntos que asemejan una línea). El modelo de predicción fue estadísticamente significativo ya que explica un 72.53% de la varianza ($p = .024$) (ver Figura 5.1.a).

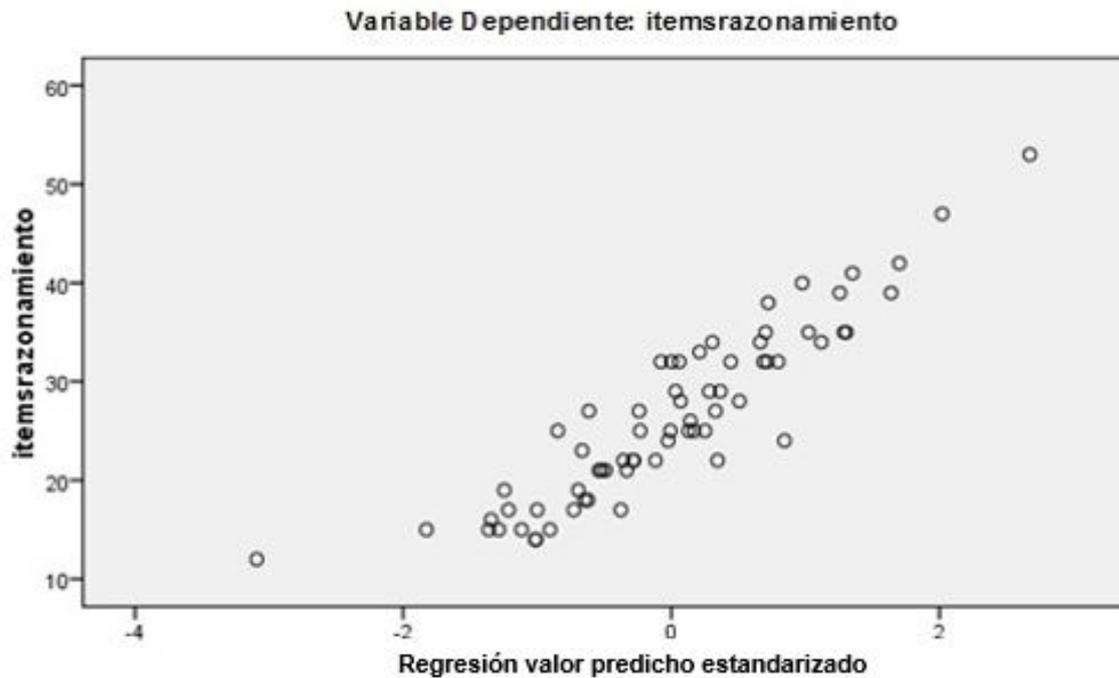


Figura 5.1. a. Análisis de regresión lineal de las variables razonamiento deductivo e inteligencia no verbal.

Análisis descriptivos del test

Los datos descriptivos del test ponen de manifiesto qué en la categoría de formalidad, predomina el porcentaje de aciertos en los ítems relacionados con el nivel analítico, seguido del puramente formal y más alejado el porcentaje de aciertos de sentido común (ver Tabla 5.1.b). En cuanto a la integrabilidad, el porcentaje de aciertos es mayor en los ítems integrables que en los ítems no integrables y los ítems modales se resuelven mejor que los no modales. En cuanto al nivel de complejidad, operadores lógicos y número de palabras, los sujetos obtienen mayor porcentaje de aciertos cuanto menor es el número de operadores o menor es el número de palabras (ver Tabla 5.1.b)

Una vez obtenidos los porcentajes se procedió a analizar la intercorrelación entre los diferentes niveles de complejidad de los operadores lógicos y lingüísticos. Al respecto, se observa la presencia de correlación entre los diferentes niveles que componen las categorías (ver Tabla 5.1.c).

47	20.25		X					X	
48	45.56								X
49	13.92						X		
50	91.13								X
51	37.97					X			X
52	41.77							X	
53	29.11				X				
54	29.11	X							
55	22.78		X						
56	44.30					X			
57	25.31				X		X		
58	32.91					X			
59	33.33								X
60	17.94		X						

Tabla 5.1. c

Coeficientes de correlación de Pearson entre los niveles de complejidad lingüística y lógica.

Complejidad por número palabras				
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Nivel 1		.565**	.625**	.483**
Nivel 2			.346**	.252*
Nivel 3				.473**
Complejidad por número de operadores				
	Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Nivel 1		.633**	.314**	.437**
Nivel 2			.643**	.439**
Nivel 3				.532**

Análisis comparativos del test

Los análisis comparativos entre los niveles de formalidad, ponen de manifiesto diferencias significativas entre los tres niveles: puramente formal, analítico y sentido común, a favor del segundo. La diferencia de medias de aciertos de integrabilidad vs. no integrabilidad, muestra significación a favor de la primera. Por otro lado, no se han encontrado diferencias significativas entre modalidad vs. no modalidad (ver Tabla 5.1.d). En cuanto al nivel de complejidad por número de operadores, los estadísticos ponen de manifiesto que no hay diferencias significativas entre los niveles uno, dos y tres y tampoco entre tres y cuatro. Sin embargo, la complejidad por número de palabras en cada ítem, muestran diferencias significativas entre todos los niveles de dificultad (ver Tabla 5.1.c). Por consiguiente, los datos revelan que en general, el razonamiento de los sujetos se ajusta más a la teoría de los modelos mentales.

Tabla 5.1. d

Análisis descriptivos de aciertos/errores del test de razonamiento deductivo atendiendo a las variables de formalidad, integrabilidad, complejidad, modalidad y número de palabras.

Categorización	Nivel	Media	Desviación Estándar
Formalidad	Puramente Formal ^a	0.48	0.15
	Analítico ^b	0.54	0.19
	Sentido Común ^c	0.24	0.18
Integrabilidad	Integrable ^a	0.42	0.12
	No integrable ^b	0.31	0.23
Complejidad Número operadores	Nivel 0 ^a	0.52	0.21
	Nivel 1 ^b	0.41	0.15
	Nivel 2 ^b	0.39	0.16
Modalidad	Nivel 3 ^b	0.39	0.16
	Modal ^a	0.44	0.19
	No modal ^a	0.41	0.13
Complejidad Número palabras	Nivel 1 ^a (3-8 palabras)	0.49	0.17
	Nivel 2 ^b (9-13 palabras)	0.44	0.17
	Nivel 3 ^c (14-19 palabras)	0.39	0.17
	Nivel 4 ^d (20-26 palabras)	0.33	0.16

Los superíndices ^{a, b, c, d} indican las agrupaciones para los valores p de la comparación de muestras relacionadas de Wilcoxon para p valor > .05.

Discusión

El presente estudio psicométrico tuvo como objetivo validar un test elaborado para la evaluación cuantitativa y cualitativa de las habilidades de razonamiento propiamente deductivo. El test recoge diferentes ítems que miden el nivel de

formalidad, la integrabilidad, la modalidad y el nivel de complejidad entre las premisas y las conclusiones. Estas propiedades capturan características propiamente deductivas de inferencias que otras medidas de razonamiento no desvelan, como se muestra por ejemplo en el estudio de Wilhelm (2005). Tres decenios de investigación psicológica acerca de las tres conceptualizaciones rivales del razonamiento deductivo no han alcanzado datos concluyentes y definitivos sobre si (i) el razonamiento deductivo computa reglas formales lógicas o probabilísticas, (ii) manipula contenidos semánticos de contraejemplo como plantea la teoría de los modelos mentales, o (iii) es un proceso heurístico *ad hoc*. Algunas propuestas actuales combinan simbióticamente reglas y modelos (Johnson-Laird et al., 2015; Skovgaard-Olsen, Singmann, & Klauer, 2016). Los resultados de las mediciones obtenidas ofrecen constricciones básicas sobre cualquier concepción de la deducción consistente con las propiedades medidas. En particular, las hipótesis que favorecían entender el proceso psicológico de deducir en términos de la lógica mental se han visto constreñidas o limitadas en su alcance.

La variable de la complejidad proporciona en este estudio los resultados más significativos y conceptualmente de mayor interés. Desde la perspectiva de la lógica mental, el proceso lógico de demostración se corresponde con el proceso psicológico de deducción. En consecuencia, la complejidad lógica de una inferencia se corresponde con la complejidad psicológica del razonamiento. Si entendemos el proceso de razonamiento deductivo como un proceso de prueba, entonces resulta natural asumir que el proceso es composicional y recursivo, como son los procesos de cómputo estándar. Un proceso es composicional si procede ordenadamente por partes de modo que las propiedades de complejos o compuestos se explican en función de las propiedades más simples de los elementos (Baggio, Choma, van Lambalgen, & Hagoort, 2010). Se han encontrado algunas evidencias de procesamiento composicional de inferencias deductivas a nivel cerebral y a nivel funcional es habitual entender los procesos de deducción como procesos de demostración, que son típicamente composicionales (Baggio et al., 2012; Reverberi, Görgen, et al., 2012b). Por lo tanto, tanto en la perspectiva veritativa como bayesiana de la lógica mental, se presupone que el razonador humano procede aplicando reglas

formales en las que la complejidad lógica de la inferencia se acompaña de la complejidad psicológica del razonamiento (Baggio et al., 2012).

En nuestro estudio se analizaron diferentes niveles de complejidad tanto lógica (número de ocurrencias de operadores lógicos) como lingüística (número de palabras). Se comprueba fácilmente que el éxito deductivo no depende en el experimento realizado de la disminución o aumento de la complejidad lógica de la tarea. En cambio, el éxito deductivo no es independiente de la complejidad lingüística de la tarea (se hacen significativamente mejor las tareas menos complejas lingüísticamente). Por tanto, la complejidad lógica no se comporta como el modelo logicista predice. Por ejemplo, la media de aciertos de los ítems con nivel de complejidad 1, 2 y 3 en número de operadores, está muy próxima. Tampoco presentan diferencias significativas las medias de los operadores del nivel 3 y 4. Véase, por ejemplo, que el porcentaje de aciertos en el ítem “Si el piso es grande y céntrico, entonces es caro. El piso es pequeño y feo / No es caro” y en el ítem “Si el piso es grande y céntrico, entonces es caro. El piso no es caro. Tampoco es grande / ¿Es céntrico?”. Sin embargo, los análisis comparativos de los diferentes niveles de complejidad lingüística ponen de manifiesto diferencias significativas entre todos ellos.

Este resultado puede entenderse a la luz de otras investigaciones (Heit & Rotello, 2010), que comparan la complejidad lógica y relacional de inferencias deductivas. Significativamente, también desde una perspectiva bayesiana o probabilística (Hahn & Oaksford, 2007) las inferencias deductivas son relativamente más dependientes de la complejidad lógica que las inferencias no deductivas. Estos resultados indican que el grado de dependencia de la complejidad lógica de una inferencia es una magnitud continua y gradual, que contrasta con la distinción binaria entre inferencias deductivas válidas y no válidas.

La concepción de la deducción basada en modelos mentales y contraejemplos no presupone correlación alguna entre la complejidad lógica y la complejidad lingüística de la inferencia deductiva, como pone de manifiesto Johnson-Laird (2008). Por tanto, la medida de complejidad no refuta, pero sí impone constricciones a la concepción

logicista del proceso psicológico de deducir. De hecho, los resultados sobre la variable de complejidad también constriñen la concepción de los modelos mentales, por cuanto sí existe correlación entre los diferentes niveles de complejidad lógica.

En la medida de formalidad se plantean tres niveles de abstracción que se corresponden con los principales modelos teóricos rivales del razonamiento deductivo, tal y como se expuso en la introducción (Evans, 1993; Evans, 2012; Johnson-Laird & Byrne, 1991; Schechter, 2013). Desde el punto de vista de la lógica mental, el razonamiento deductivo aplica reglas o esquemas formales que son normativos e independientes del contenido de las representaciones deducidas (Braine & O'Brien, 1998). Desde el punto de vista de los modelos mentales, el razonamiento deductivo manipula ejemplos o contraejemplos de premisas o conclusiones, y por tanto su nivel de formalidad es menor (Johnson-Laird, 2006, 2012), incluso desde una perspectiva probabilística (Johnson-Laird et al., 2015). Finalmente, si deducir es aplicar reglas heurísticas basadas en la experiencia y el contenido, entonces el razonamiento deductivo apenas se distingue del sentido común o del razonamiento inductivo y abductivo (Heit & Rotello, 2010; Rotello & Heit, 2009).

Los datos obtenidos en nuestro estudio en relación a la variable de formalidad muestran que los participantes han resuelto mejor los ítems analíticos y formales que los del sentido común. En el conflicto entre las creencias de sentido común y las consecuencias lógicas o probabilísticamente válidas, los razonadores concluyen masivamente de acuerdo con el sentido común incluso si éste es falaz lógica y probabilísticamente. Este sesgo es bien conocido (Stupple, Ball, Evans, & Kamal-Smith, 2011; Thompson & Johnson, 2014) e impone una restricción adicional sobre la lógica mental, aunque el efecto desaparece notablemente con entrenamiento, como se ha comprobado tanto a nivel conductual como cerebral (Houdé & Borst, 2015). Es más sorprendente que el nivel de formalidad más deductivamente exitoso sea el analítico, en el que los razonadores deducen propiedades o relaciones en virtud de definiciones. Inferencias analíticas son no sólo aquellas en las que hay presentes definiciones canónicas, sino que basta que en contextos conversacionales o convencionales se estipulen o fijen interpretaciones específicas de las premisas. Es

plausible que las habilidades deductivas dependan en parte de supuestos compartidos, presupuestos y conocimientos que permitan restringir el número de alternativas a computar. Por lo tanto, incluso en el supuesto de que la capacidad de razonamiento formal fuese innata, sería necesario un contexto adecuado donde ésta pudiera desarrollarse. Sucede entonces con el razonamiento deductivo lo mismo que ocurre con otros procesos como la percepción o el control motor que parten de unas disposiciones que pueden desarrollarse a partir de “oportunidades de acción que pueden encontrarse en el ambiente” o *affordance* (Costantini, Committeri, & Sinigaglia, 2011). Finalmente, los resultados del experimento son consistentes con un ámbito restringido pero presente de inferencia deductiva puramente formal, y por tanto del nivel más alto de formalidad. Este resultado es consistente con diversas investigaciones que exhiben limitadas, pero ineliminables capacidades formales (Singmann, Klauer, & Beller, 2016).

La integración o relevancia de la conclusión respecto de las premisas de un razonamiento deductivo es una de las variables que determina el éxito deductivo de la inferencia. El impacto de la integración sobre el reconocimiento de la validez deductiva es mayor que variables demográficas como la edad (Álvarez Merino, Requena Hernández, & Salto Alemany, 2016) y, por otra parte, tanto las concepciones de la deducción basadas en la probabilidad como las basadas en la verdad, adolecen de mecanismos para definir la relevancia o pertinencia de las premisas para la conclusión (Skovgaard-Olsen et al., 2016). El estudio demuestra que los deductores razonan con significativamente más acierto las inferencias integrables que las no integrables, incluso con una noción que restringe la integración a la compartición explícita de variables. Por ejemplo, el ítem “Todas las llamadas diurnas a fijo o a internacional son gratis. Llamé a un fijo y me cobraron/ Llamé por la noche o soy un dinosaurio”, es una inferencia válida a la que la mayoría de los participantes han respondido erróneamente “no se deduce”. Esto nos lleva a inferir que los sujetos podrían manejar reglas heurísticas de bajo nivel de abstracción del tipo: si las premisas no son integrables, la inferencia no es válida (Schechter, 2013). Nuevamente, los sujetos ponen de manifiesto la predominancia del razonamiento

deductivo basado en el contenido más que en la búsqueda de razones lógicas subyacentes ante los ítems aparentemente incoherentes.

Que los deductores sistemáticamente se restrinjan a inferencias integrables plantea dificultades al modelo deductivo basado en reglas, debido a que la clase de inferencias deductivamente válidas (tanto desde una perspectiva lógica como probabilística) no coincide ni con todas ni con sólo las inferencias integrables. Cabe pensar que un modelo de racionalidad restringido a cuerpos integrables de información no es consistente con los criterios de validez lógica o probabilística estándar.

En el caso de la categorización modal del test, los participantes obtienen ligeramente mejores resultados en los ítems que presentan condiciones de verdad relativas a un índice, aunque la diferencia no es significativa. Dado que la presencia de operadores modales aumenta la complejidad lógica del razonamiento (Hinterecker, Knauff, & Johnson-Laird, 2016) el resultado es consistente con la ausencia de efectos contrastables de la complejidad lógica. Los argumentos modales son integrables con facilidad, lo que es posible haya favorecido su correcta deducción. En todo caso, el razonamiento modal requiere de una atención específica más detallada que la que ofrece esta variable aislada.

Conclusión

“Hacer bien” un razonamiento deductivo se ha entendido como es habitual como hacer un razonamiento deductivamente válido. Los razonadores en el nivel de abstracción más bajo (sentido común) “hacen peor” los razonamientos que en niveles más abstractos. En particular, sobre la primera hipótesis planteada en la investigación, concluimos que los razonadores no resuelven mejor las tareas deductivas cuanto más abstractas son. Explicamos que los razonadores “hagan mejor” las deducciones de nivel intermedio de abstracción porque siguen definiciones, convenciones, supuestos tácitos o conversacionales. En la práctica razonadora ordinaria, las personas no distinguen con rigor entre implicaciones lógicas e implicaturas conversacionales. Este fenómeno se empareja con la bien

conocida prelación que los razonadores ordinarios dan a sus creencias incluso falaces sobre las conclusiones válidas, pero poco creíbles.

La segunda hipótesis plantea que un mayor número de aciertos integrables está relacionado con un razonamiento deductivo basado en el contenido, planteamiento que se confirma y se reafirma en la revisión de la tercera hipótesis, que muestra que la complejidad lingüística y no la complejidad lógica determina significativamente el porcentaje de aciertos deductivos. En cuanto a la cuarta hipótesis, no se ha podido constatar que los sujetos realicen mejor los ítems modales que los no modales, confirmando de nuevo que la presencia de operadores lógicos no determina las conclusiones de los razonadores.

La conclusión que se extrae de esta investigación es que en las prácticas deductivas ordinarias el nivel formal está muy limitado, tanto si se interpreta veritativa o probabilísticamente. No obstante, la investigación presenta limitaciones en su validez externa, razón por la que en futuras investigaciones se propone una metodología que replique los resultados en una muestra representativa de la población. Por otro lado, ulteriores investigaciones deben contemplar la inclusión de otras variables de razonamiento deductivo, como la no monotonicidad y la relevancia.

Anexo I: Test de razonamiento deductivo

1. Todos los pisos grandes y céntricos son caros. Este piso es grande y luminoso.
/ ¿Es caro?
2. Todos los pisos grandes y céntricos son caros. Este piso es luminoso y céntrico. / ¿Es caro este piso?
3. Los pisos grandes y céntricos son caros. Este piso es grande y luminoso. Además, no es caro. / ¿Es céntrico?
4. Todos los pisos grandes y céntricos son caros. Este piso céntrico no es pequeño. / ¿Es caro?
5. Posiblemente te equivocas. Seguro que, si te vas, no te equivocas. / No es seguro que te vas.

6. El piso que me interesa es grande o céntrico. El piso que me ofreces es céntrico. / ¿Me interesa el piso?
7. Si el piso es grande y céntrico, entonces es caro. El piso es grande y barato. / El piso no es céntrico.
8. Todas las llamadas diurnas a fijo o a internacional son gratis. Esta mañana llamé y me cobraron. / Llamé a un móvil nacional.
9. Si este piso es grande y céntrico, entonces es caro. Este piso es una ganga si es barato, grande y céntrico. / Este piso es una ganga.
10. Todos me adelantan. / Alguien es adelantado por todos.
11. Todas las llamadas diurnas a fijo o a internacional son gratis. / Me cobraron una llamada nacional. O llamé de noche o llamé a un móvil.
12. Si el piso es grande y céntrico, entonces es caro. El piso es barato. / El piso no es ni grande ni céntrico.
13. Si el piso es grande y céntrico, entonces es caro. El piso es barato. / El piso no es grande o no es céntrico.
14. Todas las llamadas diurnas a fijo o a internacional son gratis. / Llamé a un fijo y me cobra-ron. Llamé por la noche o bebo demasiado.
15. Si el piso es grade y céntrico, entonces es caro. El piso es grande, amplio y elegante. / El piso es caro.
16. Si el piso es grande y céntrico, entonces es caro. El piso no es caro. Tampoco es grande. / ¿Es céntrico?
17. No es un piso pequeño. / Creo que es un piso grande.
18. Si trabajas, entonces cobras un sueldo. Trabajas. / Cobras un sueldo.
19. Este piso es caro o no es caro.
20. Si el piso es grande y céntrico, entonces es caro. El piso es pequeño y feo. / No es caro.
21. Todas las llamadas diurnas a fijo o a internacional son gratis. / No todas las llamadas son gratis.
22. Todas las llamadas diurnas a fijo o a internacional son gratis. / Algunas llamadas diurnas son gratis.
23. El piso es caro y barato. / Mi casa es azul.
24. Soy un trocante o soy cojo. Ando perfectamente. / Soy un trocante.

25. El gobierno dulcina o recaemos en la crisis. No recaemos en la crisis. / El gobierno no dulcina.
26. Necesito piso. / Necesito piso.
27. Prefiero un piso grande. / Si vivo en un hotel, prefiero un piso grande.
28. Eres un trocante o no eres un trocante.
29. Vivo en la calle. / Necesito piso.
30. A veces soy melindro y no soy melindro.
31. Quien bien te quiere te hará llorar. Él no te hace llorar. / ¿No te quiere bien?
32. Cuando llueve, presvícica. Cuando no llueve, presvícica. / ¿Presvícica?
33. Si hay un problema de tráfico, entonces no hay guardia. No hay un problema de tráfico. / ¿Hay guardia?
34. Los paraguas azules no te protegen de la lluvia. / Por lo tanto, los paraguas no te protegen de la lluvia.
35. Si me votas, entonces te hago feliz. Me votas. / ¿Te hago feliz?
36. Cualquiera que no lllore, ríe. / Todos lloran o ríen.
37. Yo no soy un melindro. / Luego hay algo que yo no soy.
38. Si me votas, entonces te hago feliz. Me votas y te machaco. / ¿Te hago feliz?
39. Los conejos roen. / Algo roe.
40. Lloró desconsoladamente. / Qué pena.
41. Estamos en Otoño. / Las hojas caen.
42. Estamos en Otoño. / No estamos en verano.
43. Todos lloran o ríen. / Lloro o río.
44. Lloró desconsoladamente. / Lloró.
45. Esto es un cuadrado. / Esto tiene más de tres lados.
46. Todos quieren a alguien. / ¿Todos son queridos?
47. Soy vecino de Rita. Si Rita es mi vecina, está harta de mí. / ¿Está Rita harta de mí?
48. Todos lloran o ríen. / Todos lloran o todos ríen.
49. Soy vecino de Rita. Si soy vecino de alguien, le respeto. / ¿Respeto a Rita?
50. Todos lloran o ríen. / Creo que todos lloran o algunos ríen.
51. Soy infeliz. Cuando como soy feliz. / No como.
52. Si soy grande, te gano. Soy fuerte. / Te gano.

53. Si soy grande, te gano. Somos grandes. / Te gano.
54. Si soy débil, no puedo ir. Soy vieja. / No puedo ir.
55. Si no soy culpable, iré a la cárcel. Soy inocente. / Iré a la cárcel.
56. Carolina es pequeña y musculosa. Si Carolina es fuerte, te adelanta. / Carolina te adelanta.
57. Petra es pequeña y musculosa. Petra es débil o Petra es fuerte. / Petra es fuerte.
58. Soy culpable o voy a la cárcel. Soy inocente. / No voy a la cárcel.
59. No soy culpable. Soy inocente o el vecino me sonrío. / El vecino me sonrío.
60. Cuando llueve, presvía. Cuando no llueve, presvía. / ¿Presvía?

Referencias Bibliográficas

- Álvarez Merino, P., Requena Hernández, C., & Salto Alemany, F. (2016). La integración más que la edad influye en el rendimiento del razonamiento deductivo. *International Journal of Developmental and Educational Psychology. Revista INFAD de Psicología*, 1(2), 221. doi: <https://doi.org/10.17060/ijodaep.2016.n2.v1.569>.
- Auné, S. E., Abal, F. J. P., & Attorresi, H. F. (2016). Diseño y Construcción de una Escala de Conducta Prosocial para Adultos. *Revista Iberoamericana de Diagnóstico y Evaluación - e Avaliação Psicológica*, 42(2), 15–25. doi: https://doi.org/10.21865/RIDEP42_15.
- Baggio, G., Choma, T., van Lambalgen, M., & Hagoort, P. (2010). Coercion and Compositionality. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(9), 2131–2140. doi: <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21303>.
- Baggio, G., Van Lambalgen, Mi., & Hagoort, P. (2012). The processing consequences of compositionality. In *The Oxford handbook of compositionality* (pp. 655–672). New York: Oxford University Press.

- Blackburn, P., van Benthem, J., & Wolter, F. (2006). *Handbook of modal logic*. (D. Gabbay, P. Gardenfors, J. Siekmann, J. Van Benthem, M. Vardi, & J. Woods, Eds.) (1st ed., Vol. 3). Amsterdam: Elsevier.
- Braine, M., & O'Brien, D. (1998). *Mental logic*. (M. Braine & D. O'Brien, Eds.). New Jersey: Psychology press.
- Bulger, S., & Housner, L. (2007). Modified Delphi Investigation of Exercise Science in Physical Education Teacher Education. *Journal of Teaching in Physical Education*, 26(1), 57–80. doi: <https://doi.org/10.1123/jtpe.26.1.57>.
- Byrne, R., & Johnson-Laird, P. (2009). 'If' and the problems of conditional reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(7), 282–287. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2009.04.003>.
- Costantini, M., Committeri, G., & Sinigaglia, C. (2011). Ready Both to Your and to My Hands: Mapping the Action Space of Others. *PLoS ONE*, 6(4), e17923. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017923>.
- Engel, P., & Kochan, M. (1991). *The norm of truth: An introduction to the philosophy of logic*. Toronto: University of Toronto Press.
- Evans, J. (1993). Photosynthetic Acclimation and Nitrogen Partitioning Within a Lucerne Canopy. II. Stability Through Time and Comparison With a Theoretical Optimum. *Functional Plant Biology*, 20(1), 69. doi: <https://doi.org/10.1071/PP9930069>.
- Evans, J. (2008). Dual-Processing Accounts of Reasoning, Judgment, and Social Cognition. *Annual Review of Psychology*, 59(1), 255–278. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093629>.
- Evans, J. St., Thompson, V., & Over, D. (2015). Uncertain deduction and conditional reasoning. *Frontiers in Psychology*, 6. doi: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00398>.

- Evans, P. (2012). *Embedded autonomy: States and industrial transformation*. *Embedded Autonomy: States and Industrial Transformation*. Princeton, New Jersey.
- Frege, G. (1967). *The basic laws of arithmetic: Exposition of the system*. (M. Furth, Ed.). Los Angeles: Univ of California Press.
- Gabbay, D. (2002). *Handbook of the Logic of Argument and Inference: The turn towards the practical*. Jerusalem.
- Gutiérrez, F., García-Madruga, J., Johnson-Laird, P., & Carriero, N. (2002). Reasoning with multiple conditionals: A test of the mental model theory. *Anuario de Psicología*, 33(1), 3–24.
- Hahn, U., & Oaksford, M. (2007). The rationality of informal argumentation: A Bayesian approach to reasoning fallacies. *Psychological Review*, 114(3), 704–732. doi: <https://doi.org/10.1037/0033-295X.114.3.704>.
- Hanna, R. (2008). Kantian non-conceptualism. *Philosophical Studies*, 137(1), 41–64. doi: <https://doi.org/10.1007/s11098-007-9166-0>.
- Heath, G. (2017). *The self and communicative theory*. London: Routledge.
- Heit, E., & Rotello, C. (2010). Relations between inductive reasoning and deductive reasoning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36(3), 805–812. doi: <https://doi.org/10.1037/a0018784>.
- Henle, M. (1962). On the relation between logic and thinking. *Psychological Review*, 69(4), 366–378. doi: <https://doi.org/10.1037/h0042043>.
- Hinterecker, T., Knauff, M., & Johnson-Laird, P. (2016). Modality, probability, and mental models. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 42(10), 1606–1620. doi: <https://doi.org/10.1037/xlm0000255>.

- Houdé, O., & Borst, G. (2015). Evidence for an inhibitory-control theory of the reasoning brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. doi: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00148>.
- Johnson-Laird, P. (2012). Inference with mental models. In K. Holyoak & R. Morrison (Eds.), *The Oxford handbook of thinking and reasoning* (pp. 134–145). New York.
- Johnson-Laird, P. (2010). Mental models and human reasoning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(43), 18243–18250. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1012933107>.
- Johnson-Laird, P. (2006). *How we reason*. New York: Oxford University Press, USA.
- Johnson-Laird, P. (2008). Mental models and deductive reasoning. In J. Adler & L. Rips (Eds.), *Reasoning: studies in human inference and its foundations* (pp. 206–222). New York: Cambridge University Press.
- Johnson-Laird, P., & Byrne, R. (1991). *Essays in cognitive psychology. Deduction*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Johnson-Laird, P., & Khemlani, S. (2013). Toward a Unified Theory of Reasoning. In *Psychology of learning and motivation* (Vol. 59, pp. 1–42). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407187-2.00001-0>.
- Johnson-Laird, P., Khemlani, S., & Goodwin, G. (2015). Logic, probability, and human reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(4), 201–214. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.02.006>.
- López Fernández, V. (2012). *Efecto de las prácticas de ocio en las funciones cognitivas y la localización de fuentes electroencefalográficas (EEG) en personas mayores* (Tesis Doctoral). Universidad de León.
- Luengo, M. Á., Otero, J. M., Romero, E., Gómez-Fraguela, J. A., & Tavares-Filho, E. T. (1999). Análisis de ítems para la evaluación de la conducta antisocial: un estudio

transcultural. *Revista Iberoamericana de Diagnóstico y Evaluación Psicológica*, 1, 21–36.

Montague, R. (1970). Pragmatics and intensional logic. *Dialectica*, 24(4), 277–302. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1746-8361.1970.tb01220.x>.

Monti, M., & Osherson, D. (2012). Logic, language and the brain. *Brain Research*, 1428(Januray), 33–42. doi: <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2011.05.061>.

Moriyama, I. (1968). Problems in the measurement of health status. *Indicators of Social Change*, 573–600.

Pfeifer, N., & Kleiter, G. (2010). The conditional in mental probability logic. In M. Oaksford & N. Chater (Eds.), *Cognition and conditionals: Probability and logic in human thinking* (pp. 153–173). New York: Oxford University Press Oxford.

Piaget, J., & Inhelder, B. (2013). *The growth of logical thinking from childhood to adolescence: An essay on the construction of formal operational structures*. Oxon: Routledge.

Reverberi, C., Görgen, K., & Haynes, J.-D. (2012). Compositionality of Rule Representations in Human Prefrontal Cortex. *Cerebral Cortex*, 22(6), 1237–1246. doi: <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr200>.

Rips, L. (2001). Two Kinds of Reasoning. *Psychological Science*, 12(2), 129–134. doi: <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00322>.

Rotello, C., & Heit, E. (2009). Modeling the effects of argument length and validity on inductive and deductive reasoning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35(5), 1317–1330. doi: <https://doi.org/10.1037/a0016648>.

Schaeken, W., Vandierendonck, A., Schroyens, W., & D’Ydewalle, G. (2008). *The mental models theory of reasoning: Refinements and extensions*. (W. Schaeken, A. Vandierendonck, W. Schroyens, & G. D’Ydewalle, Eds.). Mahwah, New Jersey: Psychology Press.

- Schechter, J. (2013). Deductive reasoning. *The Encyclopedia of the Mind*. San Diego: Sage Publication Inc.
- Singmann, H., Klauer, K. C., & Beller, S. (2016). Probabilistic conditional reasoning: Disentangling form and content with the dual-source model. *Cognitive Psychology*, 88, 61–87. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2016.06.005>.
- Skovgaard-Olsen, N., Singmann, H., & Klauer, K. C. (2016). The relevance effect and conditionals. *Cognition*, 150, 26–36. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.12.017>.
- Slovic, P., Finucane, M., Peters, E., & MacGregor, D. (2007). The affect heuristic. *European Journal of Operational Research*, 177(3), 1333–1352. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.04.006>.
- Stenning, K., & Van Lambalgen, M. (2012). *Human reasoning and cognitive science*. (K. Stenning & M. Van Lambalgen, Eds.). London: MIT Press.
- Stupple, E., Ball, L., Evans, J., & Kamal-Smith, E. (2011). When logic and belief collide: Individual differences in reasoning times support a selective processing model. *Journal of Cognitive Psychology*, 23(8), 931–941. doi: <https://doi.org/10.1080/20445911.2011.589381>.
- Tait, W. (2005). *The provenance of pure reason: Essays in the philosophy of mathematics and its history*. (T. William, Ed.). New York: Oxford University Press, USA.
- Tenenbaum, J., Griffiths, T., & Kemp, C. (2006). Theory-based Bayesian models of inductive learning and reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(7), 309–318. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.05.009>.
- Texier, G., Pellegrin, L., Vignal, C., Meynard, J.-B., Deparis, X., & Chaudet, H. (2017). Dealing with uncertainty when using a surveillance system. *International Journal of Medical Informatics*, 104, 65–73. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2017.05.006>.

Thompson, V., & Johnson, S. (2014). Conflict, metacognition, and analytic thinking. *Thinking & Reasoning*, 20(2), 215–244. doi: <https://doi.org/10.1080/13546783.2013.869763>.

Van Heijenoort, J. (1967). *From Frege to Gödel: a source book in mathematical logic, 1879-1932*. London: Harvard University Press.

Wason, P. (1966). Reasoning. In B. Foss (Ed.) (pp. 135–151). Harmondsworth: Penguin Books.

Wiersma, L. (2001). Conceptualization and Development of the Sources of Enjoyment in Youth Sport Questionnaire. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 5(3), 153–177. doi: https://doi.org/10.1207/S15327841MPEE0503_3.

Wilhelm, O. (2005). Measuring Reasoning Ability. In *Handbook of Understanding and Measuring Intelligence* (pp. 373–392). 2455 Teller Road, Thousand Oaks California 91320 United States: SAGE Publications, Inc. doi: <https://doi.org/10.4135/9781452233529.n21>.

5.2. Estudio 2. Localización cerebral del procesamiento semántico.

Estudio 2

Localización cerebral del procesamiento semántico

A continuación, se presenta una réplica exacta del contenido completo que conforma el manuscrito publicado en Revista de Neurología como Álvarez-Merino, P., Requena, C., & Salto, F. (2019). Localización cerebral del procesamiento semántico. Revista de Neurología, 69(1), 1-10. <https://doi.org/10.33588/rn.6901.2018458>

Localización cerebral del procesamiento semántico

Paula Álvarez Merino¹, Carmen Requena ¹, Francisco Salto ¹

1. Cátedra de Envejecimiento en todas las Edades, Facultad de Educación. Universidad de León.

Resumen

Introducción. El procesamiento del contenido semántico se asocia potencial N400 y la P600 se vincula con el procesamiento de reglas sintácticas y gramaticales.

Objetivo. La investigación pretende verificar si el procesamiento semántico de estímulos visuales complejos como la repetición, identidad, orden y doble incongruencia, es recursivo o computable. **Método.** 27 universitarios respondieron a un paradigma adaptado N400 con 5 condiciones con 80 tareas mientras se registraba su actividad cerebral con gorro Special Order Cap de 64 electrodos. **Resultados.** Dos ventanas temporales de 400 a 550 ms y de 550 a 800 ms fueron analizadas mediante un contraste ANOVA del factor condición por ROI. Además, se calculó la solución inversa de las ventanas mediante low-resolution electromagnetic tomography (Loreta) para identificar las fuentes corticales subyacentes a los potenciales eléctricos. Se corroboran diferencias significativas ($p < 0.05$) en los potenciales N400 y P600 en áreas frontales y centroparietales asociadas a los operadores lógicos estudiados. **Conclusión.** Se confirma que el procesamiento cerebral de imágenes complejas (congruentes/incongruentes) es modulado por la repetición, identidad y orden, pero no por la negación. Por consiguiente, se puede decir que el procesamiento semántico de imágenes complejas es semicomputable.

Palabras clave

N400, P600, EEG, operadores lógicos, recursivo, composicional.

Abstract

Introduction. Semantic content processing is associated with the potential N400, and the P600 is linked with the processing of syntactic and grammatical rules.

Objective. The research aims to verify whether the semantic processing of complex visual stimuli such as repetition, identity, order and double incongruence is recursive or computable. **Method.** 27 university students responded to an adapted N400 paradigm with 5 conditions, each with 80 tasks, while recording their brain activity with a 64-channel cap. **Results.** Two temporal windows of 400 to 550 ms and 550 to

800 ms were analyzed using an ANOVA contrast of the condition factor by ROI. In addition, the inverse solution of the windows was calculated by low resolution electromagnetic tomography (Loreta) to identify the main sources related to the electrical power. The significant differences ($p < 0.05$) in the results for the N400 and P600 in frontal and centroparietal areas in the logical operators studied are corroborated. **Conclusion.** It is confirmed that the brain processing of complex images is modulated by repetition, identity and order, but not by negation. Therefore, it can be said that the semantic processing of complex images is semi-computable.

Keywords

N400, P600, EEG, logical operators, recursive, compositional.

Introducción

Una tarea cognitiva se soluciona composicionalmente si es reducible a alguna secuencia ordenada de tareas más simples (Del Pinal, 2015). La computación recursiva que soluciona tareas semánticas, deductivas, aritméticas o gramaticales es un caso típico de tarea composicional. Recientemente se ha encontrado composicionalidad en el procesamiento neural de reglas complejas (Giosuè Baggio et al., 2016; Reverberi, Görden, & Haynes, 2012a) y la noción misma de composicionalidad ha sido sometida a escrutinio conceptual y matemático (Mikolov, Sutskever, Chen, Corrado, & Dean, 2013), comprobando que los sistemas biológicos restringen severamente la composicionalidad (Giosuè Baggio et al., 2016). Por otra parte, sin embargo, los significados complejos se calculan naturalmente a partir de sus componentes (Werning, Hinzen, & Machery, 2012).

El procesamiento semántico se ha asociado al potencial N400 a la vez que la P600 se ha vinculado al procesamiento de reglas sintácticas como, por ejemplo: “La tortuga tiene 4 pata” (Kutas & Federmeier, 2011). Estudios recientes han puesto de manifiesto la presencia del efecto P600 en el procesamiento de anomalías semánticas como “El

hombre mordió al perro”, acompañadas en ocasiones de inflexión gramatical (Van de Meerendonk, Kolk, Vissers, & Chwilla, 2010). Esta elicitación del potencial P600 se explica mediante la hipótesis (Ferreira, 2003) del doble procesamiento. En la literatura, la congruencia/incongruencia semántica entre estímulos está inversamente relacionada con la amplitud de N400 con independencia de la modalidad del contexto y se acompaña de forma estable con actividad negativa en la zona centro-parietal aproximadamente entre los 300 y 500 milisegundos (ms.) (Kutas & Federmeier, 2011). La congruencia/incongruencia del procesamiento sintáctico o semántico se asocia al potencial P600 distribuido en el área centro-parietal que se inicia alrededor de los 500 ms y se extiende al menos hasta los 800 ms (Van Herten, Kolk, & Chwilla, 2005).

Según el modelo clásico (Kutas & Federmeier, 2011), la memoria y la integración son los ingredientes esenciales para explicar y predecir los efectos del procesamiento semántico cerebral de información conocida, ya que sus diferencias de amplitud en el potencial N400 son moduladas por el grado en que las funciones de información entrantes son congruentes con las expectativas previamente pre-activadas. En consistencia con las representaciones ya almacenadas (memoria) o en convergencia con representaciones ya disponibles (integración), se explican las propiedades esenciales de los efectos del procesamiento semántico (Lau, Holcomb, & Kuperberg, 2013). El modelo Memory-Unification-Control (MUC) incorpora el procesamiento de información nueva mediante la unificación (Hagoort, 2016) de carácter constructivo y no sólo memorístico, por lo que en el procesamiento de nueva información se evoca tanto el potencial N400 como P600 de modo cíclico entre la corteza temporal y frontal.

Es crucial distinguir conceptualmente entre la complejidad del procesamiento neural y la complejidad semántica de los estímulos visuales o lingüísticos. En el estado actual de conocimientos no disponemos de una magnitud cuantitativa de complejidad neural, pero sí conocemos que el procesamiento implica cambios en la amplitud, conectividad, extensión y duración de los fenómenos neuroeléctricos (Proal, Alvarez-Segura, de la Iglesia-Vayá, Martí-Bonmatí, & Castellanos, 2011). Los operadores que nos permiten apreciar cambios de complejidad estimular no son arbitrarios, sino que

son precisamente aquellos cuya presencia o ausencia asegura el carácter composicional y computacional del complejo de estímulos. La repetición, la identidad, el orden y la negación son los cuatro operadores que nos interesa estudiar en el caso de complejos estímulares para verificar (o refutar) si son o no compuestos computables.

Repetición

Kutas y Federmeier (2011) comprobaron el efecto de la repetición de estímulos en la modulación de la N400. Aunque no es habitual distinguir entre las nociones de repetición e identidad, en este estudio se pretenden esclarecer diferencias sutiles desde el punto de vista cerebral, psicológico y semántico. Hablamos de repetición de estímulos cuando se ejemplifican en distintas ocasiones los mismos tipos o categorías, sin que se represente la identidad numérica de cada estímulo. Por ejemplo, estímulos homófonos muestran efectos N400 debidos a su repetición o reiteración, como también pseudopalabras pueden ser repetidas dando lugar a efectos N400 (2011). En la repetición la cantidad exacta de repeticiones no es esencial para provocar la anticipación temporal (Renoult, Wang, Calcagno, Prévost, & Debrulle, 2012; Segaeert, Weber, de Lange, Petersson, & Hagoort, 2013) y la disminución de amplitud de N400 (Lau et al., 2013).

Identidad

Aunque desconocemos cómo el cerebro procesa la función de identidad, distinguimos entre la repetición, que no representa un número determinado de estímulos, y la identidad, que presupone la unicidad de eventos cerebrales que son casos de un mismo tipo o categoría. Desde la perspectiva de la unificación defendida por Hagoort (Hagoort, 2016), la computación neural de la identidad requiere de un proceso complejo que cerebralmente explica el retardo temporal y los cambios en la amplitud de la N400. Desde esta perspectiva, las representaciones de identidad son el resultado de un proceso de unificación, basado en circuitos conectivos cerebrales que son un proceso de ida y vuelta (Hagoort, 2016) en el que se reconoce la misma representación en eventos neurales distintos. Por ejemplo, en el caso del lenguaje verbal, comprender expresiones sinónimas de idiomas distintos que dicen lo mismo.

Así entendida, la identidad es un fenómeno que tiene lugar a nivel proposicional, a diferencia de la repetición, que tiene lugar a nivel fonológico o léxico (Friederici & Gierhan, 2013; Skeide & Friederici, 2016). Esta concepción de la identidad ha sido parcialmente confirmada en experimentos desarrollados por Reverberi, Görden, & Haynes (2012).

Orden

El orden de los estímulos es una forma elemental de complejidad. Aunque la literatura (Famoyegun, 2012; Kutas & Federmeier, 2011) ofrece ejemplos de cambios de orden que no producen ninguna alteración en N400 ("el bigote y la barba" / "la barba y el bigote"), se hace necesario realizar investigaciones más exhaustivas sobre la importancia del orden en el procesamiento de estímulos. Mientras el orden de estímulos en el tiempo determina una dirección, el orden en el espacio bidimensional determina una dirección o su inversa. Por ejemplo, la secuencia espacial A, B puede procesarse en dirección inversa B, A. Invertir una secuencia finita es una tarea claramente computable y los casos más simples de orden de estímulos conciernen a pares de estímulos cuyo orden no presupone una dirección específica. Por otra parte, existen la literatura evidencias neurales de la estrecha conexión entre el razonamiento espacial y el razonamiento relacional (Markus Knauff, 2013).

Negación

En contraste con la identidad y la repetición, la negación parece no producir efectos en la amplitud N400 en el procesamiento semántico de estímulos lingüísticos (Kutas & Federmeier, 2011; Xiang, Grove, & Giannakidou, 2016). Estudios recientes sobre la negación y la contradicción acreditan una activación retardada N400 debido a la falta de concordancia en el procesamiento sintáctico. De hecho, algunos investigadores han identificado un potencial evocado positivo específico P600 para este procesamiento (Tian & Breheny, 2016). La incongruencia, a diferencia de la negación, sí modula típicamente la N400 y aunque la palabra "incongruente" es la negación de "congruente", la incongruencia neural no está demostrado que se comporte como una negación, puesto que se desconoce si una doble incongruencia es un tipo de congruencia (en contraste con la doble negación, que afirma).

Computabilidad

Que el cerebro en ocasiones compute puede tomarse como una metáfora más o menos feliz. También puede entenderse como una hipótesis refutable o verificable en términos de operadores concretos como los arriba indicados, planteando si existe o no evidencia experimental de que tales operadores se realicen en operaciones neurales reales. Dado que en el estado actual de la neurociencia no se conocen correlaciones sistemáticas entre la complejidad neural y estimular, este estudio toma los operadores definidos arriba, que se corresponden con operaciones computables, para verificar si su procesamiento neural es recursivo. El procedimiento es análogo al desarrollado en la literatura reciente para el análisis de los correlatos neurales de las conectivas lógicas (“y”, “o”) (Baggio et al., 2016).

Mientras que un proceso computable es un procedimiento recursivo para responder afirmativa o negativamente una cuestión, un proceso es semicomputable si sólo responde afirmativamente o no responde (ver (Boolos, Burgess, & Jeffrey, 2002) para una definición matemáticamente precisa). En un contexto de información visual no existen recursos explícitos para representar negación, por lo que los operadores cuyo procesamiento estudiamos como máximo exhibirán indicios de semicomputabilidad en lugar de computabilidad.

A partir de estudios que relacionan los potenciales N400 y P600 con tareas de procesamiento semántico, el objetivo de esta investigación trata de explorar si el procesamiento de estímulos visuales complejos es computable. Entendemos por estímulo complejo el formado por dos imágenes que se presentan a la vez, lo que contrasta con el protocolo clásico N400 donde el estímulo se compone de una única imagen o palabra. Esto es, para explorar si el procesamiento es computable se requiere al menos de tres elementos que nos permitan hacer distintas combinaciones en las que se incluyan los elementos de repetición, identidad, orden y negación.

Materiales y Métodos

Participantes

Veintisiete universitarios de León de 21 a 25 años (media 23.43 años \pm 2.10) participaron en un estudio (16 mujeres y 11 hombres) por el que fueron recompensados con un crédito académico. Todos los sujetos eran diestros y con visión normal (o corregida). Ninguno de los participantes padecía enfermedad psiquiátrica o neurológica ni se encontraba en un estado de estrés (exámenes, entrevistas de trabajo, etc.). La investigación fue aprobada por el Comité Ético del Hospital Universitario de León. Todos los participantes firmaron el consentimiento informado antes de realizar la evaluación.

Estímulos

Los estímulos que conforman el contexto y el estímulo complejo se corresponden con imágenes de cuatro categorías: farmacia, zoológico, cocina y panadería; que se instancian en 80 tareas cada una (Tabla 5.2.a). En particular, se conforman cinco condiciones en base a la relación de congruencia/incongruencia entre el contexto y el estímulo complejo. Los inputs cerebrales correspondientes a tales combinaciones se corresponden con los operadores objeto de estudio:

- En la condición 1 se examina el operador de repetición, por lo que las tareas se componen de un contexto congruente con el par de imágenes del estímulo complejo que también son congruentes entre sí.
- Las condiciones 2 y 3 se emplean para examinar el operador de orden. Las tareas de cada condición se diferencian en el orden que ocupa la imagen incongruente (respecto del contexto) en el par de imágenes que conforma el estímulo complejo.
- La condición 4 se utiliza para indagar el operador de identidad en contraste con la repetición. Entre las imágenes que forman el estímulo complejo se incluyen imágenes exactamente iguales o con alteraciones irrelevantes.

- La condición 5 es adecuada para examinar si la doble incongruencia se comporta o no como una nueva incongruencia, o por el contrario la doble incongruencia es congruente y se comporta como la condición 1. El contexto es incongruente respecto del par de imágenes del estímulo complejo, que a su vez son incongruentes entre sí.

Se instruyó a los sujetos para responder de forma obligatoria pulsando la tecla “C” cuando las imágenes del estímulo complejo son congruentes con el contexto”, “pulsar la tecla “I” cuando las imágenes del estímulo complejo son incongruentes con el contexto” y pulsar “barra espaciadora” cuando hay relación de congruencia/incongruencia entre el contexto y el estímulo complejo. Obsérvese que la respuesta conductual tiene por objeto mantener la atención del sujeto.

Tabla 5.2. a
Ejemplos de presentación de las condiciones de estudio.

Condiciones	Ejemplo
<p>Condición 1. Repetición.</p> <p>Relación de congruencia entre contexto y cada imagen del estímulo complejo.</p>	
<p>Condición 2. Orden.</p> <p>Relación de Congruencia/Incongruencia entre el contexto y la primera imagen del estímulo complejo.</p>	
<p>Condición 3. Orden.</p> <p>Relación de Congruencia/Incongruencia entre el contexto y la segunda imagen del estímulo complejo.</p>	
<p>Condición 4. Identidad.</p> <p>Relación de congruencia entre el contexto y el par de imágenes del estímulo complejo.</p>	
<p>Condición 5. Doble incongruencia (Negación).</p> <p>Relación de incongruencia entre el contexto y el par de imágenes, así como entre ellas.</p>	

Procedimiento

El paradigma experimental se distribuyó según se muestra en la carta de tiempo (ver Figura 5.2.a).

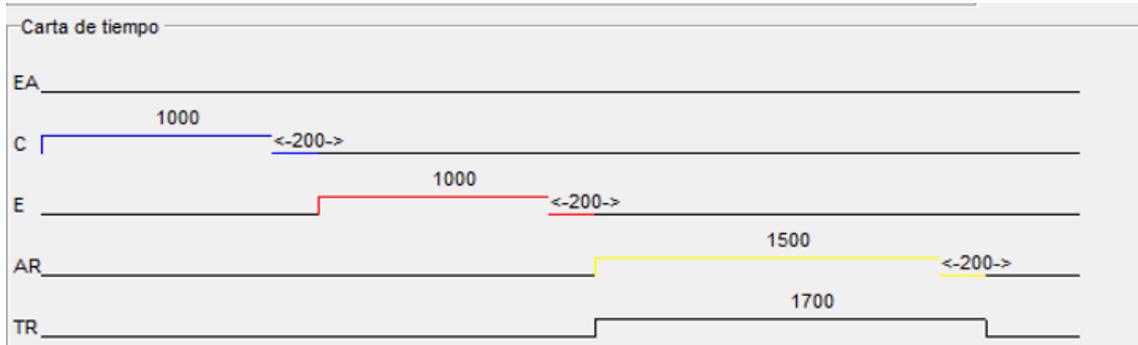


Figura 5.2. a. Carta de Tiempo. EA: Aviso de inicio del ensayo; C: Presentación del contexto; E: Presentación del estímulo complejo; AR: Aviso de respuesta; TR: Tiempo de respuesta. Figura realizada con software Estimulador Cognitivo N_P—SW 1.3/ v.2.1.0.0 (Neuronic, SA Cuba).

Los sujetos recibieron entrenamiento antes de la fase experimental para garantizar la comprensión de los ensayos. Las tareas se presentaron a través del software Estimulador Cognitivo N_P—SW 1.3/ v. 2.1.0.0 (Neuronic, SA Cuba) en un monitor NEC de 23 pulgadas. Se pidió a los sujetos que minimizaran su parpadeo, así como los movimientos posturales. Ningún material utilizado en la fase de entrenamiento se utilizó en la fase experimental.

La duración total de la prueba fue aproximadamente de 1 hora: 20 minutos para la colocación del gorro y preparación del electroencefalograma (EEG), 10 minutos de entrenamiento y 30 minutos de registro del protocolo experimental.

Análisis y registro de EEG

El EEG se registró con un amplificador IC de 64 canales (Neuronic, SA Cuba) compuesto por: Unidad de Control Modelo ND001M / N° Serie: 09AND001M-032 (Neuronic, SA Cuba), Bloque de Amplificadores Modelo ND1400 / N° Serie: 09AND1400-003 (Neuronic, SA Cuba) y un software para Registro de Psicofisiología N_P-SW 1.1/ v. 3.0.1.0 (Neuronic, SA Cuba). El registro se realizó con un gorro Special

Order Cap con electrodos Ag/AgCl (<https://electro-cap.com/index.cfm/caps/#special>)

Los datos se obtuvieron utilizando una frecuencia de muestreo de 500 Hz, con una banda de frecuencia de 0.1 a 50 Hz.

Los electrodos de referencia se colocaron en los lóbulos de las orejas y se controló el electrooculograma (EOG) con la ubicación de tres pares de electrodos externos a fin de registrar el movimiento horizontal y vertical de los ojos. La impedancia de los electrodos de registro fue inferior a 5 K Ω . La señal del registro de EEG se controló visualmente, eliminando de forma directa una porción de los datos que contenían artefactos motores u oculares.

Para el análisis de datos en relación al pico de amplitud se cuantificó la ventana temporal entre 400 a 550 ms y 550 a 800 ms a partir de la aparición del estímulo complejo. Cinco de los registros fueron excluidos debido al exceso de artefactos.

Localización de fuentes

Los análisis de localización de fuentes se realizaron con Loreta (implementada en eLoreta) (Pascual-Marqui et al., 2011). Este método consiste en la obtención de una solución inversa capaz de analizar y distribuir en tres dimensiones los generadores neuronales asociados a corrientes eléctricas de medida (A/m²) generadas por el EEG para un total de 2.394 vóxels. El análisis de localización de fuentes se estimó a partir de los 64 electrodos situados en las áreas frontal, temporal, parietal, occipital con el Sistema Internacional 10-20. Se promedió la amplitud del potencial por sujeto y por condición en las ventanas temporales entre 400 y 550 ms y entre 550 y 800 ms. La localización anatómica de los generadores de la fuente se llevó a cabo por el sistema de localización de las áreas anatómicas de Broddman y por el Atlas probabilístico de Montreal de Collins, Neelin, Peters y Evans (1994).

Resultados

Los registros de EEG fueron tratados con el software Edición de EEG N_E-SW 1.2/ v. 7.1.4.1 (Neuronic, SA Cuba), el cálculo de los promedios por condición y sujeto, así

como los grandes promedios por condición se realizaron con el software Análisis de Psicofisiología N_P-SW 1.2/ v. 3.0.3.0 (Neuronic, SA Cuba). Las diferencias entre condiciones fueron calculadas a través de una toolbox para Matlab R2016b desarrollada en nuestro laboratorio. Para las pruebas estadísticas se utilizó el software Neuronic Estadística N_P-SW 2.0/ v. 4.1.3.0 (Neuronic, SA Cuba). La localización de fuentes se realizó con el software eLoreta (Pascual-Marqui et al., 2011).

Datos de los potenciales evocados

Se promediaron al menos 50 ensayos y se corrigió la línea de base a 0 microvoltios (mv), suavizándose la señal a un promedio móvil de 7 (Software Edición de EEG/Análisis de Psicofisiología; Neuronic, SA, Cuba). Se seleccionaron las ventanas temporales entre 400 y 550 ms (ver Figura 5.2.b) y entre 550 y 800 ms (ver Figura 5.2.c), encontrándose el mayor nivel de significación en la ventana temporal más tardía. El análisis de los datos electrofisiológicos se realizó por regiones de interés (ROI, Region of interest). Esto se hizo promediando los electrodos FP1, FP2, F3, F4, F7, F8, FZ, F1, F2, AF3, AF4, FC5, FC6, FPZ, FCZ, F5, F6, FC3, FC4, FC1, FC2 para la región frontal, los electrodos P3, P4, PZ, P1, P2, P5, P6, PO7, PO8, POZ, PO3, PO4 para la región parietal, los electrodos T3, T4, T5, T6, TP7, TP8, TP9, TP10 para la región temporal, los electrodos O1, O2, OZ para la región occipital y los electrodos C3, C4, CZ, C5, C6, CPZ, CP1, CP2, CP3, CP4, C1, C2, CP5, CP6 para la región central.

Para calcular la distribución de normalidad de las variables se utilizó la prueba de Kolmogorov Smirnov con la corrección de Lilliefors, obteniendo un valor superior a $p > 0.05$ por lo que no se rechaza la hipótesis de normalidad de las variables. Se realiza, por tanto, un análisis de la varianza (ANOVA, Analysis of Variance) del factor condición para cada una de las ROIs. El estudio de las ROIs (frontal, parietal y central) y las condiciones, se realizó mediante el valor de la F de Fisher del ANOVA para las ventanas temporales de 400 a 550 ms y 550 a 800 ms. El estudio de las regiones de interés (temporal y occipital) y las condiciones, se calculó con la prueba robusta de igualdad de medias, dado que se rechaza la hipótesis previa de homocedasticidad de las varianzas entre las condiciones.

Los resultados de la ANOVA para la primera ventana temporal revelan diferencias significativas en las áreas frontal ($F(4,2830) = 7.086$; $p < 0.001$), parietal ($F(4,1615) = 13.362$; $p < 0.001$) y central ($F(4,1885) = 10.417$; $p < 0.001$). Para las áreas temporal y occipital se realizó la prueba robusta de igualdad de medias resultando ($W(4,1065) = 5.729$; $p < 0.001$) y ($W(4,391) = 3.368$; $p < 0.010$) respectivamente. Los resultados de la ANOVA para la segunda ventana temporal revelan diferencias significativas en las áreas frontal ($F(4,2830) = 12.985$; $p < 0.001$), parietal ($F(4,1615) = 25,472$; $p < 0.001$) y central ($F(4,1885) = 23.263$; $p < 0.001$). Para las áreas temporal y occipital se realizó la prueba robusta de igualdad de medias resultando ($W(4,1059) = 12.375$; $p < 0.001$) y ($W(4,381) = 6.437$; $p < 0.001$) respectivamente.

Los estudios post hoc se obtuvieron para intervalos temporales de 5 ms. Se muestra la media en el instante temporal por cada comparación de condiciones, aquellos instantes en los que la comparación es significativa valor $p < 0.05$. En la tabla 5.2.b se ilustra la relación entre las condiciones y la activación de los ROIs.

Tabla 5.2. b

Relación entre las condiciones y la activación de los ROIs

Condiciones	Ventana Temporal 400-550 ms				
	Frontal	Central	Parietal	Temporal	Occipital
1 vs. 4	*		*		*
5 vs. 1	*	*	*	*	*
2 vs. 3	*				
Ventana Temporal 550-800 ms					
4 vs. 1	*	*	*		*
5 vs. 1	*	*	*	*	*
2 vs. 3	*	*	*	*	*

*Significación a favor de la primera condición del par de condiciones.

Ventana Temporal de 400 a 550 ms.

En la comparación de las condiciones se muestran diferencias de amplitud entre los operadores de repetición e identidad, doble congruencia/incongruencia y orden, en las áreas occipital y parietal asociadas con el procesamiento perceptivo (ver Figura 5.2.b). Además, las diferencias significativas de amplitud en el área frontal se explica por el tipo de procesamiento semántico de los estímulos complejos en relación al contexto (Friederici & Gierhan, 2013) (ver Figura 5.2.b). En particular, esta morfología involucra un tipo de procesamiento formal que requiere la intervención de procesos de control atencional (Tirapu-Ustárriz, Muñoz-Céspedes, Pelegrín-Valero, & Albéniz-Ferreras, 2005).

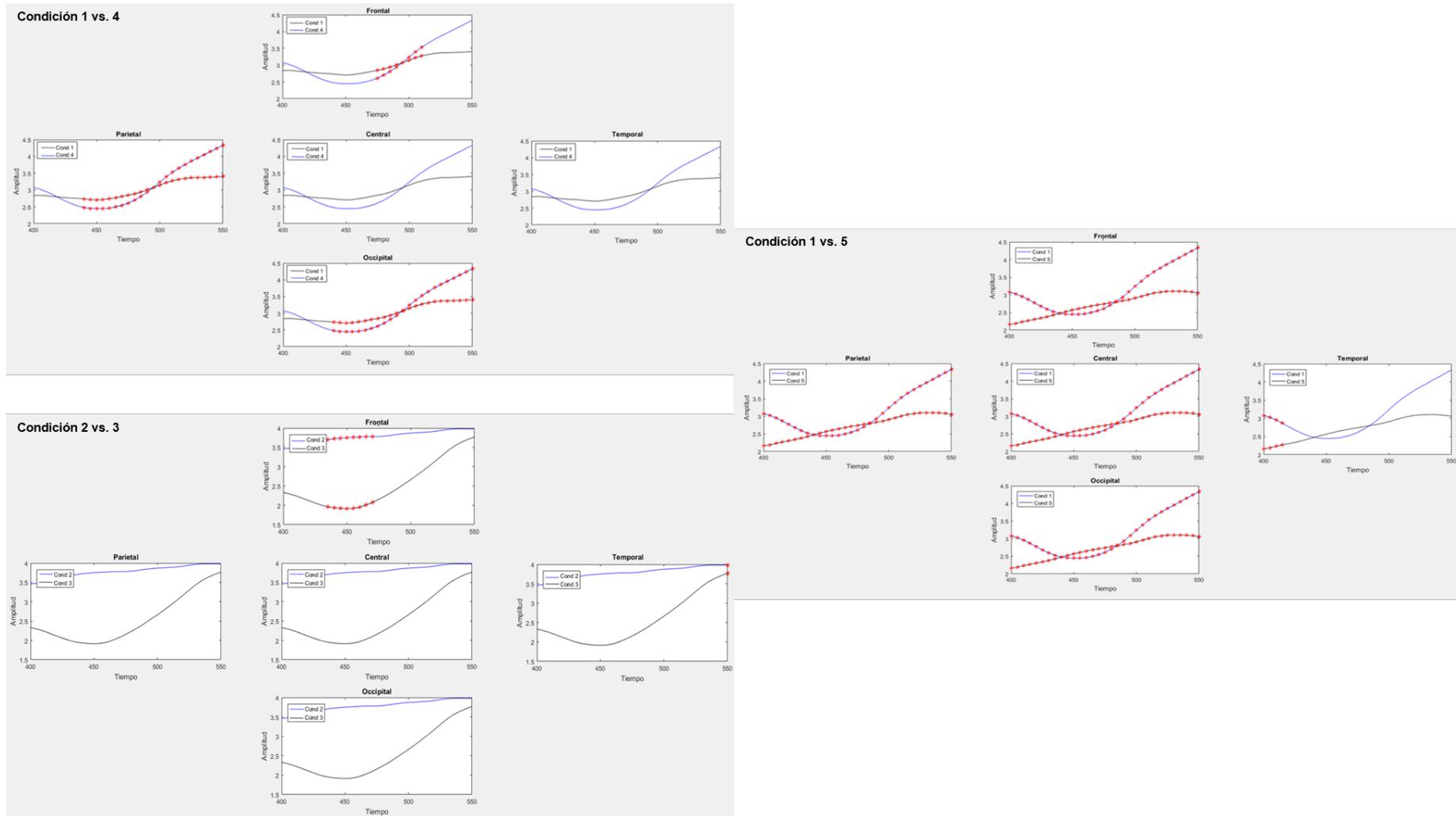


Figura 5.2. b. Comparación entre condiciones. Ventana temporal de 400 a 550 ms. Figura realizada con software Matlab R2016b.

Ventana Temporal de 550 a 800 ms.

Los análisis post hoc ponen de manifiesto diferencias significativas entre las condiciones 1 vs. 4 en todos los ROIs. No obstante, la significación en el área frontal es mayor en la identidad que en la repetición (ver Figura 5.2.c), resultados consistentes con el modelo MUC que prevé que en la identidad es un proceso constructivo en el que interviene un circuito cíclico entre la corteza temporal y frontal (Davey et al., 2015).

Por otro lado, las condiciones 1 vs. 5 muestran diferencias significativas que involucran a todas las áreas al igual que la comparación entre las condiciones 2 vs. 3 (ver Figura 5.2.c). La diferencia de activación en el área frontal en la doble congruencia/incongruencia y en el orden de la incongruencia implica que el tipo de procesamiento es formal (ver Figura 5.2.c). Estos resultados son consistentes con investigaciones que asocian la P600 con el procesamiento del significado basado en reglas (Van de Meerendonk et al., 2010).

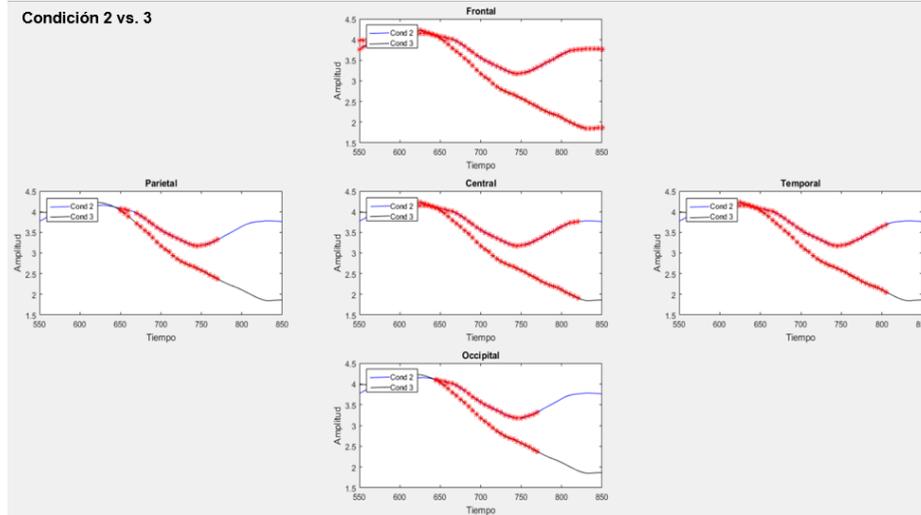
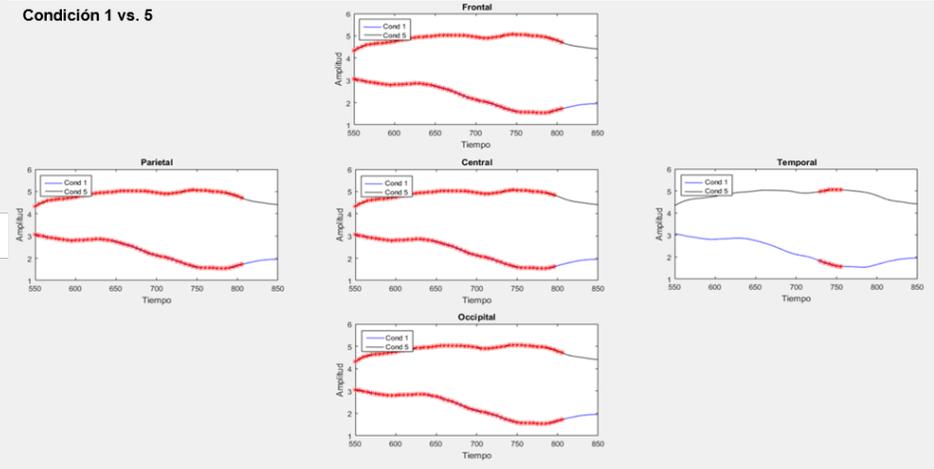
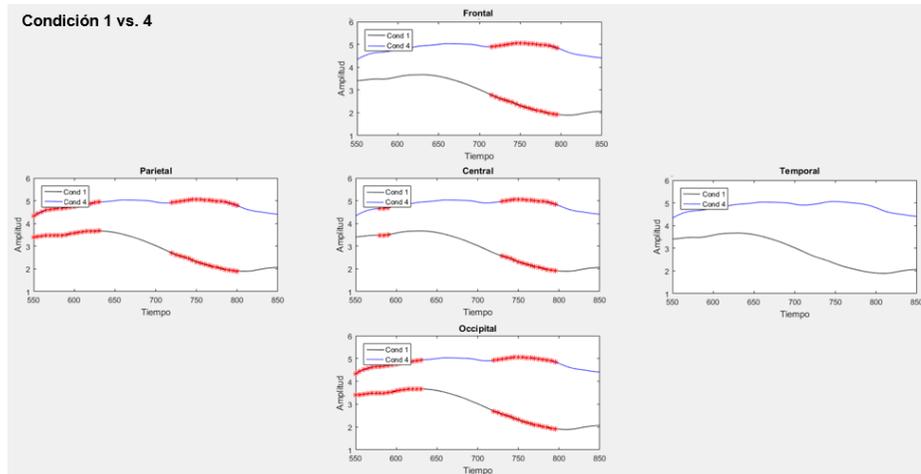


Figura 5.2. c. Comparación entre condiciones. Ventana temporal de 550 a 800 ms. Figura realizada con software Matlab R2016b.

Análisis de localización de fuentes eLoreta.

La solución inversa de las condiciones se realizó con el programa eLoreta. Los análisis descriptivos (ver Figura 5.2.d) ponen de manifiesto la presencia de activación en el giro frontal superior derecho y medial izquierdo en todas las condiciones. El giro temporal superior izquierdo se muestra activo en las condiciones 2 y 4. La implicación bilateral del área frontal en todas las condiciones nos lleva a inferir que tanto el contenido como la estructura formal intervienen en el procesamiento de los ensayos presentados.

El resultado de la ANOVA muestra diferencias significativas ($F(4,130) = 3.18; p < 0.05$). Los resultados post-hoc de las comparaciones 1 vs. 5, 1 vs. 4 y 2 vs. 3, se muestran en la Figura 5.2.d. En la Tabla 5.2.c se muestra la localización anatómica de los generadores de fuentes según el sistema de localización de las áreas anatómicas de Broddman y el Atlas probabilístico de Montreal (Collins et al., 1994).

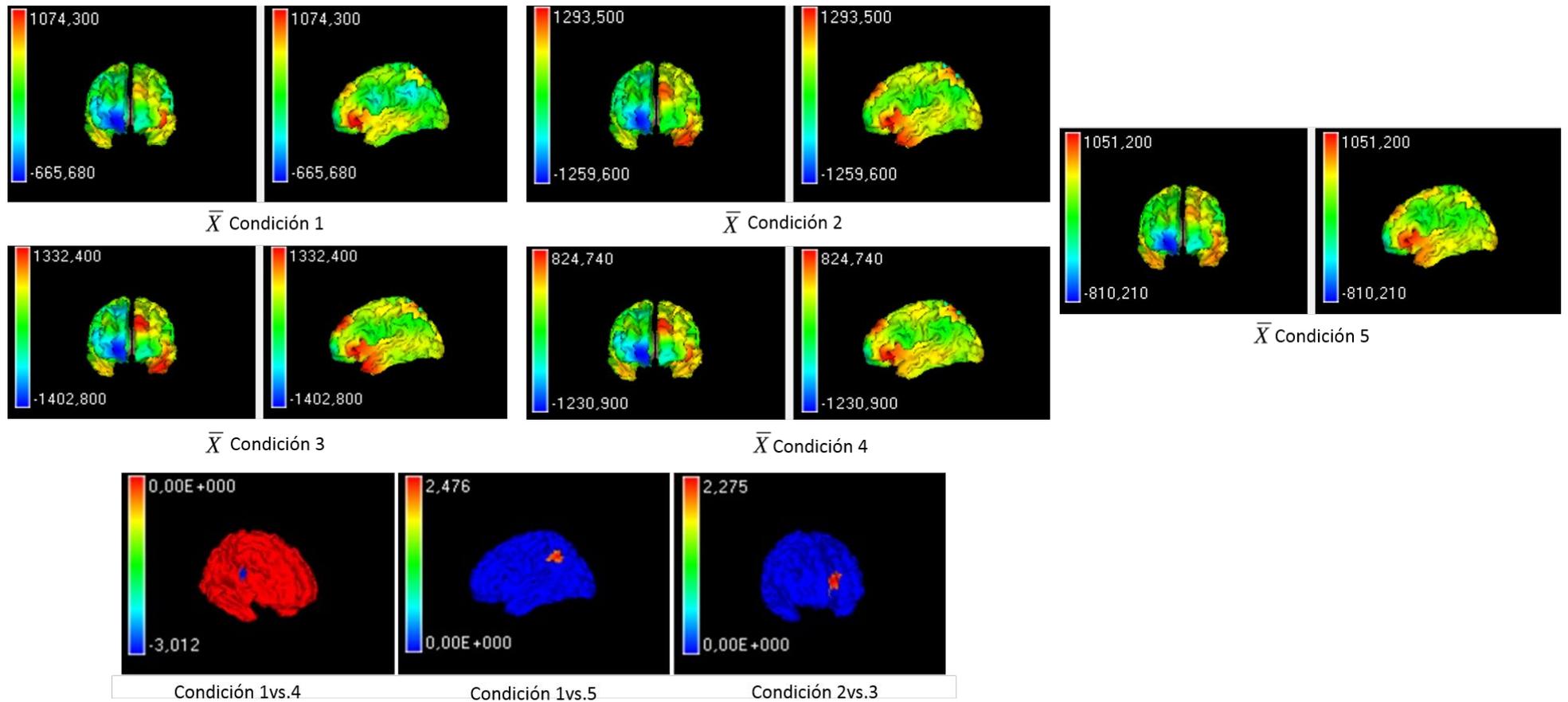


Figura 5.2. d. Análisis descriptivo y comparativo de localización de fuentes. Figura realizada con software Visualizador 3D N_I—SW -1/ v. 1.1.11.1 (Neuronic, SA Cuba).

Tabla 5.2. c

Datos comparativos de la localización de fuentes para las comparaciones.

Condición	p	Nivel de Activación	Áreas de Activación ATLAS	Theo.univ	X	Y	Z
1 vs 4	0.05	1 > 4	Giro frontal inferior derecho.	-3.01	33.08	97.46	73.21
1 vs 5	0.05	5 > 1	Giro angular izquierdo.	2.47	141.10	113.93	142.94
2 vs 3	0.05	2 > 3	Región cingulada anterior izquierda.	2.27	101.40	87.85	49.99
			Giro frontal medial izquierdo	2.22	95.898	90.572	37.904

X, Y, Z: Coordenadas correspondientes con los ejes espaciales entre las condiciones.

Discusión

Hasta donde sabemos, este es el primer estudio que explora si hay composicionalidad en el procesamiento semántico de estímulos visuales complejos. Los resultados de la investigación evidencian una onda N400 y una onda P600 asociadas al procesamiento semántico (Maess, Herrmann, Hahne, Nakamura, & Friederici, 2006; Proal, Alvarez-Segura, de la Iglesia-Vayá, Martí-Bonmatí, & Castellanos, 2011) de la doble congruencia vs. doble incongruencia (condiciones 1 vs. 5), al orden de colocación de la incongruencia en el estímulo complejo (condiciones 2 vs. 3), a la repetición y a la identidad (1 vs. 4) de las imágenes que conforman el estímulo complejo del protocolo del estudio.

Por otro lado, los resultados revelan que la doble incongruencia no se procesa como una negación. Esto es, mientras que la negación de la negación afirma, la incongruencia de la incongruencia no es congruente.

Ventana Temporal de 400 a 550 ms.

La comparación entre las condiciones 1 vs. 5 revela mayor amplitud de onda en la condición 5 (ver Figura 5.2.b) asociada al número de incongruencias acumuladas entre contexto y par de imágenes que conforman el estímulo complejo. En este sentido la hipótesis de integración semántica asume que la amplitud de la onda N400 se asocia con la facilidad para integrar categorías (Van Petten & Luka, 2012). Nótese que mientras en la condición 5 las imágenes que procesa el sujeto son todas de diferentes categorías, en la condición 1 son todas de la misma categoría. Por otra parte, el orden de la imagen incongruente en las condiciones 2 y 3 tiene significación neuroeléctrica de modo específico en el área temporal. El efecto N400 en estas condiciones se explica por la hipótesis de acceso al léxico (Van de Meerendonk et al., 2010), que establece que las modulaciones en la amplitud N400 representan la facilidad con la que un estímulo puede ser activado a partir de una determinada categoría. Sin embargo, estos resultados no están en consonancia con los hallazgos de Kutas y Federmeier (2011) que no identifican el efecto N400 en el orden de presentación de estímulos.

La diferencia entre la repetición de casos de una misma categoría y la identidad entre casos de un mismo tipo queda de manifiesto en las diferencias significativas encontradas entre las condiciones 1 vs. 4. Comprobamos que el cerebro es sensible al procesamiento de distintos casos de uno y el mismo tipo (la misma imagen repetida). La amplitud es más negativa en los casos en los que se repiten imágenes de una misma categoría frente a los casos de una y la misma imagen (ver Figura 5.2.b). Por consiguiente, la repetición de imágenes modula la N400 del mismo modo que lo hace la repetición lingüística, como lo acreditan numerosos estudios (Álvarez-Merino, Requena-Hernández, & Salto-Alemany, 2018; Baggio et al., 2016; Royle, Drury, Perlitch, Fromont, & Steinhauer, 2016). Sabemos por Kutas y Federmeier (2011) que el efecto N400 de las relaciones semánticas entre palabras no depende de si las

palabras se presentan individualmente o en un contexto de oración. Parece haber un proceso que toma las palabras como un contenido individual que se integran en un significado coherente y el efecto N400 parece reflejarlo, incluso en contextos que incluyen la negación (Kutas & Federmeier, 2011). Por ejemplo, negar una oración altera por completo su valor de verdad (El petirrojo es un coche/El petirrojo no es un coche), pero no provoca alteraciones eléctricas significativas, ya que éstas dependen de la probabilidad con la que se asocian "petirrojo" y "coche" o de las categorías que ambos compartan. Por otro lado, los resultados de la doble incongruencia dejan un rastro de procesamiento en la ventana temporal de 400 a 550 ms (ver Figura 5.2.b) por lo que cabe esperar que la incongruencia no se comporte como una negación, ni la doble incongruencia sea congruente.

Ventana de 550 a 800 ms.

El efecto P600 observado en el estudio corrobora la presencia de este potencial cuando la expectativa de congruencia es ambigua (Ferreira, 2003). En estos casos el sujeto realiza un reprocesamiento semántico basado en la estructura formal del significado en lugar del contenido (Van de Meerendonk, Kolk, Vissers, & Chwilla, 2010). En esta investigación la relación de ambigüedad de las imágenes que conforman el estímulo complejo deja rastro en la onda P600 en la comparación de las condiciones 1 vs. 5, 2 vs. 3 y 1 vs. 4. La mayor activación en la a condición 5 estaría relacionada con la acumulación de hasta tres incongruencias en la condición 5 frente a la ausencia de incongruencia en la condición 1 (ver Figura 5.2.c). La diferencia de amplitud entre las condiciones de orden pone de manifiesto que el orden de los estímulos importa o condiciona la complejidad del procesamiento. Este resultado complementa y tal vez contradice el encontrado por Kutas y Federmeier (2011) en relación a que en su estudio no encontraron cambios significativos de amplitud en el cambio de orden de palabras (barba y bigote/bigote y barba). La mayor activación de la identidad sobre la repetición (1 vs. 4) se explica según el modelo MUC (Hagoort, 2016) porque dos estímulos con el mismo contenido proposicional deben ser reprocesados para constatar tanto que los estímulos son iguales (ejemplifican idénticas categorías) como que son numéricamente distintos.

Recopilando los resultados del contraste de condiciones, se infiere que los datos de este estudio muestran que el número y el orden de las incongruencias determinan la complejidad neural del procesamiento semántico. Dada la ausencia de negación, los resultados son consistentes con la presencia de cómputo semirecursivo de incongruencias en el reprocesamiento. Por lo tanto, a nuestro juicio, el reprocesamiento asociado con la P600 en los casos de dificultades sintácticas causadas por infracciones de la gramática (Skeide & Friederici, 2016), dificultades sintácticas en oraciones complejas (Hagoort, 2016) o dificultades para seleccionar la parte ambigua de una oración (Maess et al., 2006), también aparece al reprocesar imágenes compuestas. Por ende, nuestra propuesta es consistente con estudios que aseguran que el efecto P600 es sensible al procesamiento de reglas de tipo lógico (Baggio et al., 2016; Van de Meerendonk et al., 2010).

Localización de fuentes

En cuanto a los análisis descriptivos de la localización de fuentes se constata que en todas las condiciones hay activación neuroanatómica en el giro frontal derecho, consistente con la hipótesis de integración o heurística que predice la activación de estas áreas cuando se realiza el esfuerzo de integrar estímulos (Carlo Reverberi, Görge, et al., 2012). Por otro lado, la activación del giro frontal superior e inferior izquierdo y el giro temporal superior izquierdo en todas las condiciones, se compadece con patrones de activación que predicen sensibilidad a estructuras formales de los estímulos (Bornkessel-Schlesewsky & Schlewsky, 2013). Aunque los datos de EEG no permiten acreditar que se producen los circuitos cerebrales de unificación, los resultados disponibles son consistentes con el modelo de unificación en dos sentidos. En primer lugar, el procesamiento semántico de imágenes muestra en este estudio propiedades afines al procesamiento lingüístico en el nivel proposicional de análisis, como se ha comprobado en los casos de la identidad, la repetición y el orden. En segundo lugar, las áreas involucradas son consistentes con las esperadas en el modelo MUC comprometiendo áreas frontales y no sólo temporales (Hagoort, 2016).

Las diferencias de activación localizadas en el giro frontal inferior derecho muestran el mayor compromiso con la repetición que con la identidad que la literatura asocia con el procesamiento perceptivo de selección y discriminación de estímulos semejantes (Tirapu-Ustárrroz et al., 2005). Las condiciones 2 y 3 han permitido verificar la influencia del orden de presentación de las incongruencias en el procesamiento y muestran la activación neuroanatómica del giro angular izquierdo, más activo en la condición 2 que investigaciones previas han vinculado esta área con procesamiento semántico (Rosselli, Ardila, & Bernal, 2015). Así mismo, la región cingulada anterior izquierda y el giro frontal medial izquierdo están comprometidas en las condiciones 1 y 5. Estas áreas están asociadas a la red del control ejecutivo semántico (CES) (Dávalos, Redondo, Luna, Sánchez, & Torres, 2012) que algunas investigaciones identifican con el procesamiento de la acumulación de incongruencias o errores (Kolk, Chwilla, van Herten, & Oor, 2003). En este sentido, la mayor activación amplitud de la condición 5 es consistente con el mayor número de incongruencias procesadas respecto a la condición 1. Asimismo, algunos estudios asocian la activación de esta red con la búsqueda de reglas lógicamente válidas (Hagoort, 2016).

En conclusión, el protocolo experimental desarrollado corrobora efectos N400 ya conocidos respecto al procesamiento de contenido (Rosselli et al., 2015) y verifica un efecto P600 mostrando indicios de que el cómputo cerebral de estímulos complejos incluye el monitoreo de la repetición, número y orden de incongruencias, apuntando a que el cerebro semicomputa los estímulos complejos. En línea con los resultados de Reverberi, Görgen, & Haynes (2012) y Baggio et al. (Baggio et al., 2016), este resultado es consistente con la presencia de formas restringidas de composicionalidad en el procesamiento neural de estímulos complejos.

Referencias Bibliográficas

Álvarez-Merino, P., Requena-Hernández, C., & Salto-Aleman, F. (2018). Variables de Medida para el Razonamiento Deductivo. *Revista Iberoamericana de Diagnóstico y Evaluación – e Avaliação Psicológica*, 49(4), 59–75. <https://doi.org/10.21865/RIDEP49.4.05>

- Baggio, G., Cherubini, P., Pischedda, D., Blumenthal, A., Haynes, J.-D., & Reverberi, C. (2016). Multiple neural representations of elementary logical connectives. *NeuroImage*, *135*, 300–310. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.04.061>
- Boolos, G., Burgess, J., & Jeffrey, R. (2002). *Computability and logic* (4th ed.). Cambridge: Cambridge university press.
- Bornkessel-Schlesewsky, I., & Schlewsky, M. (2013). Reconciling time, space and function: A new dorsal–ventral stream model of sentence comprehension. *Brain and Language*, *125*(1), 60–76. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2013.01.010>
- Collins, L., Neelin, P., Peters, T., & Evans, A. C. (1994). Automatic 3D intersubject registration of MR volumetric data in standardized Talairach space. *Journal of Computer Assisted Tomography*, *18*(2), 192–205.
- Davey, J., Cornelissen, P., Thompson, H., Sonkusare, S., Hallam, G., Smallwood, J., & Jefferies, E. (2015). Automatic and Controlled Semantic Retrieval: TMS Reveals Distinct Contributions of Posterior Middle Temporal Gyrus and Angular Gyrus. *Journal of Neuroscience*, *35*(46), 15230–15239. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4705-14.2015>
- Dávalos, J. M., Redondo, S., Luna, F. G., Sánchez, L. M., & Torres, G. F. (2012). Actividad cerebral medida con Resonancia Magnética Funcional durante la prueba de fluidez de acciones. *Neuropsicología Latinoamericana*, *4*(4), 28–35. <https://doi.org/10.5579/m.2012.0130>
- Del Pinal, G. (2015). The Structure of Semantic Competence: Compositionality as an Innate Constraint of the Faculty of Language. *Mind & Language*, *30*(4), 375–413. <https://doi.org/10.1111/mila.12084>
- Famoyegun, A. (2012). *Word Frequency Effects in L2 Speakers: An ERP Study* (Thesis). The University of Arizona.
- Ferreira, F. (2003). The misinterpretation of noncanonical sentences. *Cognitive Psychology*, *47*(2), 164–203. [https://doi.org/10.1016/S0010-0285\(03\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0010-0285(03)00005-7)

- Friederici, A., & Gierhan, S. (2013). The language network. *Current Opinion in Neurobiology*, 23(2), 250–254. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2012.10.002>
- Hagoort, P. (2016). MUC (Memory, Unification, Control). In G. Hickok & S. L. Small (Eds.), *Neurobiology of Language* (pp. 339–347). San Diego: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407794-2.00028-6>
- Knauff, M. (2013). *Space to Reason: A Spatial Theory of Human Thought*. *Space to reason: A spatial theory of human thought*. London: The MIT Press.
- Kolk, H., Chwilla, D., van Herten, M., & Oor, P. (2003). Structure and limited capacity in verbal working memory: A study with event-related potentials. *Brain and Language*, 85(1), 1–36. [https://doi.org/10.1016/S0093-934X\(02\)00548-5](https://doi.org/10.1016/S0093-934X(02)00548-5)
- Kutas, M., & Federmeier, K. (2011). Thirty Years and Counting: Finding Meaning in the N400 Component of the Event-Related Brain Potential (ERP). *Annual Review of Psychology*, 62(1), 621–647. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.093008.131123>
- Lau, E., Holcomb, P., & Kuperberg, G. (2013). Dissociating N400 Effects of Prediction from Association in Single-word Contexts. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(3), 484–502. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00328
- Maess, B., Herrmann, C., Hahne, A., Nakamura, A., & Friederici, A. (2006). Localizing the distributed language network responsible for the N400 measured by MEG during auditory sentence processing. *Brain Research*, 1096(1), 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.04.037>
- Mikolov, T., Sutskever, I., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J. (2013). Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionality. In C. J. C. Burges, L. Bottou, M. Welling, Z. Ghahramani, & K. Q. Weinberger (Eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems 26* (pp. 3111–3119). Curran Associates, Inc.
- Pascual-Marqui, R., Lehmann, D., Koukkou, M., Kochi, K., Anderer, P., Saletu, B., ... Kinoshita, T. (2011). Assessing interactions in the brain with exact low-resolution

- electromagnetic tomography. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1952), 3768–3784. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0081>
- Proal, E., Alvarez-Segura, M., de la Iglesia-Vayá, M., Martí-Bonmatí, L., & Castellanos, F. rancisco X. (2011). Actividad funcional cerebral en estado de reposo: redes en conexión. *Revista de Neurología*, 52 Suppl 1, 3–10.
- Renoult, L., Wang, X., Calcagno, V., Prévost, M., & Debrulle, B. (2012). From N400 to N300: Variations in the timing of semantic processing with repetition. *NeuroImage*, 61(1), 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.02.069>
- Reverberi, C., Görgen, K., & Haynes, J.-D. (2012). Compositionality of Rule Representations in Human Prefrontal Cortex. *Cerebral Cortex*, 22(6), 1237–1246. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr200>
- Rosselli, M., Ardila, A., & Bernal, B. (2015). Modelo de conectividad de la circunvolución angular en el lenguaje: meta-análisis de neuroimágenes funcionales. *Revista de Neurología*, 60(11), 495–503.
- Royle, P., Drury, J., Perlitch, I., Fromont, L., & Steinhauer, K. (2016). Stimulus lists can modulate semantic priming effects on the N400. *International Journal of Psychophysiology*, 108(SI), 89. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2016.07.278>
- Segaert, K., Weber, K., de Lange, F., Petersson, K. M., & Hagoort, P. (2013). The suppression of repetition enhancement: A review of fMRI studies. *Neuropsychologia*, 51(1), 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.11.006>
- Skeide, M., & Friederici, A. (2016). The ontogeny of the cortical language network. *Nature Reviews Neuroscience*, 17(5), 323–332. <https://doi.org/10.1038/nrn.2016.23>
- Tian, Y., & Breheny, R. (2016). Dynamic Pragmatic View of Negation Processing. In *Negation and Polarity: Experimental Perspectives* (Vol. 1, pp. 21–43). https://doi.org/10.1007/978-3-319-17464-8_2

- Tirapu-Ustárroz, J., Muñoz-Céspedes, J. M., Pelegrín-Valero, C., & Albéniz-Ferreras, Á. (2005). A proposal for a protocol for use in the evaluation of the executive functions. *Revista de Neurología*, 41(3), 177–186.
- Van de Meerendonk, N., Kolk, H., Vissers, C., & Chwilla, D. (2010). Monitoring in Language Perception: Mild and Strong Conflicts Elicit Different ERP Patterns. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(1), 67–82. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.21170>
- Van Herten, M., Kolk, H., & Chwilla, D. (2005). An ERP study of P600 effects elicited by semantic anomalies. *Cognitive Brain Research*, 22(2), 241–255. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2004.09.002>
- Van Petten, C., & Luka, B. (2012). Prediction during language comprehension: Benefits, costs, and ERP components. *International Journal of Psychophysiology*, 83(2), 176–190. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.09.015>
- Werning, M., Hinzen, W., & Machery, E. (2012). *The Oxford handbook of compositionality*. (M. Werning, W. Hinzen, & E. Machery, Eds.). New York: Oxford University Press.
- Xiang, M., Grove, J., & Giannakidou, A. (2016). Semantic and pragmatic processes in the comprehension of negation: An event related potential study of negative polarity sensitivity. *Journal of Neurolinguistics*, 38, 71–88. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2015.11.001>

5.3. Estudio 3. Evidence linking brain activity modulation to age and to deductive training.

Estudio 3

Evidence linking brain activity modulation to age and to deductive training

A continuación, se presenta una réplica exacta del contenido completo que conforma el manuscrito publicado en Revista de Neurología como Álvarez-Merino, P., Requena, C., & Salto, F. (2018). Evidence Linking Brain Activity Modulation to Age and to Deductive Training. *Neural Plasticity*, 2018, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2018/1401579>

Evidence Linking Brain Activity Modulation to Age and to Deductive Training

Paula Álvarez Merino¹, Carmen Requena ¹, Francisco Salto ¹

1. Department of Psychology, Sociology and Philosophy, University of León, Campus de Vegazana s/n, 24071, León, Spain.

Abstract

Electrical brain activity modulation in terms of changes in its intensity and spatial distribution is a function of age and task demand. However, the dynamics of brain modulation is unknown when it depends on external factors such as training. The aim of this research is to verify the effect of deductive reasoning training on the modulation in the brain activity of healthy younger and older adults (N = 47, mean age of 21 ± 3.39 and N= 38, mean age of 68.92 ± 5.72). The analysis reveals the benefits of training, showing that it lowers cerebral activation while increasing the number of correct responses in the trained reasoning task ($p < .001$). The brain source generators were identified by time-averaging low-resolution brain electromagnetic tomography (sLORETA) current density images. In both groups, a bilateral over-activation associated with the task and not with age was identified. However, while the profile of bilateral activation in younger adults was symmetrical in anterior areas, in the older ones the profile was located asymmetrically in anterior and posterior areas. Consequently, bilaterality may be a marker of how the brain adapts to maintain cognitive function in demanding tasks in both age groups. However, the differential bilateral locations across age groups indicate that the tendency to brain modulation is determined by age.

Introduction

Brain activity adapts in time to the cognitive needs of an organism, altering its intensity and its distribution which can be measured through modulations in electrical brain activity (Rieck, Rodrigue, Boylan, & Kennedy, 2017). Scientific literature offers two different approaches to the complex phenomenon of the electrical brain signal's modulation. One explicative strategy focuses on overactivation of brain activity as a function of the demand of tasks (Grandi & Tirapu-Ustárruz, 2017), while a second perspective explains modulation in terms of age and focuses on the idiosyncrasy of brain aging (Cabeza, 2002). Many studies have verified how brain overactivation correlates with better performance in cognitive tasks. For example, the performance of older people who participated in a digit span task was better if they exhibited a

bilateral pattern of brain activity compared to those who did not show such bilaterality (Reuter-Lorenz et al., 2000). Another memory study involving older adults with high and low memory capacities and younger adults reported that both the older adults with low memory capacity and the younger adults showed prefrontal asymmetry with greater activity in the right hemisphere (Cabeza, 2002). While the performance of the younger adults was the most successful, that of the older adults with low memory capacity was the least. In the older adults with better memory, a pattern of bilateral activity was evidenced with similar results to the younger adults. When the task is more demanding for these older adults, the left prefrontal cortex is also activated. That is, a supplementary activation reflects the additional effort that these older adults make in order to access information (Barulli & Stern, 2013). On the other hand, the approach based on the difficulty gradient of the task describes the increment in brain activation and the involvement of wider brain areas as an adaptive strategy for functional performance both in older and younger adults (Stebbins et al., 2002). In this regard, an investigation in which younger and older adults had to resolve memory tasks of different complexity levels found that the dorsolateral prefrontal cortex was overactivated in older adults in order to achieve a performance similar to that of younger adults. In addition, as the difficulty increased, the dorsolateral prefrontal cortex in younger adults activated as well (Cappell, Gmeindl, & Reuter-Lorenz, 2010).

The second perspective attributes brain activity modulation to age (Osorio, Fay, Pouthas, & Ballesteros, 2010). Namely, the cerebral plastic behavior in older adults makes it possible for them to relearn a new activation mode which is manifested in a deactivation of posterior regions along with a higher activation in previous regions (Payer et al., 2006). For example, in tasks requiring the intervention of basic cognitive operations such as visual perception, the highest activation is not located in the posterior cognitive regions of older adults. This brain behavior is associated with age, but it does not necessarily involve cognitive decline (Ansado, Monchi, Ennabil, Faure, & Joannette, 2012). In this regard, an extensive research study tested age-related cerebral changes using an episodic memory task (high complexity) as well as a visual perception one (low complexity) (Gutchess et al., 2005). The results showed that

regardless of the complexity of the task, a higher activation was localized in the prefrontal cortex. In addition, this activation correlates with better cognitive function, as opposed to an inverse correlation between performance and activity in the occipital region. Other studies have also showed age related changes in the brain and cognitive strategies to solve executive control tasks (Dew, Buchler, Dobbins, & Cabeza, 2012). In particular, the experiment was carried out with younger and older adults who faced a task with consecutive pairs whereby the first one constituted a cue and the second one a target. Subjects were instructed to respond to the target whenever it was preceded by the same cue. Otherwise, they should omit or refrain from responding. The results showed that, with age, the executive control strategies shifted in temporal distribution. That is, they were proactive in younger adults during the presentation of the cue and reactive in older adults in response to the target presentation. In addition, the neuroimaging analysis showed that only younger adults displayed higher activation of the dorsolateral prefrontal cortex and left hippocampus when the cue appeared rather than when the target was presented. On the other hand, it reveals an idiosyncratic behavior of cerebral aging in the amount of cognitive resources that are activated by the demand of a cognitive task. There seems to be a ceiling effect linked to how high the difficulty of the demand is in older adults, since brain activity lessens if the task is too hard (Rieck et al., 2017). An investigation in which younger and older adults had to resolve memory tasks of different complexity levels found that the prefrontal cortex was overactivated in both younger and older adults to achieve performance success (Cappell et al., 2010). However, beyond a certain level of demand, in older adults as opposed to younger adults, brain activity decreased, and so did their performance (Schneider-Garces et al., 2010).

All in all, there is evidence of both task dependent and age dependent factors in brain activity modulation. Demanding tasks modulate brain activity both in younger and older adults. However, simultaneously beyond the task demand there is also idiosyncratic aged brain behavior. The state of the art includes two basic results: 1. When older adults face a demanding task, they require more brain activation than younger adults to obtain a similar performance level (Stebbins et al., 2002). 2. When

the task is demanding for all age groups, younger adult brains manifest an increased activation while older adult brains tend to diminish their brain activity (Folstein, Folstein, & McHugh, 1975; Opdebeeck, Martyr, & Clare, 2016). However, there are no known experimental studies that analyze the effect of training on the modulation of brain activity which in turn would help to clarify the relationship between the two explanatory approaches to brain modulation.

The current study aims to examine the modulation of EEG brain activity in a highly demanding cognitive task in younger and older adults before and after a reasoning training. In particular, the following hypotheses were tested experimentally: (a) baseline EEG activity will show a bilateral over-activation in younger adults rather than in older ones. (b) The post-training evaluation will show bilateral over-activation in the older adults while it will disappear in the younger ones. (c) The effect of training improves deductive reasoning performance by increasing the number of valid responses and decreasing the reaction time in both age groups.

Materials and methods

Participants

Eighty-five subjects, divided into two age groups, voluntarily participated in this study. The group of younger adults consisted of 47 subjects with an average age of 24.21 ± 3.39 years. These subjects were students from the University of León whose participation was rewarded with 1 academic credit. On the other hand, the group of older adults consisted of another 38 subjects with an average age of 68.92 ± 5.72 years. These subjects were contacted through the senior center of León Council.

All participants were screened to be right-handed with normal or corrected vision and not currently under any stress (i.e. exams, job interviews, grief, etc.). Additionally, older adults were screened to be cognitively intact (Mini Mental Status Exam ≥ 28) (Folstein, Folstein, Research, 1975). This study was approved by the Ethics Committee of the University of León in 2017 and it was carried out following the Deontological Standards recognized by the Helsinki Declaration of 1975 (as revised in the 52nd Annual General Assembly in Edinburgh, Scotland, in October 2000), the standards of

Good Clinical Practice and the Spanish Legal Code regulating clinical research involving human subjects (Royal Decree 223/2004 about regulation of clinical trials).

Procedure

The experimental design consists of 99 deductive reasoning tasks that are presented in a time window of 3.5 seconds which includes the presentation of the task and the response time. There was an interval of 200 ms between tasks. Tasks were presented through the Mind Tracer (City of Havana, Neuronica S.A.) on a 23-inch NEC screen. Subjects were requested to minimize their blinking as well as their postural movements. The program also provides conductual information about the number of correct and incorrect answers and reaction times.

For the basal evaluation and for post-training evaluation, 99 deductive tasks were designed corresponding to the three types presented above. 33 items for each type of task were randomly distributed. In the basal evaluation, subjects were instructed to mandatorily respond to this instruction: "If the item follows a rule based on properties regarding figures, colors, number, shape or shading, press the 'Ctrl' key, otherwise press the 'spacebar' key." Notice that in the basal evaluation the subject had no information or hints about the contents of the rules. The task was new and highly demanding, since the subject lacked any hints and did not know the rules of the task. For the post-training the subjects followed this instruction: "If the three cards have two or more properties in common, then (and only then) they form a Set". In this case, subjects would respond by pressing the "Ctrl" key and otherwise by pressing the spacebar.

The initial registration lasted about 40 minutes: 20 minutes to prepare the EEG system (cleaning, placement of the electrodes, etc.) using MEDICID (City of Havana, Neuronica, S.A.), and another 20 minutes to run the test. After the initial recording, subjects undertook behavioural training of reasoning in a single session followed by a post-training recording, with an approximate duration of 70 minutes: 30 minutes for the training itself and the remaining time for EEG data recording.

Stimuli

The paradigm used during the EEG acquisition was based on a subset of the cards that compose the deck of the card game Set. The game was unknown to all participants, and it was instrumental in the training and evaluation of elemental logical deductions. This kind of task was chosen because human deductive abilities are known to be, under certain specific conditions, rather invariant with respect to age, culture and education. In particular, the reduction of cognitive resources accompanying aging does not impede the preservation of elementary deductive abilities (Tommerdahl et al., 2016), specifically if inferential conclusions are relevant to their premises (Álvarez Merino, Requena Hernández, & Salto Alemany, 2016; Beatty & Vartanian, 2015). Even if cultural context partially determines reasoning, elementary deductive inference remains invariant across cultures (Mercier, 2016) and education levels (Markovits, Brisson, de Chantal, & St-Onge, 2016). Additionally, deductive inferences occur both in linguistic and visual support (Allwein & Barwise, 1996). That is, there are deductions which are not sentential sequences of premises and conclusions, but logically valid visual inferences such as those present in diagrams or geometrical proofs. Finally, an interesting peculiarity of deductive reasoning is its easiness to produce new tasks with simple instructions where it is easy to measure and control both the logical complexity (number of instances of employed rules) and the relational complexity (number of variables). In this research, these measures offer an objective demand gradient.

The deductive tasks presented and evaluated in this study are elementary logical (first order) inferences realized over a subset of the card game Set. The cards presented items with certain characteristics: shape, color, number and shading. There are three shapes and two colors, two numbers and two shadings. Each item presents a trio of cards which shares zero, one, two or three of these characteristics. By definition, any trio is a Set if and only if the three cards share at least two properties. Determining whether an item (trio) is or is not a Set is a purely deductive task, namely a finite sequence of inferences which can be developed in a logically valid way and follows a recursive procedure which computes the truth values of the premises. Given that the subject perceives the properties of each card, the exercise

of computing or deducing if the trio is a Set is an elementary logical task. In the simplest scenario, it is enough to apply the definition of a Set to verify that in fact, the cards in the trio share two properties. This situation automatically applies the rule of Modus Ponens (deduce B from {A, If A then B}). In the more complex scenario, instead of directly applying the definition after positive cases, we have counterexamples. In this case, the rule of Modus Tollens (deduce notA from {notB, If A then B}) can be used.

To elucidate the experimental design, we show an example of each of the three kinds of items presented to the subjects in the evaluation test. Only in the first kind of case (see Figure 5.3.a) do the three cards share at least two properties and consequently the trio satisfies the definition of a Set.

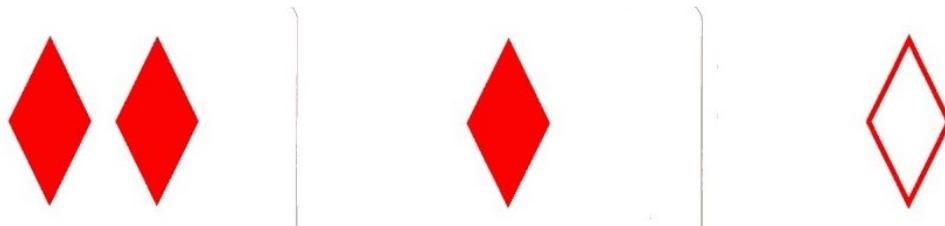


Figura 5.3. a. Case 1 type.

The three cards in Figure 5.3.a share the same shape and color, therefore they are a Set. From the only presentation of the trio and the application of negationless deductive rules, the reasoner may deduce that the item is a set. Observe how the reasoner may deduce the conclusion without going through all properties of all objects in the cards: once form and color are shared, there is no need for further verifications.

The second type of case is a trio which shares only one property (see Figure 5.3.b):

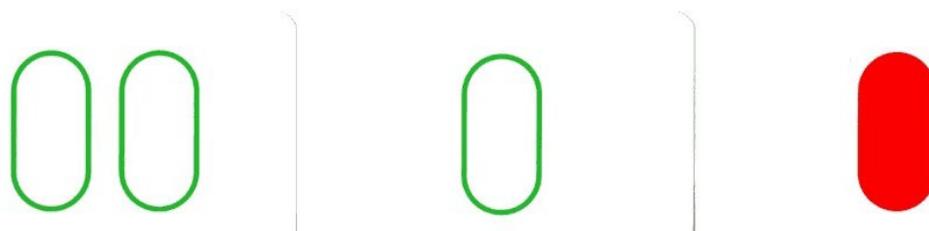


Figura 5.3. b. Case 2 type.

The three cards share shape, but no other property. Therefore, this item is not a Set. The inference behind this conclusion contains an application of the Modus Tollens rule, since by this rule the subject can refute each of the other properties (color, number, shading) one by one.

Finally, the following is an example of the third type of case in which no properties are shared by any card of the trio (see Figure 5.3.c):

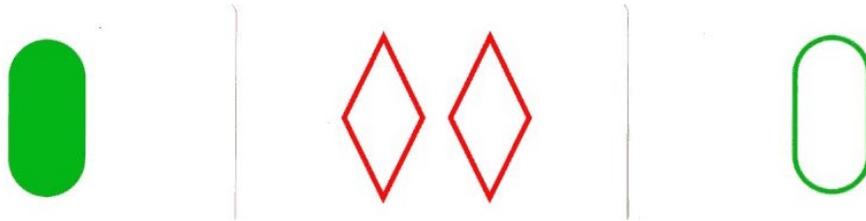


Figura 5.3. c. Case type 3.

The subject may easily verify property by property that a characteristic is not shared in the trio, deducing by Modus Tollens that the trio is not a Set. Note that in the three types of cases the whole inference is elementary and deductively valid. Moreover, it is remarkable that the second and third types of cases have a slightly greater logical complexity than case 1, but their relational complexity is identical.

Training

All subjects received a personalized one-on-one training, which took place in the same session as the post evaluation. The point of the training was to produce valid deductive inferences by means of recursive or computable logical procedures which would prove whether a given item was (or was not) part of a Set. In its first stage, the training focused on identifying Sets and practicing at least 15 exercises of type 1 tasks with items that were not present in the basal evaluation. In its second stage, the training made the subject explain her deductive process out loud to the researcher who then corrected her as necessary. Since several logically equivalent procedures are equally acceptable, the personalized training adapts to the heuristical strategies proposed by the subject in case they are logically valid. Remarkably, the deductive training does not purport to teach the subject to reason logically but to bring into

explicit conscience the logical properties of the inferences she already makes. For example, the conjunction operator (logical operator for “and”) allows the subject to go over several cards to accumulate available conclusions. This initial training phase ends when the subject says she understands the task of identifying positive cases of a Set and does not commit two consecutive errors in type 1 trials.

In the third training phase, the subject herself proposed examples of items that would be a Set and described her reasoning out loud. Once her proposals were adequate, the training for types 2 and 3 began, which consisted of making the subject aware of the use of Modus Tollens to infer counterexamples to Sets. For example, if one card did not share a property with another one in a given item, it was deduced to be a counterexample to a Set. The training finished when the subject expressed her cognizance of the task and did not commit any errors. The standard duration of the personalized training process was between 20 and 30 minutes for each subject.

EEG recording and analysis

The EEG was recorded with a 64-channel amplifier (City of Havana, Neuronic System) and a specific acquisition software (Neuronic EEG / Edition EEG Software). Reference electrodes were placed on the earlobes. In addition, electrooculography (EOG) was registered using three pairs of external electrodes in order to record the horizontal and vertical movement of the eyes. Electrode impedance was set for each subject before data collection, but always kept below 5 K Ω . The recording was carried out using an Electrocap with Ag/AgCl electrodes, which made it possible to analyze the active scalp areas of the subjects. ERP signals and stimulus markers were continuously recorded at a sampling frequency of 200 Hz during the 20-minute presentation of the task. The signals were filtered using a band-pass finite impulse response filter with a Hamming window between 1 and 70 Hz. In addition, a 50 Hz notch filter was used in order to remove the power line artifact. Finally, a three-step artifact rejection algorithm was applied to minimize oculographic and myographic artifacts (Gomez-Pilar et al., 2015): 1. Components related to eye blinks, according to a visual inspection of the scalp maps and their temporal activations from independent component analysis (ICA) were discarded (Makeig, Debener, Onton, & Delorme,

2004). 2. Segmentation of each 3.5 seconds trial into one 1.5 s-length trial ranging from 200 ms before stimulus onset to 1,300 ms after stimulus onset. 3. The thresholding of amplitude in each trial was established in five standard deviations of the signal. That is, trials in which at least five channels contained two samples that exceeded the threshold were taken out. Only correct answers were considered for further analysis. Next, a sliding window approach was used for the localization of the major activation of of each trial. Windows of 150 ms with an overlap of 90% were selected for measures of brain activity before and after training. Peak amplitude measurement took into account the most negative peak value within the temporal window of 400 to 550 ms after the stimulus.

Source Localization

This technique has been widely used to study the neural correlations of cognition, because it combines a high temporal resolution of the EEG technique with a reasonable spatial identification of the electrical signal of the cortical sources (Thatcher, North, & Biver, 2014) (see <http://www.uzh.ch/keyinst/NewLORETA/sLORETA/sLORETA.htm>). The sLORETA software divides the brain into a total of 6,239 cubic voxels with a resolution of 5 mm and estimates the density of the current sources (Pascual-Marqui et al., 2014).

In the current investigation, the source localization were estimated with the analysis of 64 electrodes located in the frontal, medial, temporal and bilateral parietal regions. The subjects were registered using the International System 10-20. The sources were calculated for every subject and each age group at the temporal window of 400 to 550 ms with the Brain Cracker (City of Havana, Neuronic SA) which used the low resolution electromagnetic tomography (LORETA implemented in sLORETA (Pascual-Marqui et al., 2014)). sLORETA sources current density is calculated from scalp-recorded ERP using a realistic head model from Montreal Neurological Institute (MNI) (Mazziotta et al., 2001), in which the 3-D solution space was restricted to only the cortical gray matter (Lancaster et al., 2000). The ERP voltage topographic maps were made by plotting color-coded isopotentials obtained by interpolating the

voltage values between the scalp electrodes in specific latencies. Voxewise nonparametrical statistics as implemented in sLORETA were used.

Results

EEG records were processed using 'EEG edition' software (City of Havana, Neuronic S.A.). Descriptive analyses for each group were calculated using a toolbox from Matlab R2015a, which was developed in the laboratory of the researchers. Statistical analyses were performed using Statistica (Statistica 10). Brain Cracker and sLORETA software were used to determine source localization (Pascual-Marqui et al., 2014).

Correct vs incorrect responses

In relation to the number of correct responses in the basal evaluation, the younger adults obtained an average of 32.08 ± 12.29 whereas the group of older adults obtained an average of 31.05 ± 15.86 . Regarding the number of correct response evaluations post-training, the younger adults obtained an average of 74.79 ± 14.45 whereas the older adults obtained an average of 55.13 ± 16.94 (Figure 5.3.d).

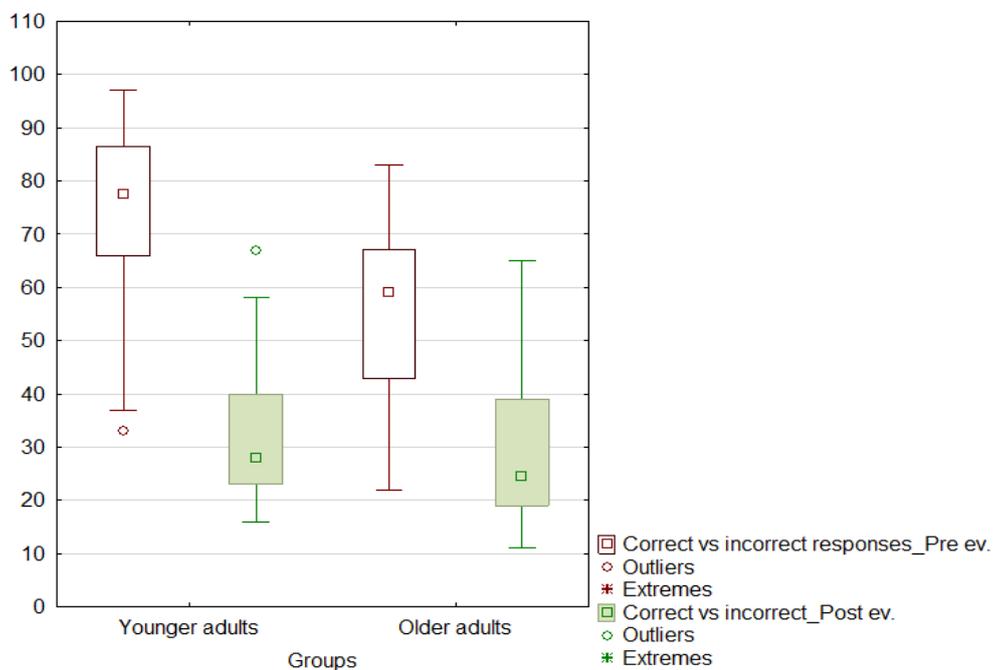


Figura 5.3. d. Mean and SD of correct and incorrect responses in younger and older adults.

To evaluate the effects of this training, a repeated-measures model was used. The difference in the number of correct/incorrect responses between both age groups was significant ($F_{1,84}=24.186$, $p= .001$), just like in post-evaluation ($F_{1,84}=188.596$, $p= .001$). It shows that the interaction between groups and post-evaluation is significant ($F_{1,84}=14.674$, $p= .001$) and the level of confidence was 0.95.

Post Hoc analysis using the Tukey test revealed significant differences in the pre-post evaluation, both in the group of younger adults ($p < .000$) and in the group of older adults ($p < .000$). The training had a greater effect on the group of younger adults (Table 5.3.1 and Figure 3.5.e).

Tabla 5.3. a

Repeated measures analysis of variance for the number of correct and incorrect responses pre-evaluation and post-evaluation in younger and older adults.

Repeated Measures Analysis of Variance with Effect Sizes and Powers (Data_saveMeanxTask_Repeated Measures) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Dgr. Of Freedom	MS	F	p
Intercept	395255.1	1	395255.1	2105.690	0.000000
Groups	4539.9	1	4539.9	24.186	0.000004
Error	15767.5	84	187.7		
Correct vs Incorrect	47302.5	1	47302.5	188.596	0.000000
Correct vs Incorrect*Groups	3680.4	1	3680.4	14.674	0.000246
Error	21068.3	84	250.8		

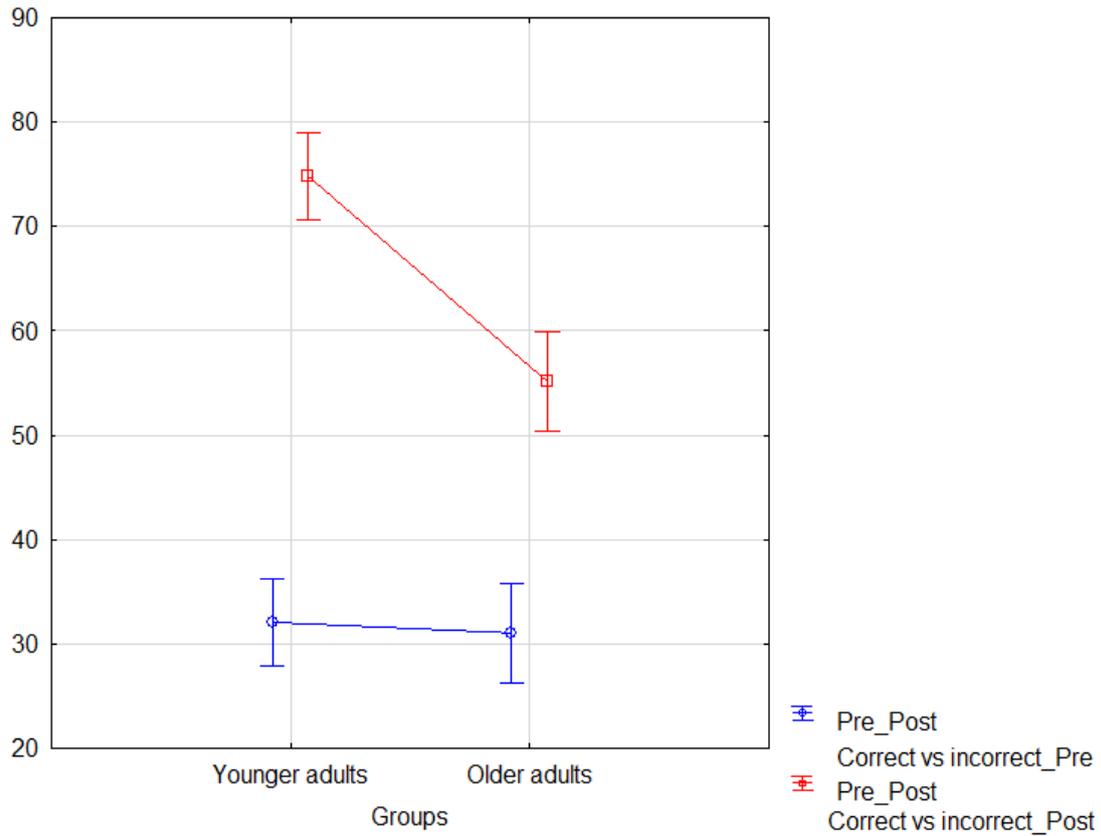


Figura 5.3. e. Significant differences between correct/incorrect responses pre-evaluation and post-evaluation, within age groups.

Reaction times

The average reaction time in the basal evaluation was 1869.33 ± 608.79 ms for younger adults and 2097.89 ± 1046.77 ms for the older ones. The same parameter post-training was 2898.50 ± 917.93 ms for younger adults and 2275.42 ± 635.92 ms for older adults (Figure 5.3.f).

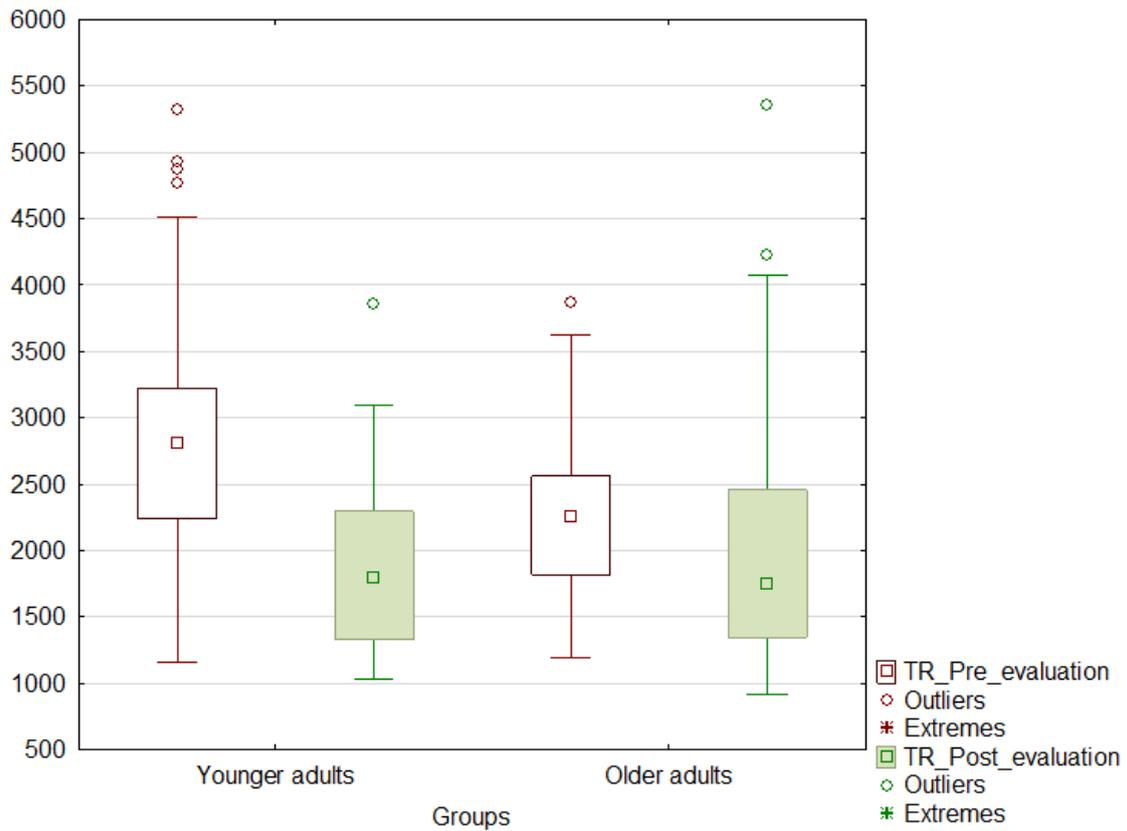


Figura 5.3. f. Mean and SD of reaction times in younger and older adults.

To evaluate the effects of this training, a repeated-measures model was used. The difference in reaction times between both age groups was not significant ($F_{1,84}=1.700$, $p= .195$). However, the post-training shows significant differences ($F_{1,84}=40.920$, $p= .001$), especially in the group of younger adults. This is verified in the effect of the interaction, which is also significant ($F_{1,84}=20.410$, $p= .001$), and because the level of confidence is 0.95.

Post Hoc analysis using the Tukey test reveals significant differences in the pre-post evaluation in the group of younger adults ($p < .001$) but not in the older adults ($p < .780$) (Table 5.3.b and Figure 5.3.g).

Tabla 5.3. b

Repeated measures analysis of variance for the reaction time pre-evaluation and post-evaluation younger and older adults.

Repeated Measures Analysis of Variance with Effect Sizes and Powers (Data_saveMeanxTask_Repeated Measures) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Dgr. Of Freedom	MS	F	p
Intercept	885743564	1	885743564	921.6854	0.000000
Groups	1633924	1	1633924	1.7002	0.019839
Error	80724353	84	961004		
TR	15492871	1	15492871	40.9207	0.327574
TR*Groups	7727593	1	7727593	20.4106	0.195484
Error	31802969	84	378607		

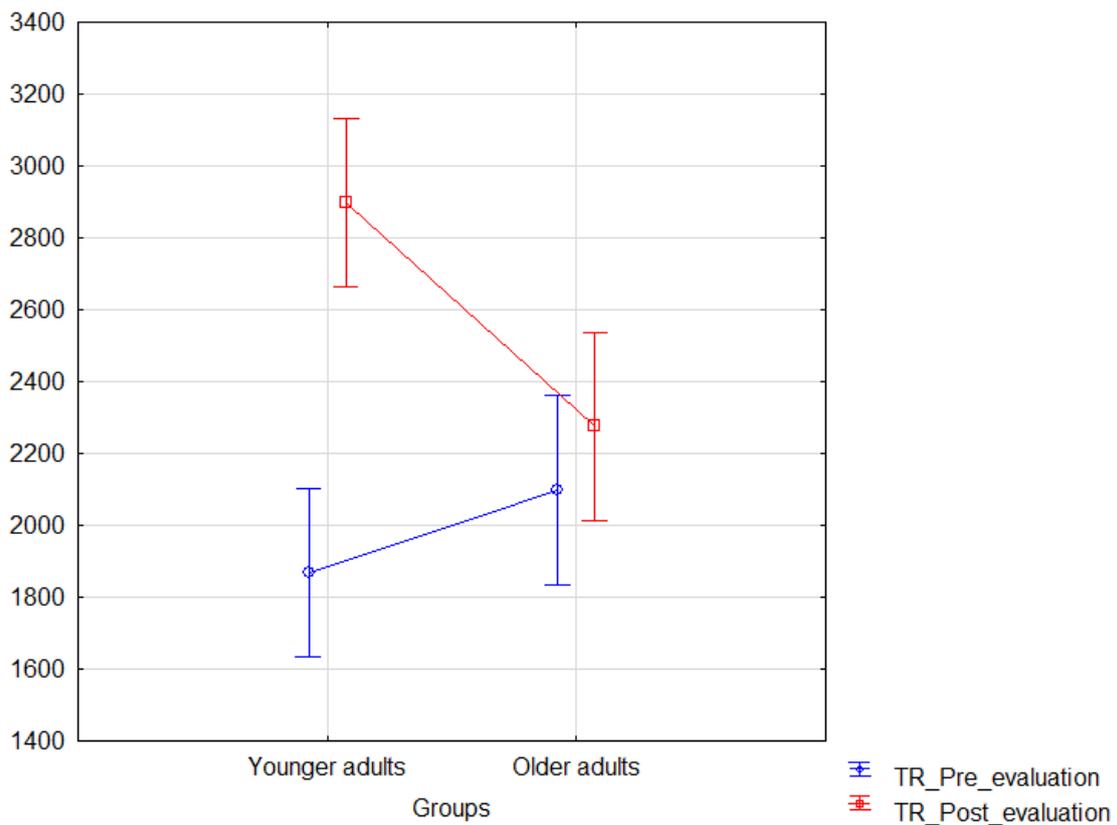


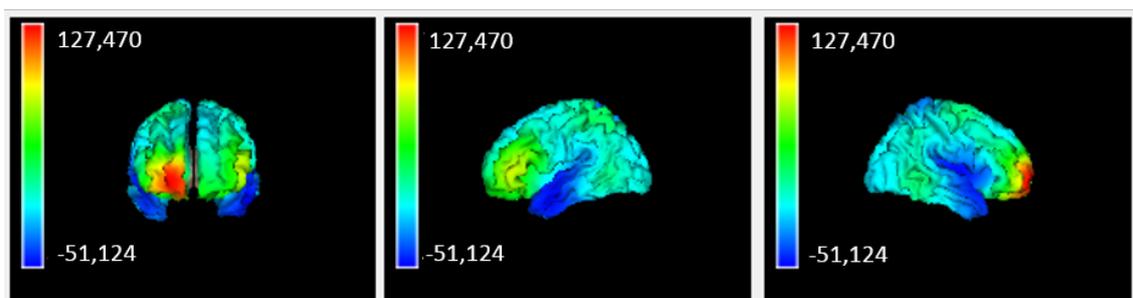
Figura 5.3. g. Significant differences between reaction times pre-evaluation and post-evaluation, within age groups.

Analysis of source localization Sloreta

The descriptive analyses show that, in the basal evaluation of younger adults, there is activity in the right hemisphere gyrus: orbitofrontal, superior temporal and postcentral, as well as in the insula; there is also activity in the left superior, middle and inferior temporal gyri. After training, that is in the post-evaluation of the group of younger adults, activity was observed in the left hemisphere gyrus: angular, middle temporal, superior and middle frontal (Figure 5.3.h).

In older adults, activity in the basal evaluation was observed in the left superior and middle frontal gyrus, right parietal superior lobe and right postcentral gyrus. In the group of older adults, activity in the post-evaluation was observed in the left postcentral gyrus and in the right lateral orbitofrontal gyrus (Figure 5.3.i).

Pre-evaluation. Younger adults



Post-evaluation. Younger adults

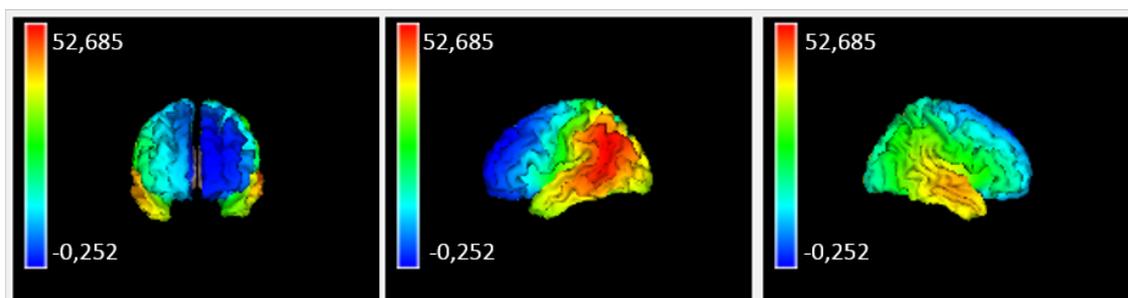
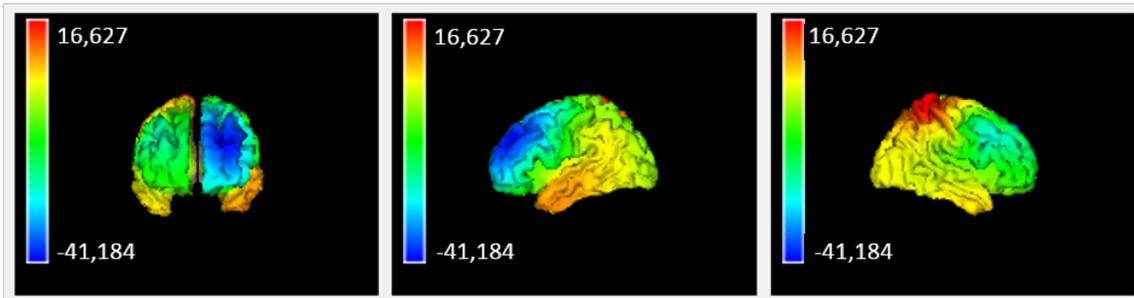


Figura 5.3. h. Analysis of source localization pre- post evaluation in younger adults.

Pre-evaluation. Older adults



Post-evaluation. Older adults

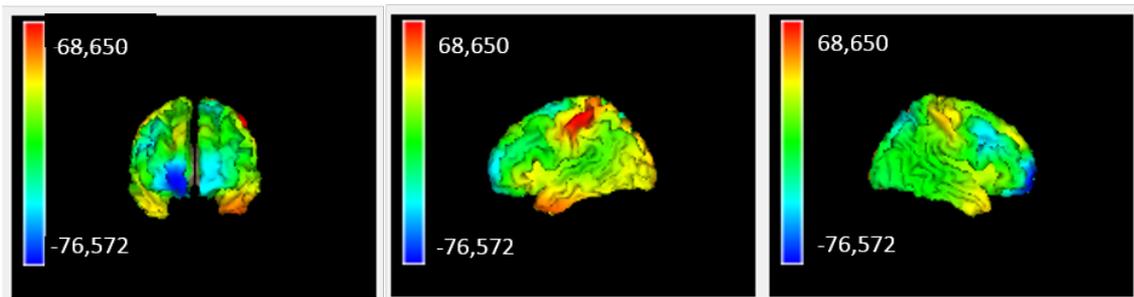


Figura 5.3. i. Analysis of source localization evaluation and post-training, within age groups.

Discussion

To the best of our knowledge, this is the first cerebral study assessing a reasoning training task in younger and older adults. The results confirm the effects of cognitive training on the brain and behavior, since post-training evaluation showed less brain activity and a better performance in the proposed cognitive task in both younger and older adults. On the other hand, the results confirmed hypothesis (a) of greater activation in younger adults during the basal evaluation compared to older adults. However, the results do not confirm hypothesis (b) since there weren't increases in brain activity in older adults after training. In addition, hypothesis (c) on the effects of training on psychological variables is partially verified. The number of correct answers increased in the post-training tasks; at the same time, reaction times grew unexpectedly. Globally considered cerebral results show that older adults may have less efficient cerebral resources for cognitive processing. Post-training performance among older subjects is comparatively poor with respect to younger subjects, evidencing older adults' reduced cognitive capacity to buffer high demands. In

addition, the trend of lower brain activation and worse performance in older adults, both in the baseline task and post-training, may be interpreted as an age-dependent phenomenon rather than as a result of the demand of the task.

Through the psychological behavior of the participants, it is observed that both the number of successes and the reaction times increased after training in the two age groups. However, after training, the number of correct answers in younger adults reached almost 75% compared to those of the older ones that reached a little more than 50%. These results are consistent with an extensive body of information that supports a greater neurobiological decline that accompanies aging and explains why older adults obtain worse results than younger adults in cognitive performance test (Raz & Rodrigue, 2006; Rieck et al., 2017). However, aging studies reveal large inter-individual differences in cognitive performance where older adults' cognitive performance may equal that of younger adults with training and practice (Carmen Requena, Turrero, & Ortiz, 2016). In this sense, the ACTIVE longitudinal study shows that older subjects who receive cognitive training maintain an improved capacity to reason above the baseline for ten years (Rebok et al., 2014).

The increased reaction times after training, specifically in the younger group, contradicts the hypothesis stated in the present study, which was based on the usual assumption that training an ability implies the diminution of the time required for its processing. However, when the peculiarities of the type of trained reasoning are taken into account, the increase in processing time is an index of robust cerebral consequences of training. The reasoning process applied by subjects after training is a computational step-by-step procedure which is fully explicit and compositional. That is, subjects must first process the cards composing the items, then combine them and apply the definition of a Set. This is a well known recursive or computational task (Boolos, Burgess, & Jeffrey, 2002) which consumes time as a linear function of its logical and relational complexity. In neuroscientific literature there are only some initiatory studies on neural realizations of compositional processes in the brain (Franklin & Frank, 2018; Carlo Reverberi, Görden, et al., 2012).

Therefore, while in the untrained (basal) evaluation the subject induced which rules could be applied without clues, in the trained version the subject computed or applied deductive rules in a recursive and compositional way. Trained subjects did not need to grope for heuristic shortcuts as they had to in the basal evaluation. In this case, increased time is consequently an evidence of the effect of training.

The results in the source localization show a greater cerebral activation in the basal evaluation (which is more demanding) in both age groups. Bilateral cooperation is present in the realization of the basal evaluation, but the activation in the group of younger adults is located in the frontal areas, while in the group of older adults the activation affects posterior as well as anterior areas (see Figures 5.3.h y 5.3.i). In this case, the reviewed literature (Lighthall, Huettel, & Cabeza, 2014) attributes this kind of over-recruitment to a compensatory activation that allows a task to be successfully carried out. It is important to note that in the basal evaluation the subject must discover the rules that fit the elements of each item. Therefore, the basal evaluation involves greater use of cerebral and cognitive resources than if the instructions of the task are already known. In the case of older adults, both perceptive resources and more complex abstract resources are used in the basal evaluation, which contradicts the results of the reviewed literature (Grady et al., 1994). In particular, some investigations found that due to the loss of sensory acuity, there was a decrease in the activation of anterior areas in favor of the activation of posterior areas (Ansado et al., 2012; Davis, Dennis, Daselaar, Fleck, & Cabeza, 2008). This loss means that basic cognitive operations and familiar tasks become more complex for older adults, and they have to relearn new modulations of brain activity and cognitive resources. However, the fact that the task of the study is visual explains in part why there is brain activity in the anterior areas.

The localization of sources of brain activity after training in younger adults goes from being bilateral to focal. In particular, activation is now focused in the left medial angular gyrus, temporal and frontal areas and the left superior frontal. Other investigations also related these cerebral areas to deductive reasoning (Baggio et al., 2016). Therefore, the results show that the estimate of the demand of the task post-training in this group has decreased with respect to the baseline task. In the case of

older adults, the training does not cause such remarkable brain activity changes, and the strategy of bilateral activation of anterior and posterior areas is maintained. In particular, the parietal and fronto-orbital areas are activated, which again produces a wide overlap between the perceptual and abstract resources also used in the basal evaluation. The surprising lower brain activation post-training with respect to the basal evaluation contradicts hypothesis (b) about older adults. One explanation could be a ceiling effect linked to high levels of demand in older adults (Rieck et al., 2017). That is, when older adults face a demanding task that is beyond their capacity, their performance level and brain activity both decrease (Rieck et al., 2017). However, the better cognitive results and the fact that the activation in the two groups is lower after training is proof of the effect of training on cognitive and cerebral activity.

In summary, bilaterality may be a marker of how the brain adapts to maintain cognitive function in demanding tasks in both age groups. However, the differential bilateral locations across age groups indicate that the tendency of the brain to modulate is determined by age. One limitation of the study concerns the fact that all tasks are visual, thus restricting the possibility of verifying if posterior activation in older adults is due to the visual tasks. The high demand of the tasks and the short training period of the study may explain why older subjects improved 20% less than younger adults. Future research should replicate these results with non-visual tasks and longer training periods to profoundly understand the benefits obtained from practice and training at a neurological level.

Referencias Bibliográficas

Allwein, G., & Barwise, J. (1996). Logical reasoning with diagrams. (G. Allwein & J. Barwise, Eds.) (Vol. 6). New York: Oxford University Press.

Álvarez Merino, P., Requena Hernández, C., & Salto Alemany, F. (2016). La integración más que la edad influye en el rendimiento del razonamiento deductivo. *International Journal of Developmental and Educational Psychology. Revista INFAD de Psicología*, 1(2), 221. <https://doi.org/10.17060/ijodaep.2016.n2.v1.569>

- Ansado, J., Monchi, O., Ennabil, N., Faure, S., & Joannette, Y. (2012). Load-dependent posterior–anterior shift in aging in complex visual selective attention situations. *Brain Research*, *1454*, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2012.02.061>
- Baggio, G., Cherubini, P., Pischedda, D., Blumenthal, A., Haynes, J.-D., & Reverberi, C. (2016). Multiple neural representations of elementary logical connectives. *NeuroImage*, *135*, 300–310. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.04.061>
- Barulli, D., & Stern, Y. (2013). Efficiency, capacity, compensation, maintenance, plasticity: emerging concepts in cognitive reserve. *Trends in Cognitive Sciences*, *17*(10), 502–509. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.08.012>
- Beatty, E., & Vartanian, O. (2015). The prospects of working memory training for improving deductive reasoning. *Frontiers in Human Neuroscience*, *9*, 56. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00056>
- Boolos, G., Burgess, J., & Jeffrey, R. (2002). *Computability and logic* (4th ed.). Cambridge: Cambridge university press.
- Cabeza, R. (2002). Hemispheric asymmetry reduction in older adults: The HAROLD model. *Psychology and Aging*, *17*(1), 85–100. <https://doi.org/10.1037//0882-7974.17.1.85>
- Cappell, K., Gmeindl, L., & Reuter-Lorenz, P. (2010). Age differences in prefrontal recruitment during verbal working memory maintenance depend on memory load. *Cortex*, *46*(4), 462–473. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2009.11.009>
- Davis, S., Dennis, N., Daselaar, S., Fleck, M., & Cabeza, R. (2008). Que PASA? The Posterior-Anterior Shift in Aging. *Cerebral Cortex*, *18*(5), 1201–1209. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhm155>
- Dew, I., Buchler, N., Dobbins, I., & Cabeza, R. (2012). Where Is ELSA? The Early to Late Shift in Aging. *Cerebral Cortex*, *22*(11), 2542–2553. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr334>

- Folstein, M., Folstein, S., & McHugh, P. (1975). "Mini-mental state": a practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*, 12(3), 189–198.
- Franklin, N., & Frank, M. (2018). Compositional clustering in task structure learning. *PLOS Computational Biology*, 14(4), e1006116. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006116>
- Gomez-Pilar, J., Poza, J., Bachiller, A., Gómez, C., Molina, V., & Hornero, R. (2015). Neural Network Reorganization Analysis During an Auditory Oddball Task in Schizophrenia Using Wavelet Entropy. *Entropy*, 17(12), 5241–5256. <https://doi.org/10.3390/e17085241>
- Grady, C., Maisog, J., Horwitz, B., Ungerleider, L., Mentis, M., Salerno, J., ... Haxby, J. (1994). Age-related changes in cortical blood flow activation during visual processing of faces and location. *The Journal of Neuroscience*, 14(3), 1450–1462. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.14-03-01450.1994>
- Grandi, F., & Tirapu-Ustárroz, J. (2017). Neurociencia cognitiva del envejecimiento: modelos explicativos. *Revista Española de Geriatría y Gerontología*, 52(6), 326–331. <https://doi.org/10.1016/j.regg.2017.02.005>
- Gutchess, A., Welsh, R., Hedden, T., Bangert, A., Minear, M., Liu, L., & Park, D. (2005). Aging and the Neural Correlates of Successful Picture Encoding: Frontal Activations Compensate for Decreased Medial-Temporal Activity. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(1), 84–96. <https://doi.org/10.1162/0898929052880048>
- Lancaster, J., Woldorff, M., Parsons, L., Liotti, M., Freitas, C., Rainey, L., & Fox, P. (2000). Automated Talairach Atlas labels for functional brain mapping. *Human Brain Mapping*, 10(3), 120–131. [https://doi.org/10.1002/1097-0193\(200007\)10:3<120::AID-HBM30>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/1097-0193(200007)10:3<120::AID-HBM30>3.0.CO;2-8)
- Lighthall, N., Huettel, S., & Cabeza, R. (2014). Functional Compensation in the Ventromedial Prefrontal Cortex Improves Memory-Dependent Decisions in

- Older Adults. *Journal of Neuroscience*, 34(47), 15648–15657. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2888-14.2014>
- Makeig, S., Debener, S., Onton, J., & Delorme, A. (2004). Mining event-related brain dynamics. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(5), 204–210. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.03.008>
- Markovits, H., Brisson, J., de Chantal, P.-L., & St-Onge, C.-M. (2016). Elementary schoolchildren know a logical argument when they see one. *Journal of Cognitive Psychology*, 28(7), 877–883. <https://doi.org/10.1080/20445911.2016.1189918>
- Mazziotta, J., Toga, A., Evans, A., Fox, P., Lancaster, J., Zilles, K., & Mazoyer, B. (2001). A probabilistic atlas and reference system for the human brain: International Consortium for Brain Mapping (ICBM). *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 356(1412), 1293–1322. <https://doi.org/10.1098/rstb.2001.0915>
- Mercier, H. (2016). The Argumentative Theory: Predictions and Empirical Evidence. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(9), 689–700. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2016.07.001>
- Opdebeeck, C., Martyr, A., & Clare, L. (2016). Cognitive reserve and cognitive function in healthy older people: a meta-analysis. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 23(1), 40–60. <https://doi.org/10.1080/13825585.2015.1041450>
- Osorio, A., Fay, S., Pouthas, V., & Ballesteros, S. (2010). Ageing affects brain activity in highly educated older adults: An ERP study using a word-stem priming task. *Cortex*, 46(4), 522–534. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2009.09.003>
- Pascual-Marqui, R., Biscay, R., Bosch-Bayard, J., Lehmann, D., Kochi, K., Kinoshita, T., & Sadato, N. (2014). Assessing direct paths of intracortical causal information flow of oscillatory activity with the isolated effective coherence (iCoh). *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00448>

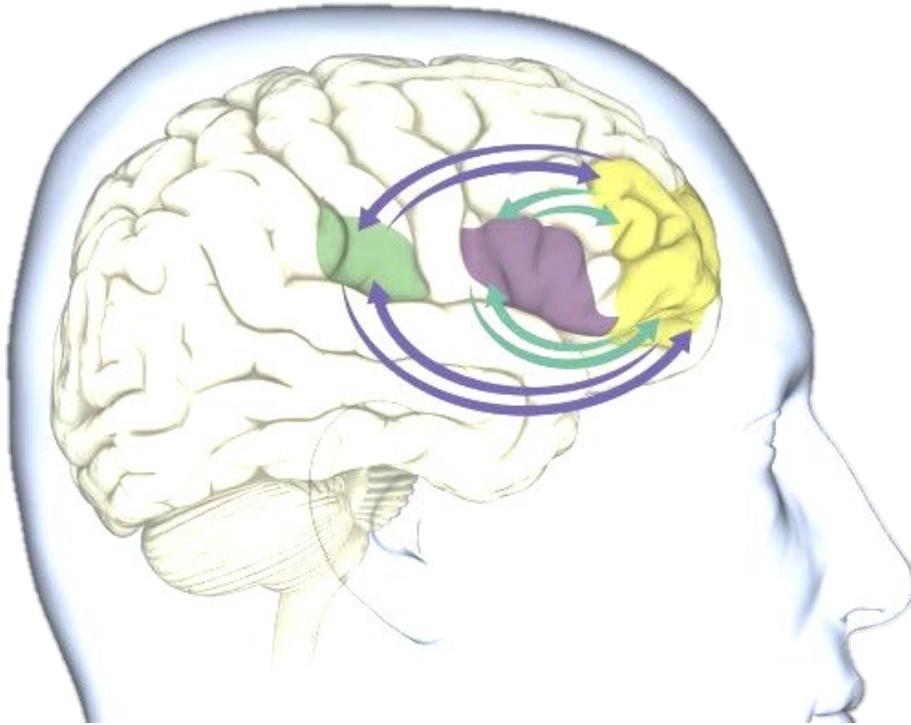
- Payer, D., Marshuetz, C., Sutton, B., Hebrank, A., Welsh, R., & Park, D. (2006). Decreased neural specialization in old adults on a working memory task. *NeuroReport*, 17(5), 487–491. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000209005.40481.31>
- Raz, N., & Rodrigue, K. (2006). Differential aging of the brain: Patterns, cognitive correlates and modifiers. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 30(6), 730–748. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2006.07.001>
- Rebok, G., Ball, K., Guey, L., Jones, R., Kim, H.-Y., King, J., & Willis, S. (2014). Ten-Year Effects of the Advanced Cognitive Training for Independent and Vital Elderly Cognitive Training Trial on Cognition and Everyday Functioning in Older Adults. *Journal of the American Geriatrics Society*, 62(1), 16–24. <https://doi.org/10.1111/jgs.12607>
- Requena, C., Turrero, A., & Ortiz, T. (2016). Six-Year Training Improves Everyday Memory in Healthy Older People. Randomized Controlled Trial. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2016.00135>
- Reuter-Lorenz, P., Jonides, J., Smith, E., Hartley, A., Miller, A., Marshuetz, C., & Koeppe, R. (2000). Age Differences in the Frontal Lateralization of Verbal and Spatial Working Memory Revealed by PET. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(1), 174–187. <https://doi.org/10.1162/089892900561814>
- Reverberi, C., G6rger, K., & Haynes, J.-D. (2012). Compositionality of Rule Representations in Human Prefrontal Cortex. *Cerebral Cortex*, 22(6), 1237–1246. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr200>
- Rieck, J., Rodrigue, K., Boylan, M., & Kennedy, K. (2017). Age-related reduction of BOLD modulation to cognitive difficulty predicts poorer task accuracy and poorer fluid reasoning ability. *NeuroImage*, 147(1), 262–271. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.12.022>

Schneider-Garces, N., Gordon, B., Brumback-Peltz, C., Shin, E., Lee, Y., Sutton, B., & Fabiani, M. (2010). Span, CRUNCH, and Beyond: Working Memory Capacity and the Aging Brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(4), 655–669. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21230>

Stebbins, G., Carrillo, M., Dorfman, J., Dirksen, C., Desmond, J., Turner, D., & Gabrieli, J. (2002). Aging effects on memory encoding in the frontal lobes. *Psychology and Aging*, 17(1), 44–55. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.17.1.44>

Thatcher, R., North, D., & Biver, C. (2014). LORETA EEG phase reset of the default mode network. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00529>

Tommerdahl, J., McKee, W., Nesbitt, M., Ricard, M., Biggan, J., Ray, C., & Gatchel, R. (2016). Do Deductive and Probabilistic Reasoning Abilities Decline in Older Adults? *Journal of Applied Biobehavioral Research*, 21(4), 225–236. <https://doi.org/10.1111/jabr.12056>



⑥ Conclusiones

6. CONCLUSIONES

Se presentan las cuatro conclusiones principales en relación a los cuatro objetivos principales propuestos en la Tesis Doctoral. En cada uno de los artículos publicados se detallan ulteriores conclusiones que conciernen tanto a objetivos secundarios como a conclusiones sobrevenidas en el curso de la investigación.

CONCLUSIÓN 1: LA DEDUCTIVIDAD ES UNA DIMENSIÓN MEDIBLE DEL RAZONAMIENTO.

La primera aportación de la Tesis verifica el objetivo primero realizando un instrumento de medida de deductividad de inferencias tanto lingüísticas como visuales. Se concibe y diseña un test elaborado para la evaluación cuantitativa y cualitativa de las habilidades de razonamiento propiamente deductivo. Se ha podido concluir, que determinadas propiedades tanto informacionales como experimentales capturan características propiamente deductivas de inferencias que otras medidas de razonamiento no desvelan. Entre estas propiedades destacan propiedades formales bien conocidas como la validez (lógica o probabilística) y la computabilidad, y propiedades definidas *ad hoc* para este instrumento como es el caso de la correlación entre complejidad lógica y relacional. [Correlación entre número de variables y complejidad lógica] y la integración entre premisas y conclusiones entendida como compartición de variables tanto lingüísticas como visuales.

Se ha concluido que la medida es psicométricamente válida y fiable, permitiendo distinguir entre formas estrictas de deducción (que son válidas) y formas no estrictas (que no lo son). Puesto que todas las medidas se aplican tanto a soportes verbales y lingüísticos como visuales o plásticos, se han puesto las bases para comprobar experimentalmente que las inferencias deductivas comparten propiedades atravesando distintos soportes. La aplicación de la medida ha permitido concluir que las diferencias asociadas a la edad entre los razonadores no afectan a los procesos básicos aunque sí muestran características idiosincráticas atribuibles a la edad. La aplicación de la medida permite concluir el alcance notable de convenciones y

supuestos tácitos o conversacionales en la práctica deductiva, concluyendo que las personas no distinguen con rigor entre las implicaciones lógicas y las implicaturas conversacionales, atribuyendo prelación a sus creencias incluso falaces sobre las conclusiones válidas pero poco creíbles. Además, la aplicación de la medida ha permitido comprobar el alcance de la integración de premisas, que ha demostrado ser una variable más explicativa de la varianza que la validez. Por lo tanto, podemos concluir que la deducción estricta tiene un alcance sistemático limitado en el razonamiento humano, aunque sí parece tener un papel de monitorizador de la inferencia.

Respecto de las distintas concepciones psicológicas del razonamiento deductivo, la aplicación directa de la medida no ha permitido favorecer ni la teoría de los modelos mentales, ni la teoría de la lógica mental ni tampoco la teoría heurística. Sin embargo, los resultados de las mediciones obtenidas ofrecen constricciones básicas sobre cualquier concepción de la deducción consistente con las propiedades medidas. En particular, las hipótesis que favorecían entender el proceso psicológico de deducir en términos de la lógica mental se han visto constreñidas o limitadas en su alcance.

La investigación doctoral realizada en este punto sobre medidas deductivas ha abierto una línea de investigación fructífera que es empleada tanto por el grupo de investigación de la doctoranda como por otros grupos (véase Universidad Nacional de Colombia, 2019).

CONCLUSIÓN 2: DETERMINACIÓN DE UN POTENCIAL ASOCIADO AL CÓMPUTO CEREBRAL DE PROCESOS DEDUCTIVOS ESTRICTOS.

En la literatura neurocientífica a menudo se habla de “procesamiento” cerebral de información como un cómputo o cálculo cerebral. En general, estas expresiones son simples metáforas en ausencia de una descripción matemática precisa del proceso de cómputo. En este estudio se han planteado procesos explícitamente recursivos o computacionales (repetición, identidad, orden, negación) progresivamente complejos para medir las correlaciones entre la complejidad lógica de la tarea y la complejidad neural de su procesamiento. El número y orden de las incongruencias

determinan la complejidad neural del procesamiento semántico. La correlación lineal entre estas variables, aseguraría la composicionalidad en el procesamiento neural de los estímulos complejos.

Se ha determinado mediante el análisis de la actividad eléctrica cerebral generada por estímulos complejos que el cerebro reacciona a éstos de manera no arbitraria, sino que monitoriza la repetición, el número y el orden de estímulos en función del cómputo de incongruencias que se presentan. Mediante un protocolo experimental que incorpora estímulos visuales semánticamente complejos, se han corroborado efectos N400 ya conocidos y verificado un efecto P600 asociado al orden, la repetición y el número de estímulos. Los resultados muestran que las incongruencias se acumulan y producen mayor intensidad o amplitud en la actividad cerebral. Por el contrario, la doble incongruencia no se procesa como una negación, sino que neuralmente es una incongruencia más. Mientras que la negación de la negación afirma, la incongruencia de la incongruencia no es congruente. De este modo el cerebro ante estas tareas básicas de procesamiento parece proceder composicionalmente y carecer de medios para procesar negaciones. En consecuencia, los resultados son consistentes con la hipótesis de que el cerebro semi-computa (responde positivamente o no responde) los estímulos complejos. Estos resultados de composicionalidad en el procesamiento neural son coherentes con las conclusiones independientes de Reverberi (2012b) y Baggio (2016) que también encuentran procesos literalmente computacionales en la actividad cerebral.

Hay importantes conclusiones específicas para cada variable. Respecto de la repetición, la complejidad del estímulo deja rastro en la onda P600 en la comparación de las condiciones de repetición de congruencias versus incongruencias, donde la acumulación de hasta tres incongruencias se refleja en la mayor modulación de la respuesta eléctrica. La diferencia de amplitud entre las condiciones de orden pone de manifiesto que el orden de los estímulos importa o condiciona la complejidad neural del procesamiento. Este resultado contradice resultados lingüísticos de Kutas y Federmeier (2011), que no encontraron repercusiones eléctricas medibles en los cambios de orden. La distinta modulación de la respuesta cerebral en los casos de identidad y repetición se confirma sólo tardíamente tras 600ms y es consistente con

las propuestas del modelo MUC, en el que la identidad a nivel proposicional requiere una mayor complejidad de procesamiento que la sola repetición.

CONCLUSIÓN 3. DATOS NEUROELÉCTRICOS FAVORECEN LA HIPÓTESIS DE MONTI.

El estudio neuroeléctrico del procesamiento semántico ofrece cuatro nuevos argumentos que favorecen la hipótesis de Monti en relación a la naturaleza del soporte neural del razonamiento deductivo. Los argumentos no aportan evidencias definitivas en favor de una concepción de la deducción, pero sí ofrecen una contribución de referencia al estado de la cuestión.

1. Doble Procesamiento.

El reprocesamiento asociado con la P600 está acreditado por la literatura previa en casos de dificultades sintácticas causadas por infracciones de la gramática, dificultades sintácticas en oraciones complejas y dificultades para seleccionar la parte ambigua de una oración. Los resultados de esta Tesis extienden la evidencia experimental del reprocesamiento al caso no lingüístico de imágenes compuestas. Los datos de la investigación confirman la presencia del doble procesamiento en todas las condiciones: repetición, identidad, orden, incongruencia (ver detalles sobre las diferencias en amplitud e intensidad en ambos procesamientos en el estudio número 2 titulado “Localización cerebral del procesamiento semántico”, páginas 133-162).

Por otra parte, el doble procesamiento se ha encontrado recientemente en estudios que aseguran que el efecto P600 es sensible al procesamiento de reglas de tipo lógico deductivo (Baggio et al., 2016) así como en estudios en curso por el grupo de investigación de la doctoranda.

2. Formalidad

La literatura ha asociado la propia necesidad del reprocesamiento semántico a la consideración de la estructura formal del significado en lugar de su contenido. En los casos de las variables de orden, identidad, repetición e incongruencia, el número y el orden de incongruencias determina en el experimento la amplitud e intensidad de la

respuesta eléctrica en todas las condiciones analizadas, por lo que parece tratarse de un cómputo independiente del contenido de las incongruencias. Estos resultados son consistentes con investigaciones que asocian la P600 con el procesamiento basado en reglas.

Por otra parte, el procesamiento de los operadores recursivos de repetición, orden e identidad es él mismo un proceso aparentemente recursivo (en concreto semi-recursivo) y composicional, por lo que presenta características típicas de procesos formales.

3. Localización frontal

La diferencia de activación en el área frontal en la doble congruencia/incongruencia implica que el tipo de procesamiento involucrado es formal (ver Figura 5.3.d). Por otra parte, las diferencias significativas de amplitud en el lóbulo frontal se explican por el tipo de procesamiento semántico de los estímulos complejos en relación con el contexto (ver Figura 5.3.c). En particular, esta morfología involucra a un tipo de procesamiento formal que requiere la intervención de procesos de control atencional.

La solución inversa de las condiciones y los análisis descriptivos (Figura 5.3.e) ponen de manifiesto la presencia de activación en el giro frontal superior derecho y medial izquierdo en todas las condiciones. El giro temporal superior izquierdo se muestra activo en las condiciones 2 y 4. La implicación bilateral del área frontal en todas las condiciones nos lleva a inferir que tanto el contenido como la estructura formal intervienen en el procesamiento de los ensayos presentados.

4. Independencia del soporte

La investigación desarrollada en la Tesis se centra en formatos visuales, e incluso en ellos encontramos que las áreas involucradas en el reprocesamiento son frontales y no se corresponden con las predichas por un formato visual que la hipótesis de Prado situaría en áreas posteriores y espaciales. Aunque la investigación doctoral no compara soportes visuales y lingüísticos ni aporta evidencias directas de la presencia de elementos formales de procesamiento que resultasen independientes del soporte, sin embargo, sí ha permitido esclarecer que la independencia del soporte

será, si se acredita, una evidencia definitiva en favor de la tesis de Monti (2017) y no de la tesis de Prado (2018).

CONCLUSIONES 4 Y 5. EL ENTRENAMIENTO DEDUCTIVO MEJORA EL RENDIMIENTO. BALANCE INCIERTO ENTRE LOS EFECTOS DE LA EDAD Y LA DEMANDA DE LA TAREA.

El entrenamiento deductivo tiene un efecto sobre el número de aciertos, el tiempo de reacción y la modulación de la actividad cerebral. Aumenta el número de aciertos tanto en mayores como en jóvenes, en los que se triplica después del entrenamiento. Los tiempos de reacción y la modulación de la activación se ven afectados por la edad: mientras que en los jóvenes aumentan los tiempos de reacción y se focaliza la activación cerebral en el área frontal izquierda, en los mayores los tiempos de reacción disminuyen a la vez que la activación se localiza tanto en áreas frontales como occipitales.

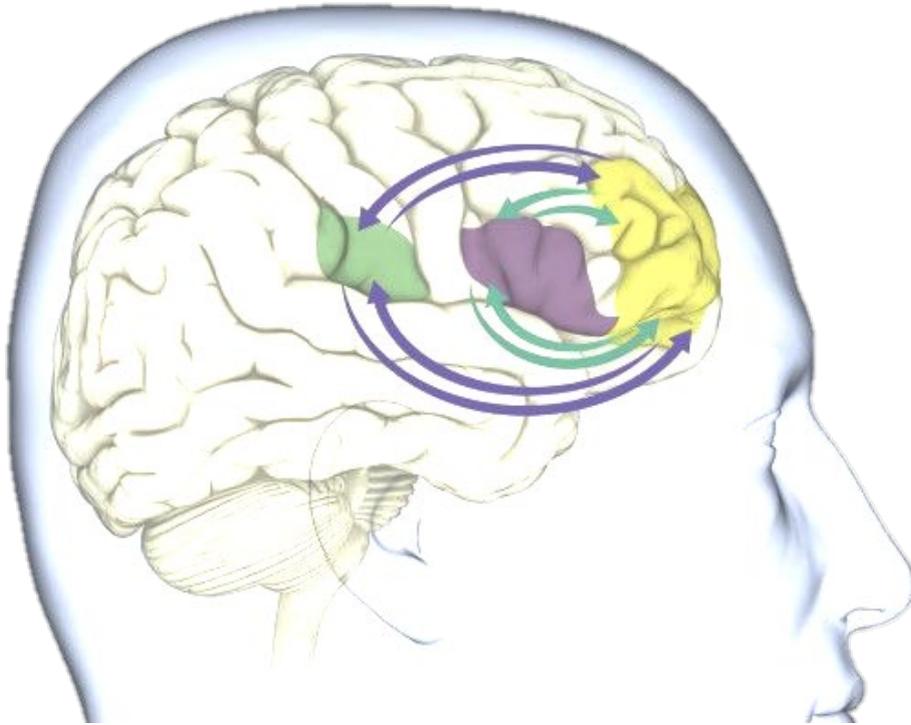
El incremento del tiempo de reacción después del entrenamiento, que se da específicamente en el grupo de jóvenes contradice el supuesto habitual de que el entrenamiento de una habilidad disminuye el tiempo requerido para su procesamiento. Sin embargo, en este caso, las peculiaridades del tipo de razonamiento entrenado convierten el aumento del tiempo de procesamiento en un índice robusto de impacto del entrenamiento sobre la actividad cerebral. El proceso de razonamiento aplicado a sujetos después del entrenamiento es un procedimiento computacional recursivo que es plenamente explícito y composicional. Esto es, los sujetos deben primero procesar las cartas que componen cada ítem, para después combinarlas y aplicar la definición de set. Esta es una tarea reconocidamente recursiva y composicional que consume tiempo en función directa de la complejidad lógica y relacional de la tarea. Por este motivo el aumento del tiempo de reacción indica que el entrenamiento es exitoso. Obsérvese además que en la literatura neurocientífica hay muy pocos estudios de procesos neurales que sean ellos mismos procesos recursivos y composicionales en el cerebro.

Según los modelos predominantes de envejecimiento cerebral, estos resultados se explican en función de la demanda de la tarea. El rendimiento en jóvenes se analiza y

evalúa en términos de eficiencia, mientras que en los mayores se evalúa en términos de eficacia. La eficiencia indica el aumento del rendimiento y la disminución de la activación, mientras que la eficacia simplemente indica el aumento del rendimiento.

Merece especial atención la activación de regiones orbitofrontales en el caso de los jóvenes después del entrenamiento deductivo. La literatura identifica esta región con los efectos inhibitorios del entrenamiento sobre los sesgos de razonamiento deductivo. Por consiguiente, cuando se habla en términos de eficiencia, es necesario considerar la activación de esta región. Dado que con la edad aumenta la tendencia a realizar inferencias perceptivas a la vez que disminuye la inhibición para aplicar reglas abstractas, se plantea la hipótesis de que una mayor dosis de entrenamiento llegase a afectar la activación cerebral de esta región orbitofrontal.

Globalmente considerados, los resultados cerebrales nos permiten concluir que los adultos mayores tienen recursos cerebrales menos eficientes para el procesamiento cognitivo. El rendimiento post-entrenamiento entre los sujetos mayores es comparativamente más pobre que el de los adultos jóvenes, evidenciando que los adultos mayores disponen de una capacidad reducida para afrontar demandas cognitivamente exigentes. Además, la tendencia a la menor activación cerebral y al peor rendimiento en adultos mayores tanto en la tarea basal como en la tarea entrenada, puede interpretarse como un fenómeno dependiente de la edad, más que como un resultado del elevado nivel de demanda cognitiva de la tarea.

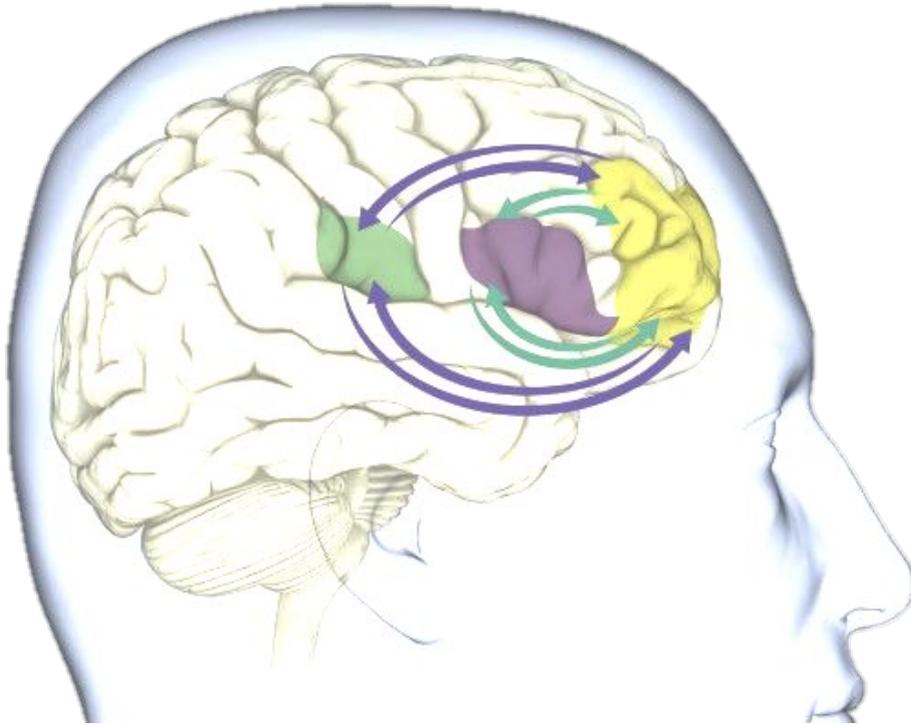


⑦ Limitaciones y perspectivas futuras

7. LIMITACIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Entre las limitaciones del estudio cabe destacar que no se han contrastado diferentes soportes de razonamiento (agentuales, visuales y lingüísticos). En este sentido, en futuras investigaciones será necesario desarrollar protocolos que evalúen si los soportes influyen en el tiempo y la localización de la activación cerebral. Para ello, la técnica de EEG es un buen método para analizar tiempo-frecuencia en procesos cognitivos como el razonamiento deductivo. Por otro lado, técnicas como MEG tienen una apropiada resolución espacial para localizar la actividad cerebral.

Otra limitación del estudio es la falta de ajuste de la demanda de la tarea a las características de los participantes. En particular, la alta demanda de la tarea antes y después del entrenamiento explica que los adultos mayores abandonen las tareas en lugar de enfrentarla. Esta actitud ante la tarea, no permite colegir que la activación bilateral en adultos mayores explique el declive cognitivo asociado a la edad. Más bien, que los adultos mayores abandonen la tarea podría relacionarse con la falta de ajuste entre la demanda de la tarea y las características de los participantes.



⑧ Conclusions

8. CONCLUSIONS

This Doctoral research presents four main general conclusions related to the four main objectives proposed in the Thesis project. The three published papers offer further details on achieved secondary objectives and additional conclusions supervened in the course of the research.

CONCLUSION 1: DEDUCTIVITY IS A MEASURABLE DIMENSION OF REASONING.

The first contribution of the Thesis verifies the first general objective, namely the creation of a measure instrument for deductive inferences, both in linguistic and visual contexts. A test has been conceived and designed to qualitatively and quantitatively assess strictly deductive reasoning abilities. It has been concluded that certain specific informational and experimental properties capture strictly deductive features which other conventional reasoning measures are unable to reveal. Among these properties we highlight well known formal features such as logical or probabilistic validity and computability, and also properties defined *ad hoc* for this instrument, such as the correlation between logical and relational complexity (correlation between the number of variables and the logical complexity) and the integration among premises and their deductive conclusions (where integration is measured by means of the number of linguistic or visual variables shared by premises and conclusions).

The experimental research has concluded that the measure is psychometrically valid and reliable, allowing for the distinction between strict forms of deduction (valid inferences) and non-strict forms of deduction (usual or credible conclusions which are not valid). Since all measures in the deductivity test apply to both verbal or linguistic as also visual or plastic environments, this measure sets up the bases to experimentally verify or refute the existence of specifically deductive inferences across linguistic and visual domains.

The application of the deductivity test has offered a number of results, such as verifying that age-related differences among reasoners do not affect basic reasoning

processes, even if in fact age is in the origin of idiosyncratic reasoning. Another application of the measure allows us to verify the effect scope of conventions, tacit assumptions and conversational implicatures in deductive practice, concluding that persons do not distinguish rigorously between logical and pragmatical implications and moreover they preempt non-valid but credible conclusions even if they are fallacious. Finally, the test has been applied to measure the impact of premiss integration, which in fact is the variable which accounts for a greater proportion of variance and is more explicative than other variables such as validity. Hence, we conclude that strict deduction has a limited systematic scope in human rationality, even if it still plays a relevant role in monitoring inference.

Regarding rival psychological conceptions of deduction, the direct application of the test has not been able to favor mental models theories over heuristic or mental logic theories of reasoning. However, measured results pose basic constrictions on any conception of deduction consistent with the measured properties, in particular, the hypotheses which favored mental logic have been constrained or restricted in their initial scope.

The Doctoral research carried over on deductive measures has opened a research line which is being used by the research groups in Spain and abroad (Universidad Nacional de Colombia, 2019).

CONCLUSION 2: DETERMINATION OF A BRAIN POTENTIAL ASSOCIATED WITH THE CEREBRAL COMPUTATION OF STRICT DEDUCTIVE PROCESSES.

In the neuroscientific literature it is often mentioned the cerebral “processing” of information as a computation or brain calculus. In general, these expressions are merely metaphorical, since we lack a precise understanding of brain computational procedures. In this study explicitly recursive or computational procedures such as repetition, identity, order and negation are scrutinized to measure the eventual correlations between the logical complexity of computational tasks and the neural complexity of their processing. The experiment verifies if the number and ordering of incongruences determines the neural complexity of the semantic processing.

Notice that the linear correlation between these two variables will establish compositionality and computability of the neural processing of complex stimuli.

The analysis of the brain electrical activity generated by complex visual stimuli shows that the brain does not react randomly to complex stimuli, but rather monitors the repetition, number and order of stimuli as a function of the brain computation of incongruences. An improved experimental protocol incorporates semantically complex visual stimuli corroborating already known N400 effects and verifying a new P600 effect associated to the order, repetition and number of stimuli. The results show that incongruences accumulate and produce greater intensity and amplitude in brain activity. On the contrary, double incongruence is not processed as a negation but it is neurally treated as an additional incongruency. While the negation of negation affirms, the incongruence of incongruence is not congruent. Therefore, the brain seems to compute the order, repetition and number of incongruences and proceed compositionally in the monitoring of incongruences. This result is consistent with the hypothesis that the brain semi-computes (it answers positively or does not answer) complex stimuli. Other neural compositionality results as those independently obtained by Reverberi (2012) and Baggio (2016), are coherent with these results and they all find literally computational processes in brain activity.

Moreover, there are important specific conclusions for each variable. Concerning repetition, the complexity of the stimulus leaves a trait in the P600 wave and the comparison of the incongruent versus congruent conditions shows the accumulation of until three incongruences which are reflected in the greater cerebral modulation of the electrical answer. Regarding order, the differences in amplitude among the order conditions show that the ordering of stimuli determines the neural complexity of the processing. This result on ordering contradicts previous results by Kutas and Federmeier (2011), who did not find any measurable electrical repercussions in word ordering changes. Finally, the distinct modulation of the cerebral answer in identity and repetition is lately confirmed after 600ms and it is consistent with the MUC model in which identity at a propositional level requires greater intensity and amplitude than mere repetition.

CONCLUSION 3. NEUROELECTRICAL DATA FAVOR FORMAL DEDUCTIVE PROCESSING (MONTI'S HYPOTHESIS)

The neuroelectrical semantic processing offers four new arguments in favor of Monti's Hypothesis on the nature of the neural support of deductive reasoning. The arguments do not offer definitive evidences for one psychological conception of deduction over other ones, but they do offer a contribution to the current state of the art.

1. Double Processing.

The re-processing or double processing associated with the P600 wave is credited by the previous literature in the cases of syntactical difficulties caused by grammatical infractions, syntactical exceptions in complex sentences and difficulties to select ambiguous components in sentences. The results of this Thesis extend the experimental evidence for re-processing to non-linguistic cases such as complex visual images. Research results confirm the presence of double processing in all conditions: repetition, identity, order and incongruence (see details on amplitude and intensity in the two stages of processing in the study number two entitled "Brain localization of semantic processing", pages 133-162).

On the other hand, re-processing has also been found in recent studies confirming a P600 effect due to logical deductive rules.

2. Formality

The literature has associated the very necessity of semantical re-processing to the consideration of formal structure in complex meanings. In the cases of the variables of order, identity, repetition and incongruence, the number and ordering of the incongruences determines in the experiment the amplitude and the intensity of the electrical response in all conditions. For this reason, the computation seems to be independent of the content of the incongruences. These results are consistent with other research associating P600 with the processing based on rules.

Additionally, the processing of recursive operators such as identity, repetition and order is itself an apparently recursive procedure (a semi-recursive one, specifically) and compositional, therefore it presents typical features of formal processes.

3. Frontal Localization

The activation differences in the frontal area in double congruence/incongruence conditions implies that the type of processing involved in these cases is formal (see Figure 4). On the other hand, significant differences in amplitude in the frontal lobe are explained by the kind of semantical processing of complex stimuli in relation with the context (see Figure 3). In particular, this morphology involves a formal processing which requires the intervention of attentional control processes.

The inverse solution of conditions and its descriptive analysis (Figure 5) exhibit the presence of electrical activation in the frontal superior right, medial and left gyrus in all conditions. The temporal superior left gyrus is active in conditions 2 and 4. Since bilateral frontal areas are involved in all conditions, we deduce that both content and formal structure intervene in the neural processing of all items.

4. Format independence

This Doctoral research is focused on visual formats and their re-processing in frontal brain areas (not in visual or spatial posterior areas). While Prado's Hypothesis is hardly consistent with this form of format independence, Monti's Hypothesis coheres with a format independent processing for visual and linguistic items. Even if this work does not compare linguistic and visual formats, and therefore does not offer a direct proof of format independence, the fact that formal areas deal with visual reasoning seems to favor Monti's (2017) Hypothesis over Prado's (2018).

CONCLUSIONS 4 AND 5. DEDUCTIVE TRAINING IMPROVES REASONING PERFORMANCE. EVIDENCE OF NEURAL PLASTICITY. UNCERTAIN BALANCE BETWEEN THE EFFECTS OF AGE AND TASK-DEMANDS

Deductive training produces significant effects on the number of correct inferences, the reaction time and the modulation of cerebral activity. Hit ratios improved after

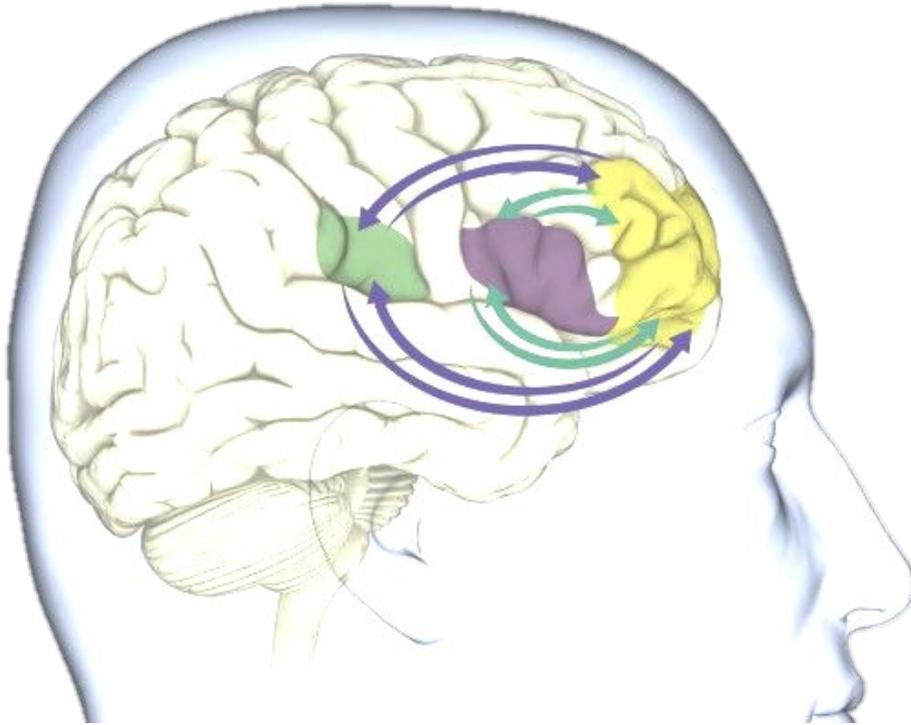
training both in older and in younger adults. Reaction times and modulation of electrical amplitude and intensity are also highly affected by age: while young reasoners improve their reaction time and focus their brain activation in the left frontal area, older reasoners decrease their reaction time and their cerebral activation is localized both in frontal and occipital areas.

The increase in the reaction time after training is exclusively found in the young reasoners group and contradicts the usual assumption that the time required to fulfill a complete task diminishes after training. However, in this case, the peculiarities of the type of trained reasoning transform the increase of time into a robust index of the impact of training on brain activity. The reasoning process after training is a computational recursive procedure which is fully explicit and compositional. This means that subjects must first process the cards composing each item, then combine them and apply the definition of set. This is a clearly recursive and compositional task which consumes time as a linear function of the logical and relational complexity of the task. For this reason, the increase in reaction time is an index of successful training. Moreover, it must be noticed that in the neuroscientific literature there are very few credited neural processes which are themselves recursive and compositional brain events.

According to the prevalent brain aging models, plasticity results are explained in terms of the level of demand of the cognitive task. The performance of young subjects is analyzed and assessed in terms of efficiency while the performance of older subjects is evaluated in terms of efficacy. Efficiency indicates both the increase of performance level and the decrease of brain activation, while efficacy only indicates higher performance rates.

It is worth considering the post-training activation of orbitofrontal regions in the case of young reasoners. The literature identifies this region with inhibitory effects of training over reasoning biases. Therefore, efficiency is accompanied by neural activation in this region. Since age increases the tendency to perform perceptual inferences and diminishes inhibition to apply abstract rules, we hypothesize that a greater dosis of training may have been needed to reach cerebral activation in this orbitofrontal region.

Globally considered, brain results allow us to conclude that older adults have less efficient resources for cognitive processing. Post-training performance levels among older subjects are comparatively lower than their equivalents by younger adults. Additionally, the tendency towards decreased cerebral activation and lower performance among older adults is observed both in the basal and in the trained tasks. For these reasons, both age and task-demand are relevant determinants of neural plasticity, and the balance between them is only beginning to be scientifically known.

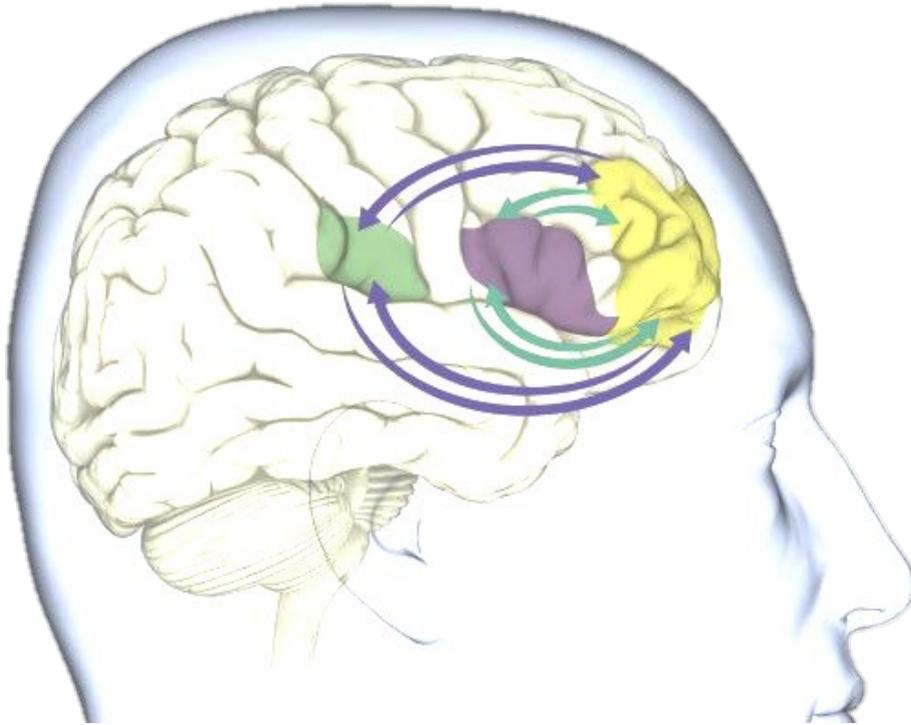


⑨ Limitations and future perspectives

9. LIMITATIONS AND FUTURE PERSPECTIVES

Among the limitations of the study, it should be noted that different supports of reasoning (agentual, visual, and linguistic) have not been contrasted. In this sense, in future investigations, it will be necessary to develop protocols that evaluate whether the supports influence the time and source localization in the brain. For that, the EEG technique is a good method to explore time-frequency in cognitive processes such as deductive reasoning. On the other hand, techniques such as MEG has an appropriate spatial resolution to localize brain activity.

Another limitation of the study is the lack of adjustment of the demand of the task to the characteristics of the participants. In particular, the high demand of the task before and after training, explains that older adults leave tasks instead of facing it. This attitude towards the task, do not allow us to conclude that bilateral activation in older adults explains the cognitive decline associated with age. Rather, that older adults leave the task could be related to the lack of adjustment between the demand for the task and the features of the participants.



⑩ Referencias Bibliográficas

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, J. (2015). Individuos, información y racionalidad imperfecta. *Sociológica México*, 28, 177–200.
- Álvarez-Merino, P., Requena, C., & Salto, F. (2016). Idiosincrasia del razonamiento deductivo en la vejez. In *Avances en ciencias de la educación y del desarrollo*, (p. 231).
- Álvarez-Merino, P., Requena, C., & Salto, F. (2018a). Variables de Medida para el Razonamiento Deductivo. *Revista Iberoamericana de Diagnóstico y Evaluación Psicológica*, 4(9), 59–75. doi: <https://doi.org/10.21865/RIDEP49.4.05>.
- Álvarez-Merino, P., Requena, C., & Salto, F. (2018b). Evidence Linking Brain Activity Modulation to Age and to Deductive Training. *Neural Plasticity*. 2018, 1-10. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/1401579>.
- Álvarez-Merino, P., Requena, C., & Salto, F. (2019). Localización cerebral del procesamiento semántico. *Revista de Neurología*, 69(1), 1-10. doi: <https://doi.org/10.33588/rn.6901.2018458>.
- Baggio, G., Cherubini, P., Pischedda, D., Blumenthal, A., Haynes, J., & Reverberi, C. (2016). Multiple neural representations of elementary logical connectives. *NeuroImage*, 135, 300–310. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.04.061>.
- Baggio, G., Van Lambalgen, M., & Hagoort, P. (2015). Logic as Marr's computational level: Four case studies. *Topics in Cognitive Science*, 7(2), 287–298. doi: <https://doi.org/10.1111/tops.12125>.
- Ball, K., Berch, D., Helmers, K., Jobe, J., & Leveck, M. (2002). Effects of cognitive training interventions with older adults: a randomized controlled trial. *Jama*, 288(18), 2271–2281. doi: [10.1001/jama.288.18.2271](https://doi.org/10.1001/jama.288.18.2271).
- Baltes, P., & Staudinger, U. (1993). The search for a psychology of wisdom. *Current Directions in Psychological Science*, 2(3), 75–81. doi: <https://doi.org/10.1111/1467-8721.ep10770914>.

- Baratgin, J., Douven, I., Evans, J., Oaksford, M., Over, D., & Politzer, G. (2015). The new paradigm and mental models. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(10), 547–548. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.06.013>.
- Blank, I., Kanwisher, N., & Fedorenko, E. (2014). A functional dissociation between language and multiple-demand systems revealed in patterns of BOLD signal fluctuations. *Journal of Neurophysiology*, 112(5), 1105–1118. doi: <https://doi.org/10.1152/jn.00884.2013>.
- Bonnefond, M., Castelain, T., Cheylus, A., & Van der Henst, J. (2014). Reasoning from transitive premises: An EEG study. *Brain and Cognition*, 90, 100–108. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2014.06.010>.
- Bonnefond, M., Kaliuzhna, M., Van der Henst, J., & De Neys, W. (2014). Disabling conditional inferences: An EEG study. *Neuropsychologia*, 56, 255–262. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.01.022>.
- Bonnefond, M., Noveck, I., Baillet, S., Cheylus, A., Delpuech, C., Bertrand, O., Fournier, P., Van der Henst, J. (2012). What MEG can reveal about inference making: The case of if...then sentences. *Human Brain Mapping*, 34(3), 684–697. doi: <https://doi.org/10.1002/hbm.21465>.
- Bonnefond, M., & Van der Henst, J. (2013). Deduction electrified: ERPs elicited by the processing of words in conditional arguments. *Brain and Language*, 124(3), 244–256. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2012.12.011>.
- Braine, D., & O’Brien, P. (1998). *Mental logic*. Psychology Press.
- Brose, A., De Roover, K., Ceulemans, E., & Kuppens, P. (2015). Older adults’ affective experiences across 100 days are less variable and less complex than younger adults’. *Psychology and Aging*, 30(1), 194–208.
- Carey, S. (2009). *The origin of concepts*. Oxford: Oxford University Press.
- Carey, S., Zaitchik, D., & Bascandziev, I. (2015). Theories of Development in Dialog with Jean Piaget. *Developmental Review*, 38, 36–54. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dr.2015.07.003>.

- Carroll, J. (1993). *Human cognitive abilities: A survey of factor-analytic studies*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cesana-Arlotti, N., Martín, A., Téglás, E., Vorobyova, L., Cetnarski, R., & Bonatti, L. (2018). Precursors of logical reasoning in preverbal human infants. *Science*, 359(6381), 1263–1266. doi: 10.1126/science.aao3539.
- Cherniak, C. (1986). *Minimal Rationality*. Cambridge: MIT Press.
- Church, A. (1940). A formulation of the simple theory of types. *The Journal of Symbolic Logic*, 5(02), 56–68. doi: <https://doi.org/10.2307/2266170>.
- Coetzee, J. (2018). *The Roots of Deductive Reasoning: Neuroimaging and Behavioral Investigations*. University of UCLA.
- Coetzee, J., Johnson, M., Wu, A., Iacoboni, M., & Monti, M. (2019). Dissociating language and thought in human reasoning. *BioRxiv*, 336123. doi: <https://doi.org/10.1101/336123>.
- Coetzee, J., & Monti, M. (2018). At the core of reasoning: Dissociating deductive and non-deductive load. *Human Brain Mapping*, 39(4), 1850–1861. doi: <https://doi.org/10.1002/hbm.23979>.
- Coetzee, J., Monti, M., Iacobini, M., Wu, A., & Johnson, M. (2019). Separability of logic and language: a TMS study. *Brain Stimulation*, 12(2), 543–566. doi: <https://doi.org/10.1016/j.brs.2018.12.792>
- Colberg, M., Nester, M., & Trattner, M. (1985). Convergence of the inductive and deductive models in the measurement of reasoning abilities. *Journal of Applied Psychology*, 70(4), 681–694. doi: <http://dx.doi.org/10.1037/0021-9010.70.4.681>.
- Cutmore, T., Halford, G., Wang, Y., & Ramm, B. (2015). Neural correlates of deductive reasoning: An ERP study with the Wason Selection Task. *International Journal of Psychophysiology*, 98(3), 381–388. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2015.07.004>.

- Draganski, B., & May, A. (2008). Training-induced structural changes in the adult human brain. *Behavioural Brain Research*, 192(1), 137–142. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2008.02.015>.
- Evans, P. (2012). *Embedded autonomy: States and industrial transformation*. *Embedded Autonomy: States and Industrial Transformation*. Princeton, New Jersey.
- Evans, J., & Over, D. (2013). Reasoning to and from belief: Deduction and induction are still distinct. *Thinking & Reasoning*, 19(3–4), 267–283. doi: <https://doi.org/10.1080/13546783.2012.745450>.
- Evans, J., Thompson, V., & Over, D. (2015). Uncertain deduction and conditional reasoning. *Frontiers in Psychology*, 6. doi: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00398>.
- Fischer, K., Rose, L., & Rose, S. (2007). Growth cycles of mind and brain: Analyzing developmental pathways of learning disorders. *Mind, Brain, and Education in Reading Disorders*, 101–132.
- Fjell, A., Grydeland, H., & Krogstad, S. (2015). Development and aging of cortical thickness correspond to genetic organization patterns. *National Acad Sciences*, 112(50), 15462–15467. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1508831112>.
- García-Madruga, J., Gutiérrez, F., Carriedo, N., & Moreno, S. (2002). Mental models in deductive reasoning. *The Spanish Journal of Psychology*, 5(2), 125–140. doi: <https://doi.org/10.1017/S1138741600005904>.
- Gerken, M. (2012). Univocal Reasoning and Inferential Presuppositions. *Erkenntnis*, 76(3), 373–394. doi: <https://doi.org/10.1007/s10670-011-9281-3>.
- Gernain, L., & Lerond, M. (2017). *Los test psicológicos de aptitud y personalidad*. Madrid: Parkstone International.
- Gigerenzer, G. (2000). *Adaptive thinking: Rationality in the real world*. New York: Oxford University Press.

- Gigerenzer, G. (2008). Why heuristics work. *Perspective on Psychological Science*, 3(1), 1–29. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6916.2008.00058.x>.
- Gigerenzer, G., & Selten, R. (2001). *Bounded rationality: The adaptive toolbox*. (G. Gigerenzer & R. Selten, Eds.). Cambridge: MIT Press.
- Gödel, K. (1930). Die vollständigkeit der axiome des logischen funktionenkalküls. *Monatshefte Für Mathematik*, 37(1), 349–360. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01696781>.
- Gödel, K. (1931). Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. *Monatshefte Für Mathematik Und Physik*, 38–38(1), 173–198. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01700692>.
- Goel, V. (2007). Anatomy of deductive reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(10), 435–441. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.09.003>
- Goel, V., Buchel, C., Frith, C., & Dolan, R. (2000). Dissociation of mechanisms underlying syllogistic reasoning. *Neuroimage*, 12(5), 504–514. doi: <https://doi.org/10.1006/nimg.2000.0636>.
- Goel, V., & Dolan, R. (2004). Differential involvement of left prefrontal cortex in inductive and deductive reasoning. *Cognition*, 93(3), B109–B121. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2004.03.001>.
- Goel, V., Navarrete, G., Noveck, I., & Prado, J. (2017). The reasoning brain: the interplay between cognitive neuroscience and theories of reasoning. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 673. doi: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00673>.
- Goel, V., Stollstorff, M., Nakic, M., Knutson, K., & Grafman, J. (2009). A role for right ventrolateral prefrontal cortex in reasoning about indeterminate relations. *Neuropsychologia*, 47(13), 2790–2797. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.06.002>.
- Grandi, F., & Tirapu-Ustárrroz, J. (2017). Neurociencia cognitiva del envejecimiento: modelos explicativos. *Revista Española de Geriátria y Gerontología*, 52(6), 326–331. doi: <https://doi.org/10.1016/j.regg.2017.02.005>

- Harman, G. (1984). Logic and reasoning. In *Logic, Language, and Mathematic*, 1, 107–127. doi: https://doi.org/10.1007/978-94-017-1592-8_7.
- Harman, G. (2002). Internal Critique: A Logic is not a Theory of Reasoning and a Theory of Reasoning is not a Logic. In *Studies in logic and practical reasoning*, 1, 171–186. doi: [https://doi.org/10.1016/S1570-2464\(02\)80006-4](https://doi.org/10.1016/S1570-2464(02)80006-4).
- Heit, E., & Rotello, C. (2010). Relations between inductive reasoning and deductive reasoning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36(3), 805–812. doi: <http://dx.doi.org/10.1037/a0018784>.
- Holyoak, K. (2012). Analogy and relational reasoning. *The Oxford Handbook of Thinking and Reasoning Oxford Handbook of Thinking and Reasoning*, 234–259.
- Horn, J., & Cattell, R. (1966). Refinement and test of the theory of fluid and crystallized general intelligences. *Journal of Educational Psychology*, 57(5), 253–270. doi: <http://dx.doi.org/10.1037/h0023816>.
- Houdé, O. (2019). *3-System Theory of the Cognitive Brain*. First Edition. | New York: Routledge, 2019.: Routledge. doi: <https://doi.org/10.4324/9781315115535>
- Houdé, O. (2019). *L'intelligence humaine n'est pas un algorithme*. Paris: Odile Jacob.
- Houdé, O., & Tzourio-Mazoyer, N. (2003). Neural foundations of logical and mathematical cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 4(6), 507–514. doi: <https://doi.org/10.1038/nrn1117>
- Johnson-Laird, P. (2001). Mental models and deduction. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(10), 434–442. doi: [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01751-4](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01751-4).
- Johnson-Laird, P. (2008). Mental models and deductive reasoning. In J. Adler & L. Rips (Eds.), *Reasoning: studies in human inference and its foundations* (pp. 206–222). New York: Cambridge University Press.
- Johnson-Laird, P., Khemlani, S., & Goodwin, G. (2015). Logic, probability, and human reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(4), 201–2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.02.006>.

- Khémilani, S., & Johnson-Laird, P. (2017). Illusions in reasoning. *Minds and Machines*, 27(1), 11–35. doi: <https://doi.org/10.1007/s11023-017-9421-x>.
- Knauff, M. (2009). A Neuro-Cognitive Theory of Deductive Relational Reasoning with Mental Models and Visual Images. *Spatial Cognition & Computation*, 9(2), 109–137. doi: <https://doi.org/10.1080/13875860902887605>.
- Knauff, M., & Johnson-Laird, P. (2002). Visual imagery can impede reasoning. *Memory & Cognition*, 30(3), 363–371. doi: <https://doi.org/10.3758/BF03194937>.
- Kroger, J., Nystrom, L., Cohen, J., & Johnson-Laird, P. (2008). Distinct neural substrates for deductive and mathematical processing. *Brain Research*, 1243, 86–103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.07.128>.
- Kutas, M., & Federmeier, K. (2011). Thirty Years and Counting: Finding Meaning in the N400 Component of the Event-Related Brain Potential (ERP). *Annual Review of Psychology*, 62(1), 621–647. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.093008.131123>
- Langdon, W. (2000). Quadratic bloat in genetic programming. In *Proceedings of the 2nd Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation* (pp. 451–458).
- Lassiter, D., & Goodman, N. (2015). How many kinds of reasoning? Inference, probability, and natural language semantics. *Cognition*, 136, 123–134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2014.10.016>.
- Li, X., Li, B., Lages, M., & Stoet, G. (2017). Commentary: Task-Switching in Pigeons: Associative Learning or Executive Control? *Frontiers in Psychology*, 8, 1420. doi: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01420>.
- López-Astorga, M. (2012). ¿Opera el razonamiento condicional en función de modelos mentales o por medio de reglas formales? *Revista Iberoamericana de Argumentación*, 5.

- Malaia, E., Tommerdahl, J., & McKee, F. (2015). Deductive Versus Probabilistic Reasoning in Healthy Adults: An EEG Analysis of Neural Differences. *Journal of Psycholinguistic Research*, 44(5), 533–544. doi: <https://doi.org/10.1007/s10936-014-9297-3>.
- Marr, D. (1982). *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*.
- Marr, D., & Passingham, R. (2018). *Computational Theories and their Implementation in the Brain*. Oxford: Oxford University Press.
- Martin-Löf, P. (1975). An intuitionistic theory of types: Predicative part. In *Logic and the Foundations of Mathematics*, 80, 73–118. doi: [https://doi.org/10.1016/S0049-237X\(08\)71945-1](https://doi.org/10.1016/S0049-237X(08)71945-1).
- Méndez, J., Robles, G., & Salto, F. (2012). Ticket Entailment plus the mingle axiom has the variable-sharing property. *Logic Journal of the IGPL*, 20(1), 355–364.
- Mercado, E. (2008). Neural and cognitive plasticity: From maps to minds. *Psychological Bulletin*, 134(1), 109–137. doi: <http://dx.doi.org/10.1037/0033-2909.134.1.109>.
- Monti, M. (2017). The Role of Language in Structure-Dependent Cognition. In *Neural Mechanisms of Language* (pp. 81–101). Boston: Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7325-5_5.
- Monti, M., & Osherson, D. (2012). Logic, language and the brain. *Brain Research*, 1428, 33–42. doi: <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2011.05.061>.
- Monti, M., Osherson, D., Martinez, M., & Parsons, L. (2007). Functional neuroanatomy of deductive inference: A language-independent distributed network. *NeuroImage*, 37(3), 1005. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.04.069>.
- Monti, M., Parsons, L., & Osherson, D. (2009). The boundaries of language and thought in deductive inference. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(30), 12554–12559. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.0902422106>.

- Monti, M., Parsons, L., & Osherson, D. (2012). Thought Beyond Language. *Psychological Science*, 23(8), 914–922. doi: <https://doi.org/10.1177/0956797612437427>.
- Moreno-Ríos, S., & García-Madruga, J. (2002). Priming in deduction: A spatial arrangement task. *Memory & Cognition*, 30(7), 1118–1127. doi: <https://doi.org/10.3758/BF03194329>.
- Nirenburg, S. (2017). Cognitive Systems: Toward Human-Level Functionality. *AI Magazine*, 38(4). doi: <https://doi.org/10.1609/aimag.v38i4.2760>.
- O'Brien, D., & Manfrinati, A. (2010). The mental logic theory of conditional propositions. *Cognition and Conditionals*, 39–54.
- Oaksford, M. (2015). Imaging deductive reasoning and the new paradigm. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 101. doi: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00101>
- Osherson, D. (2019). *Logical Abilities in Children Volume 1. Organization of Length and Class Concepts: Empirical Consequences of a Piagetian Formalism*. London: Routledge.
- Parkin, B., Hellyer, P., Leech, r, & Hampshire, A. (2015). Dynamic network mechanisms of relational integration. *Journal of Neuroscience*, 35(20), 7660–7673. doi: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4956-14.2015>.
- Parsons, L., & Osherson, D. (2001). New evidence for distinct right and left brain systems for deductive versus probabilistic reasoning. *Cerebral Cortex*, 11(10), 954–965. doi: <https://doi.org/10.1093/cercor/11.10.954>.
- Pascual-Leone, A., Amedi, A., Fregni, F., & Merabet, L. (2005). The plastic human brain cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 28, 377–401. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144216>.
- Peirce, C. (1965). *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*. (C. Hartshorne & P. Weiss, Eds.). Cambridge: The Belknap Press of Harvard University Press.
- Piaget, J. (1960). *The general problems of the psychobiological development of the child*.

- Piaget J. (1976) Piaget's Theory. In: Inhelder B., Chipman H.H., Zwingmann C. (eds) *Piaget and His School*. Springer Study Edition. Springer, Berlin, Heidelberg, 11-23. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-46323-5_2
- Prado, J. (2018). The relationship between deductive reasoning and the syntax of language in Broca's area: A review of the neuroimaging literature. *Lannee Psychologique*, 118(3), 289–315.
- Prado, J., Chadha, A., & Booth, J. (2011). The Brain Network for Deductive Reasoning: A Quantitative Meta-analysis of 28 Neuroimaging Studies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(11), 3483–3497. doi: https://doi.org/10.1162/jocn_a_00063
- Prado, J., Mutreja, R., & Booth, J. (2012). Fractionating the neural substrates of transitive reasoning: task-dependent contributions of spatial and verbal representations. *Cerebral Cortex*, 23(3), 449–507. doi: <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr389>.
- Prado, J., & Schwartz, F. (2019). Si la dyscalculie m'était contée. *Cahiers Pedagogiques*, 74(552), 27–39.
- Prado, J., Spotorno, N., Koun, E., Hewitt, E., Van der Henst, J., Sperber, D., & Noveck, I. (2015). Neural Interaction between Logical Reasoning and Pragmatic Processing in Narrative Discourse. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27(4), 692–704. doi: https://doi.org/10.1162/jocn_a_00744.
- Prado, J., Van Der Henst, J., & Noveck, I. (2010). Recomposing a fragmented literature: How conditional and relational arguments engage different neural systems for deductive reasoning. *Neuroimage*, 51(3), 1213–1221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.03.026>.
- Ragni, M., & Knaff, M. (2013). A theory and a computational model of spatial reasoning with preferred mental models. *Psychological Review*, 120(3), 561–588.
- Rebok, G., Ball, K., Guey, L., Jones, R., Kim, H., King, J., Marsiske, M., Morris, J., Tennstedt, S., Frederick, W., & Willis, S. (2014). Ten-Year Effects of the Advanced Cognitive Training for Independent and Vital Elderly Cognitive Training Trial on

- Cognition and Everyday Functioning in Older Adults. *Journal of the American Geriatrics Society*, 62(1), 16–24. doi: <https://doi.org/10.1111/jgs.12607>
- Requena, C., Turrero, A., & Ortiz, T. (2016). Six-Year Training Improves Everyday Memory in Healthy Older People. Randomized Controlled Trial. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 8, 135. doi: <https://doi.org/10.3389/fnagi.2016.00135>.
- Reverberi, C., Cherubini, P., Frackowiak, R., Caltagirone, C., Paulesu, E., & Macaluso, E. (2010). Conditional and syllogistic deductive tasks dissociate functionally during premise integration. *Human Brain Mapping*, 31(9), 1430–1445. doi: <https://doi.org/10.1002/hbm.20947>
- Reverberi, C., D'agostini, S., Skrap, M., & Shallice, T. (2005). Generation and recognition of abstract rules in different frontal lobe subgroups. *Neuropsychologia*, 43(13), 1924–1937. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.03.004>
- Reverberi, C., Pischedda, D., Burigo, M., & Cherubini, P. (2012). Deduction without awareness. *Acta Psychologica*, 139(1), 244–253. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2011.09.011>
- Rips, L. (1994). *The psychology of proof: Deductive reasoning in human thinking*. Cambridge: Mit Press.
- Rips, L. (2011). *Lines of thought: Central concepts in cognitive psychology*. Oxford: University Press, USA.
- Rodriguez-Moreno, D., & Hirsch, J. (2009). The dynamics of deductive reasoning: an fMRI investigation. *Neuropsychologia*, 47(4), 949–961. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.08.030>.
- Salthouse, T. (2016). *Adult cognition: An experimental psychology of human aging*. Salthouse: Springer Science & Business Media.
- Salto, A. (1998). Hacia la lógica plástica: emergencia de la lógica del razonamiento visual. *Contextos*, 31, 281–296.

- Santamaría, C., Tse, P., Moreno-Ríos, S., & García-Madruga, J. (2013). Deductive reasoning and metalogical knowledge in preadolescence: A mental model appraisal. *Journal of Cognitive Psychology*, 25(2), 192–200. doi: <https://doi.org/10.1080/20445911.2012.743988>.
- Scarmeas, N., Levy, G., Tang, M., Manly, J., & Stern, Y. (2001). Influence of leisure activity on the incidence of Alzheimer's disease. *Neurology*, 57(12), 2236–2242. doi: <https://doi.org/10.1212/WNL.57.12.2236>.
- Schaeken, W., Vandierendonck, A., & Schroyens, W. (2013). *The mental models theory of reasoning: Refinements and extensions*. New York: Psychology Press.
- Schroeders, U., & Wilhelm, O. (2010). Testing Reasoning Ability with Handheld Computers, Notebooks, and Paper and Pencil. *European Journal of Psychological Assessment*, 26(4), 284–292. doi: <https://doi.org/10.1027/1015-5759/a000038>.
- Schwartz, F., Epinat-Duclos, J., Léone, J., Prado, J. (2017). The neural development of conditional reasoning in children: Different mechanisms for assessing the logical validity and likelihood of conclusions. *NeuroImage*, 163, 264–275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.09.029>.
- Shye, S. (1988). Inductive and deductive reasoning: A structural reanalysis of ability test. *Journal of Applied Psychology*, 73(2), 308–311.
- Siedlecki, K., Stern, Y., Reuben, A., Sacco, R., Elkind, M., & Wright, C. (2009). Construct validity of cognitive reserve in a multiethnic cohort: The Northern Manhattan Study. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 15(4), 558–569. doi: <https://doi.org/10.1017/S1355617709090857>.
- Singmann, H., & Klauer, K. (2011). Deductive and inductive conditional inferences: Two modes of reasoning. *Thinking & Reasoning*, 17(3), 247–281. doi: <https://doi.org/10.1080/13546783.2011.572718>.
- Singmann, H., Klauer, K. & Beller, S. (2016). Probabilistic conditional reasoning: Disentangling form and content with the dual-source model. *Cognitive Psychology*, 88, 61–87. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2016.06.005>.

- Solernó, J., Chada, D., Guinjoan, S., & Lloret, S. (2012). Cardiac autonomic activity predicts dominance in verbal over spatial reasoning tasks: Results from a preliminary study. *Autonomic Neuroscience*, 167(1–2), 78–80. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2011.10.008>.
- Solway, A., & Botvinick, M. (2012). Goal-directed decision making as probabilistic inference: a computational framework and potential neural correlates. *Psychological Review*, 119(1), 120–154.
- Stadler, M., Becker, N., Schult, J., & Niepel, C. (2018). The logic of success: the relation between complex problem-solving skills and academic achievement. *Higher Education*, 76(1), 1–15. doi: <https://doi.org/10.1007/s10734-017-0189-y>.
- Stern, Y. (2009). Cognitive reserve. *Neuropsychologia*, 47(10), 2015–2028. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.03.004>.
- Sternberg, R. (2019). *Human Intelligence. An Introduction*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tomasello, M. (2014). *A natural history of human thinking*. Cambridge: Harvard University Press.
- Valenzuela, M., & Sachdev, P. (2006). Brain reserve and dementia: a systematic review. *Psychological Medicine*, 36(4), 441–454. doi: <https://doi.org/10.1017/S0033291705006264>.
- Von Fersen, L., Wynne, C., & Delius, J. (1991). Transitive inference formation in pigeons. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 17(3), 334–341.
- Wecker, N., Kramer, J., Hallam, B., & Delis, D. (2005). Mental flexibility: age effects on switching. *Neuropsychology*, 19(3), 345–352.
- Wilhelm, O. (2005). *Measuring reasoning ability,” in Handbook of understanding and measuring intelligence*. London: Sage.

- Willis, S., Schaie, K., & Martín, M. (2009). Cognitive Plasticity. In V. Bengtson, M. Silverstein, N. Putney, & D. Gans (Eds.), *Handbook of Theories of Aging* (pp. 295–322). New York: Springer Publishing.
- Willis, S., Tennstedt, S., Marsiske, M., Ball, K., & Elias, J. (2006). Long-term effects of cognitive training on everyday functional outcomes in older adults. *Jama*, 296(23), 2805–2814. doi: 10.1001/jama.296.23.2805.
- Wolf, D., Tüscher, O., Teipel, S., Mierau, A., Strüder, H., Drzezga, A., ... Fellgiebel, A. (2018). Mechanisms and modulators of cognitive training gain transfer in cognitively healthy aging: study protocol of the AgeGain study. *Trials*, 19(1), 337. doi: <https://doi.org/10.1186/s13063-018-2688-2>.
- Yang, T., & Shadlen, M. (2007). Probabilistic reasoning by neurons. *Nature*, 447(7148), 1075. doi: <https://doi.org/10.1038/nature05852>.
- Yuan, P., Voelkle, M., Raz, N., & 2018, undefined. (2018). Fluid intelligence and gross structural properties of the cerebral cortex in middle-aged and older adults: A multi-occasion longitudinal study. *Neuroimage*, 172, 21–30. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.01.032>.

