



Departamento de Posgrados

REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA SOBRE PARADIGMAS DE RAZONAMIENTO ABSTRACTO PARA RESONANCIA MAGNÉTICA FUNCIONAL (RMf)

Trabajo de

T E S I S

Previo a la obtención del título en:

Máster en Neuropsicología

A U T O R

LUIS FERNANDO SHUNTA COCHA

Director: René Fernando Estévez Abad

Co-Directora: Gladys Alexandra Bueno Pacheco

Cuenca – Ecuador

2020

DEDICATORIA

A mi padre, Axel Wilhem Werner Boving por su amor, fe y apoyo incondicionales en la vida.

A Margarethe Gräf, en su memoria (+)

A Petra Schweickhard, en su memoria (+)

A Horst Schweickhard, por su motivación a la ciencia

A Leo y Marianne Werner, en su memoria (+)

A mi hermana Mónica Alexandra Shunta por hacerme sentir siempre acompañado.

A mi hija Sofía Valentina Shunta y el mundo de nuevos y maravillosos conocimientos que heredará.

A Lucía Germania Méndez Guapisaca y Jorge Benjamín Bautista Pangol por siempre hacerme sentir en familia.

A Rosa Livia Rodríguez Ortiz por su amor, motivación y acompañamiento eternos.

- Luis Fernando -

AGRADECIMIENTOS

A Tania Fabiola Trelles Vásquez por su apoyo y fe en este proyecto. Sin Usted no hubiera sido posible nada.

Alguna vez Isaac Newton dijo: “Si he visto más allá, es porque me he subido en hombros de gigantes”. A esos gigantes que me acompañaron en toda mi formación:

Al Dr. Pablo Peña por su motivación y fe en este proyecto. Desde un inicio la presente temática fue su idea. En un futuro cercano la cristalizaremos en la práctica.

Al PhD Daniel Fernando Aguirre Reyes por su apoyo, correcciones constantes del texto y sus valiosas enseñanzas durante todo el Posgrado. Ud es el ejemplo vivo de lo que un Maestro debe ser. ¡Infinitas gracias!

Al Dr. René Fernando Estévez Abad por su apoyo, motivación y acompañamiento para lograr cristalizar el presente proyecto.

A la Dra. Gladys Alexandra Bueno Pacheco por sus revisiones constantes del texto y sus valiosas sugerencias.

- Luis Fernando -

El cerebro es más grande que el cielo.
Si los pones uno junto al otro,
El primero contiene al segundo,
Y sin dificultad te incluye a ti también.

El cerebro es más profundo que el mar.
Si los unes, azul con azul,
El primero absorbe al segundo,
Como hacen esponjas y cubos.

El cerebro tiene el peso de Dios,
Si los levantas, libra con libra,
Se distinguirán, si se distinguen,
Como la sílaba del sonido.

- Emily Dickinson -

ÍNDICE

	Pág.
Resumen	6
Introducción	9
Capítulo Primero: Neuropsicología y técnicas de neuroimagen	10
1.1 Técnicas de neuroimagen	13
1.1.1 La Resonancia Magnética funcional (RMf)	13
1.1.2 Paradigmas experimentales (tarea)	16
Capítulo Segundo: Razonamiento abstracto	20
2.1 Bases cerebrales del razonamiento abstracto	20
2.2 Las funciones ejecutivas	21
2.3 Enfoques investigativos del razonamiento abstracto	23
2.3.1 El enfoque piagetiano del razonamiento abstracto	23
2.3.3 El enfoque psicométrico del razonamiento abstracto	25
2.4 Componentes conceptuales del razonamiento abstracto	27
2.5. El concepto de razonamiento abstracto	28
2.6 Redes neurológicas del razonamiento abstracto	28
Capítulo tercero: Metodología	31
3.1 Justificación.....	31
3.2 Preguntas de investigación	32
3.3 Objetivo general	32
3.4 Objetivos específicos	32
3.5 Hipótesis de investigación	33
3.6 Elaboración de Protocolo de búsqueda	33
3.7 Estrategias de búsqueda, fuentes de información y criterios de inclusión y exclusión	33
3.8 Adquisición de evidencia	34
3.9 Selección de estudios	36
3.10 Síntesis de evidencia	37
3.11 Evaluación de riesgo de sesgos: calidad de la evidencia	38
Capítulo cuarto: Resultados	40
4.1 Evaluación del riesgo sistemático de los estudios incluidos.....	40
4.2 Características de los paradigmas empleados en los estudios incluidos	42
4.3 Metodología de aplicación de los paradigmas de los estudios incluidos	43
Discusión	45
Conclusiones	50
Limitaciones de estudio	50
Alcances e implicaciones del estudio	51
Referencias bibliográficas	53
Anexos 1. Protocolo de búsqueda de evidencia	58
Anexos 2. Formulario de estudio de elegibilidad del total de estudios (N =57) obtenidos en las bases de datos: Medline, Scopus y EbscoHost	61
Anexo 3. Síntesis de evidencia de los estudios incluidos	62
Anexo 4. Cálculo de evaluación de sesgo: calidad de los estudios incluidos	63

RESUMEN

La Resonancia Magnética funcional (RMf) es una técnica de neuroimagen que mapea el cerebro en tiempo real. Para ello utiliza tareas experimentales conocidas como paradigmas. La validez de los paradigmas experimentales es un aspecto fundamental que afecta directamente la confiabilidad de las imágenes cerebrales obtenidas por RMf. El razonamiento abstracto ha sido mapeado con RMf a través del empleo de paradigmas basados en conocidas pruebas psicométricas.

Este estudio realizó una revisión sistemática de literatura en tres bases de datos sobre validación estadística de paradigmas de razonamiento abstracto para RMf en poblaciones de adultos sanos entre 19 a 44 años de edad. Se obtuvieron 57 resultados, de los cuales se incluyeron sólo 14 estudios. Se halló que los paradigmas más utilizados fueron los ejercicios tipo matrices progresivas de Raven, con un diseño en bloques y con un tipo de relación abstracta visoespacial y semántica.

Asimismo, se encontró que ninguno de los estudios incluidos reportaron un proceso de validación estadística de sus tareas experimentales previo a su uso en el resonador magnético funcional. La mayoría de los estudios revisados adolecen de errores metodológicos que dificultan su replicabilidad. Contar con paradigmas validados para un ambiente de neuroimagen funcional es un aspecto fundamental que las investigaciones futuras deben tomar en cuenta.

Palabras clave: resonancia magnética funcional, paradigmas, validación estadística, razonamiento abstracto, revisión sistemática de literatura.

ABSTRACT

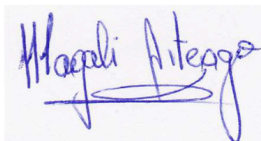
Functional Magnetic Resonance (fMRI) is a neuroimaging technique that maps the brain in real time. To do this, it uses experimental tasks known as paradigms. The validity of the experimental paradigms is a fundamental aspect that affects the reliability of brain images obtained by fMRI. Abstract reasoning has been mapped with fMRI through the use of paradigms based on well known psychometric tests.

This study conducted a systematic literature review in three databases about the statistical validation of abstract reasoning paradigms for fMRI in healthy adult between 19 and 44 years old. 57 results were obtained, of which only 14 studies were included. It was found that the most used paradigms were tasks like Raven's Progressive Matrices, with a block design and a type of abstract visuospatial and semantic relationship.

Likewise, it was found that none of these studies reported a statistical validation process of their tasks prior to their use in the fMRI. Most of the studies reviewed suffer from methodological errors that hinder their replicability. Having validated paradigms for a functional neuroimaging environment is a fundamental aspect that future research must take into account.

Keywords: functional magnetic resonance imaging, paradigms, statistical validation, abstract reasoning, systematic literature review.

Translated by

A handwritten signature in blue ink that reads "Magali Aiteaga". The signature is stylized with a large, sweeping underline.A handwritten signature in blue ink that reads "Luis Fernando Shunta Cocha". The signature is highly stylized and cursive.

Luis Fernando Shunta Cocha

NOTA

La situación de emergencia sanitaria provocada por la pandemia debido al Covid-19, generó que las investigaciones de campo deban ser sustituidas por revisiones sistemáticas de la literatura, como es el caso del presente trabajo de investigación.

INTRODUCCIÓN

Se ha propuesto que la evolución del razonamiento abstracto es una de las explicaciones para el declive mundial de la violencia (Pinker, 2011, 2012). Asimismo, el filósofo James Flynn ha demostrado que los puntajes de coeficiente intelectual (CI) de las principales pruebas de inteligencia aumentaron de una generación a otra a lo largo de todo el siglo XX, principalmente en los test de razonamiento abstracto (Flynn, 199, 2007; Stobart, 2010).

Eso quiere decir que a diferencia de las generaciones pasadas, las actuales tienen mayor capacidad para manipular simbólicamente problemas de manera abstracta empleado procesos cognitivos como la lógica, el relacionamiento abstracto, la categorización, la hipotetización, entre otras. ¿Qué motivó esos cambios mentales en las personas a lo largo de la historia reciente? ¿Qué implicaciones sociales tienen los hallazgos de Flynn? ¿Cómo trabaja el cerebro cuando razona de forma abstracta? Se cuentan ya con algunas pistas que intentan explicar el enorme desarrollo de la facultad de abstracción en el ser humano. Para ello las ciencias cognitivas han empleado un sinnúmero de métodos que arrojan luz a los hallazgos de Flynn. Las neurociencias por ejemplo han empleado diferentes técnicas de neuroimagen para mapear el cerebro mientras resuelve problemas de razonamiento abstracto y con ello identificar las estructuras cerebrales involucradas.

Una de las técnicas de neuroimagen más empleadas en el campo de la investigación de imágenes médicas es la resonancia magnética funcional (RMf). Ésta ha permitido “ver” en vivo el funcionamiento del cerebro mientras resuelve problemas abstractos, motores, visuales y de lenguaje. La RMf también ha significado un gran avance en el ámbito clínico como una herramienta de diagnóstico pre y post quirúrgico. En la investigación neuropsicológica la RMf se centra principalmente en el mapeo de procesos cognitivos superiores a través de tareas experimentales diseñadas especialmente para cada proceso mental. A esas tareas se les conoce como paradigmas experimentales.

Una revisión sistemática (RS) es una revisión de estudios primarios que contiene una declaración de objetivos, fuentes y métodos y se ha llevado a cabo de una forma explícita, transparente y reproducible (Greenhalgh, 2016).

El presente estudio tiene como objetivo conocer a través de una RS de literatura si los paradigmas de razonamiento abstracto cuentan con validación estadística previa a su empleo dentro de un RMf. Para ello, la primera parte de esta obra iniciará abordando las técnicas de neuroimagen funcional a partir de la neuropsicología, a continuación se expondrán las bases neuropsicológicas y psicométricas del razonamiento abstracto. En la segunda parte de esta obra se presentará la metodología para lograr el objetivo de investigación, a continuación se expondrán los resultados obtenidos de la RS y, finalmente, se relacionarán los presentes hallazgos con la teoría y el estado del arte en la discusión y conclusiones.

CAPÍTULO PRIMERO

NEUROPSICOLOGÍA Y TÉCNICAS DE NEUROIMAGEN

La neurociencia estudia diferentes aspectos del sistema nervioso con el apoyo de disciplinas como la biología, neurología, psicología, química, física, genética, informática, entre otras. Su objetivo es el estudio de las bases neurológicas de la conducta, el pensamiento, la percepción y la emoción. La neurociencia ha proporcionado una explicación científica de la complejidad del pensamiento humano y ha demostrado que todos sus aspectos son manifestaciones de la actividad fisiológica del cerebro (Pinker, 2005).

Las pruebas aportadas por la neurociencia sobre la mente como actividad neurofisiológica son vastas y abrumadoras. En especial, aquellos estudios relacionados con daño cerebral que han documentado cambios en la percepción, el humor, la personalidad y los pensamientos después de una lesión encefálica. La neuropsicología es una de las ramas de la neurociencia que estudia las relaciones entre el cerebro y la conducta, tanto en personas sanas como en pacientes con daño cerebral (Portellano, 2005). Se ocupa de la medición válida, confiable y reproducible de los trastornos cognitivos y de la conducta producidos por una lesión neurológica (Manes y Báez, 2019).

El término “neuropsicología” fue utilizado por primera vez por William Osler en 1913, pero se popularizó en 1949 con la publicación de la obra de Donald Hebb (1904-1985) titulada “La organización de la conducta: una teoría neuropsicológica”. En 1963 apareció la primera publicación científica de esta ciencia denominada “Neuropsychologia”, en cuyo primer número definía la neuropsicología como un área determinada de la neurología, de interés común para neurólogos, psiquiatras, psicólogos y neurofisiólogos (Portellano, 2005; Saavedra, 2019).

El desarrollo científico de la neuropsicología se inició a partir de los años 60 con las aportaciones de diferentes campos de estudio y científicos de renombre. Sin embargo, el estudio de la relación entre el cerebro y la conducta inició siglos atrás. Un ejemplo de ello es la práctica primitiva de la trepanación, que consistía en cortar, raspar, cincelar o perforar el cráneo con el fin de aliviar la presión por un edema cerebral. En muchas ocasiones la gente perdía la vida, pero en muchas otras la persona sobrevivía y mostraba signos de recuperación o presunta curación (Ramos-Galarza et al., 2017).

En Egipto antiguo se pensaba que el espíritu y las funciones mentales estaban localizadas en el corazón o en el hígado. Cuando el faraón Tutankha-mon fue momificado en 1300 a.C., sólo se preservaron cuatro órganos considerados importantes: el hígado, los pulmones, el estómago y los intestinos. El corazón permaneció en el cuerpo, mientras que el cerebro era removido del cráneo y desechado (Saavedra, 2019).

En la Grecia antigua Aristóteles (384-322 a.C.) ubicó las funciones mentales en el corazón y consideraba que el cerebro sólo servía para enfriarlo; por su parte, Platón (427-347 a.C.) postuló que la mente estaba en el cerebro porque se encontraba más cerca del cielo. Hipócrates (470-370 a.C.) argumentó que la conciencia se asentaba en el cerebro y

dedujo que ciertas formas de locura y alteraciones del lenguaje eran el resultado de enfermedades del cerebro: por ejemplo, halló sujetos con un inadecuada sonoridad para la producción del habla y los denominó Áfonos (de la Fuente, 2015; Ramos-Galarza et al., 2017; Saavedra, 2019).

La relación entre el cerebro y la conducta no siempre fue una suposición socialmente aceptada, puesto que la concepción tradicional de la mente se basaba en el alma: una entidad inmaterial que entraba en algún momento de la concepción, era independiente de la fisiología y escapaba del cuerpo durante la muerte (Pinker, 2005). En ese sentido, en 1748 Julien Offray de la Mettrie (1709-1751) tuvo que huir de Francia por la publicación de un panfleto titulado “El Hombre Máquina”. Mattrie argumentó que el pensamiento era producto del organismo, pero en especial del cerebro, un órgano que consideraba creativo, dinámico y capaz de actuar sobre el resto del cuerpo por medio de los nervios. El texto escandalizó a Europa y en algunos país se ordenó su destrucción y la encarcelación del autor (de la Fuente, 2015).

El rechazo a aceptar que las funciones mentales tuviesen una base fisiológica se producía porque ese hecho situaba al hombre en el mundo natural, sujetándolo a las mismas leyes que rigen a los astros, planetas y animales. De esa forma se despojaba al hombre de su divinidad basada, principalmente, en la posesión de un alma incorpórea.

Otro paso a la “naturalización” del hombre fueron las aportaciones de Franz Joseph Gall (1758-1828) y su discípulo Johann Spurzheim (1776-1832) mediante la frenología, en la que postularon que el cerebro tenía alrededor de 30 funciones y que las cualidades morales e intelectuales dependían de su morfología. Si bien la morfología fue descartada como ciencia, el aporte importante de Gall fue su intento de localizar las funciones cerebrales en diferentes áreas del encéfalo, reforzando así la teoría de la base fisiológica cerebral. Asimismo, Gall acertó al atribuir a los lóbulos frontales un papel principal en las facultades intelectuales (de la Fuente, 2015; Saavedra, 2019).

La concepción de que ciertas zonas cerebrales se encargaban de funciones mentales y conductuales específicas se reforzó con los hallazgos de Paul Broca (1824-1880) y Carl Wernicke (1848-1905). Broca detalló con precisión que una lesión en la parte media del lóbulo frontal del hemisferio izquierdo producía pérdida del lenguaje sin alteración de las capacidades intelectuales. De esa forma, demostró que el lenguaje tenía una localización precisa en la tercera circunvolución frontal ascendente del hemisferio izquierdo. Actualmente, a dicha alteración se la conoce como Afasia de Broca.

Por su parte, Wernicke documentó que una lesión en el lóbulo temporal generaba una incapacidad para comprender el lenguaje. Es decir, el paciente conservaba la capacidad motora de emisión del habla, pero no lo comprendía. A dicha patología hoy se la conoce como Afasia de Wernicke (de la Fuente, 2015).

Con el pasar del tiempo se descubrieron más áreas cerebrales que daban cuenta de afasias, agnosias, apraxia, etc., e incluso Wilder Penfield (1891-1976) realizó un mapa de las representaciones corticales de funciones sensoriales y motrices humanas, conocidos

actualmente como homúnculos motriz y sensorial de Penfield. Los estudios científicos del cerebro como un órgano cuantificable fueron desmoronando la concepción tradicional de que los procesos cognitivos como la memoria, el razonamiento o el lenguaje tenían una base divina y no fisiológica.

Por ejemplo, el psiquiatra alemán Hans Berger (1873-1941) fue el primero en registrar la actividad eléctrica del cerebro mediante el electroencefalograma. Berger postuló que la energía psicológica era similar a la energía térmica o eléctrica y, por tanto, era posible medirla. En 1924 registró el primer electroencefalograma humano y con ello iniciaron los estudios de los ciclos del sueño, un proceso mental mitificado y complejo de abordar previo al desarrollo de las neurociencias (de la Fuente, 2015).

No se puede separar el establecimiento de la neuropsicología como una neurociencia sin considerar las aportaciones de la escuela rusa de psicología, especialmente los aportes de Alexander Romanovich Luria (1902-1977), quien es considerado el padre de la neuropsicología contemporánea (Portellano, 2005; Ramos-Galarza, 2017).

Entre las principales aportaciones de Luria está su modelo teórico del funcionamiento cerebral basado en un sistema funcional dinámico, en el cual tanto los procesos cognitivos como la conducta son productos de la interacción de diferentes áreas cerebrales que trabajan de forma concentrada (Trápaga, 2018). Para Luria, el funcionamiento cerebral no se concibe como la actividad de un área local o específica del cerebro, sino como producto de la interacción de diversas unidades funcionales responsables de los distintos niveles de especificidad de la conducta.

Según Luria el cerebro está conformado por tres sistemas funcionales: el sistema activador gobernado por la formación reticular del tronco encefálico que se encarga de la activación de la neocorteza para los procesos atencionales; el segundo sistema es el encargada de recibir, procesar y almacenar información y está localizada en la parte posterior del córtex, detrás de la cisura de Rolando; y el tercer sistema localizado en el lóbulo frontal es el responsable de la planificación, ejecución y verificación de la actividad cognitiva, emitiendo sus respuestas a través de los sistemas motores eferentes o glándulas endocrinas (Portellano, 2005; Saavedra, 2019).

De acuerdo a sus observaciones, Luria afirmó que el pensamiento abstracto y conceptual se generaban en las regiones anteriores de los lóbulos frontales. Para Luria, la diferencia entre lo abstracto y lo concreto se relacionaba más con la parte frontal y posterior del cerebro, que con los hemisferios derecho e izquierdo (de la Fuente, 2015)

Los conceptos de sistema funcional y de funciones corticales superiores desarrollados por la escuela rusa de psicología, constituyen las bases actuales de la rehabilitación neuropsicológica (Trápaga, 2018). Así, Portellano (2005) señala que una de las primeras funciones que realizaba un neuropsicólogo era la localización del daño cerebral, determinando el grado de organicidad cerebral a través de la aplicación de pruebas muy genéricas e inespecíficas.

Actualmente, el campo de acción del neuropsicólogo es amplio y va desde el ámbito de la salud hasta la investigación con técnicas sofisticadas de neuroimagen enfocadas en la relación cerebro-conducta tanto en pacientes sanos como con lesión cerebral. Incluso se piensa que en el futuro el rol del neuropsicólogo en el área de la neuroimagen llegará a convertirse en un área de superespecialización dentro de la psicología (Ríos-Lago, 2008). Como es sabido, la actividad mental produce señales eléctricas o metabólicas que las nuevas tecnologías de neuroimagen funcional son capaces de leer con sorprendente precisión y sensibilidad.

1.1 Técnicas de neuroimagen

Para el estudio del cerebro la neuropsicología se apoya en diferentes disciplinas y técnicas electrofisiológicas y de neuroimagen. Los métodos electrofisiológicos miden la actividad electromagnética del cerebro. Los más empleados en la investigación de las neurociencias son la electroencefalografía (EEG), la magnetoencefalografía (MEG) y la estimulación magnética transcraneana (TMS) (Manes y Báez, 2019). Por su parte, las técnicas de neuroimagen permiten valorar el funcionamiento cerebral en tiempo real (Ramos et al., 2017). Estas técnicas pueden ser estructurales y funcionales. Las estructurales se centran en el estudio de las propiedades constitutivas de un órgano del sistema nervioso, mientras que las funcionales evalúan los cambios de actividad cognitiva de forma directa o indirecta (Cortés et al., 2019).

La tomografía axial computarizada (TAC), las imágenes con tensor de difusión (DTI, del inglés Diffusion Tensor Imaging) y la resonancia magnética nuclear (RMN) son ejemplos de técnicas estructurales. La resonancia magnética funcional (RMf), la tomografía por emisión de positrones (PET, del inglés Positron Emission Tomography) y la tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT, del inglés Single Photon Emission Computed Tomography) son métodos de técnicas de neuroimagen funcional.

1.1.1 La resonancia magnética funcional (RMf)

La RMf es una técnica de neuroimagen no invasiva que detecta las variaciones en el flujo sanguíneo y el grado de oxigenación de la sangre resultantes de la actividad cerebral. Proporciona una medida indirecta de la actividad neuronal puesto que se basa en inferencias a partir de la respuesta hemodinámica (RHD). Es decir, la RMf trabaja bajo el principio de que al producirse un proceso cognitivo las neuronas involucradas emplean una mayor cantidad de oxígeno (Manes y Báez, 2019).

Por tanto, las mediciones de la RMf, así como todas las técnicas de neuroimagen y electrofisiología, son correlacionales y no determinan causalidad. El hecho de que un área del cerebro se active durante la ejecución de un ejercicio, no implica que esa área sea indispensable para la tarea en cuestión. Todo dependerá de otros factores como la potencia

estadística de las tareas experimentales y las características del RMf (Armony et al., 2012).

Por ejemplo, la potencia del campo magnético de un resonador se mide en unidades Tesla (T) que pueden ir desde 1.5 T hasta 7 T (Cortés et al., 2019). La diferencia de teslaje no se relaciona con la calidad de resolución de las imágenes, sino con el número de sujetos y el tiempo necesarios para el escaneo, así como con la cantidad de actividad detectada por las antenas de cada equipo (Aguirre, 2012).

Así, en un equipo de 1.5 T la cantidad de actividad detectada en zonas específicas del cerebro es menor en un 23 % a la cantidad de actividad detectada por un equipo de 3 T. No obstante, es posible igualar la señal entre ambos equipos mediante el incremento del tiempo de la tarea. Para que un Resonador Magnético (RM) de 1.5 T obtenga la misma cantidad de señal percibida por las antenas de un resonador de 3 T, la tarea experimental debe ser cuatro veces más larga. Asimismo, el tamaño mínimo de la muestra cuando se trabaja con un resonador de 1.5 T es de 16 sujetos, mientras que para un equipo de 3 T la muestra mínima es de 12 sujetos (Aguirre, 2012). Sin embargo, otros autores consideran que los tamaños de muestras típicos empleados generalmente en experimentos con RMf no son suficientes, puesto que entre más pequeñas las muestras, mayor dificultad en la replicabilidad de los estudios (Turner et al., 2018).

Aún así, y a pesar de las diferencias de teslaje de los equipos, las áreas neuronales mapeadas son válidas con la diferencia de que un RM de mayor teslaje obtendrá una mayor cantidad de activación detectada por la señal o efecto BOLD (del inglés, Blood Oxygen Level Dependent) que funciona así: el aumento de la actividad neuronal genera un incremento del consumo de oxígeno a nivel local que se obtiene directamente de la hemoglobina oxigenada. Cuando la hemoglobina sufre un aumento de oxígeno se conoce como oxy-hemoglobina (oxyHb) y, cuando entrega los átomos de oxígeno a los tejidos y se queda sin ellos, se llama deoxy-hemoglobina (deoxyHb) o sangre sin oxígeno.

La oxyHb es diamagnética, es decir, presenta una débil repulsión ante un campo magnético, mientras que la deoxyHb es paramagnética, o sea posee una susceptibilidad magnética positiva por lo que es atraída hacia un campo magnético. Esa susceptibilidad aumenta el desfase de los espines de los núcleos de hidrógeno produciendo gradientes de campo magnético en los compartimentos intra y extra vasculares (Krainik, 2011; Manes y Báez, 2019). Por tanto, si se compara la señal en una misma región de la corteza cerebral bajo dos condiciones, una de reposo y otra de actividad, se hallarán distintos valores.

Esa diferencia de valores se toma con un índice indirecto del grado de actividad neuronal en dicha área cerebral y se la conoce como efecto BOLD, el cual fue descrito originalmente por Seiji Ogawa en 1990 y se utilizó por primera vez en 1992 para visualizar la actividad neurológica en humanos (Armony et al., 2012)

El efecto BOLD se emplea en la adquisición de imágenes con RMf para elaborar mapas visuales de localización topográfica (Ríos-Lagos, 2008). Sin embargo, el efecto BOLD no es un marcador directo de la actividad neuronal, pues éste depende de los cambios en la oxigenación de la sangre (Krainik, 2011). El cambio en la señal BOLD

generado por un proceso neuronal breve se conoce como respuesta hemodinámica (RHD). Dada la lentitud en el proceso de la RHD, la cual está sujeta a las leyes de la física de los fluidos, ésta sólo puede ser visible a partir de los 2 o 3 segundos después de haber iniciado la actividad cognitiva y toma otros 2 o 3 segundos hasta alcanzar su máxima altura. Al finalizar la actividad neuronal la RHD regresa lentamente a su línea base, por lo que un RMf tiene una resolución temporal de algunos segundos mucho mejor que la PET, pero más baja que la de la EEG y la MEG, los cuales miden los campos electromagnéticos neuronales con una resolución de milisegundos (Armony et al., 2012).

Aunque las imágenes obtenidas mediante RMf son tridimensionales (3D), la mayoría de las secuencias funcionales consisten en la adquisición secuencial de series de imágenes bidimensionales (2D) o cortes con un grosor de 2 a 5 mm. A su vez, cada corte se divide en una matriz de píxeles que cubren una determinada región del espacio o campo de visión (en inglés, field of view, FOV). La relación entre el tamaño de la matriz y el FOV determinan la resolución de la imagen, por lo que el volumen final asociado a cada medición se reconstruye a partir de esa serie de imágenes 2D formada por píxeles tridimensionales (o vóxeles).

Cabe señalar que la señal dentro de un vóxel es promediada, por lo que su volumen determinará la máxima resolución espacial que se pueda obtener. Así, cuanto más pequeño es el vóxel, mayor será la resolución espacial, mientras que entre más grande sea el vóxel, las imágenes perderán resolución y se verán “pixeladas”, como cuando se agranda una fotografía digital.

Generalmente la adquisición de vóxeles más pequeños lleva más tiempo, por lo que el experimento debe durar más. Ello puede ocasionar “ruido”, es decir, fluctuaciones en la señal debidas a factores no controlados en el experimento, tales como movimientos seguidos y bruscos como un estornudo. Por tanto, para obtener resultados robustos y confiables con un RMf es importante contar con una buena señal que sea fácilmente distinguible del ruido.

Para ello, durante su adquisición las imágenes pasan por un proceso de realineación, normalización, suavizado y, finalmente un análisis estadístico de cada uno de los vóxeles según el número de imágenes obtenidas (volumen), aceptando aquellas que alcanzaron significación estadística y rechazando aquellas que no lo hicieron. Con esos datos se genera un mapa estadístico paramétrico (en inglés, Statistical Parametric Map, SPM), que se superpone en imágenes estructurales donde se relacionan los vóxeles estadísticamente significativos con una región anatómica específica del cerebro (Armony et al., 2012).

Por todo lo anterior, en un experimento con RMf es importante considerar el número de imágenes a obtener. Por ejemplo, en un estudio típico con RMf se adquieren entre 100 y 300 volúmenes, cada uno formado por 30 cortes de 64 por 64 píxeles, dando un total de 10 millones de datos. Estadísticamente a mayor número de observaciones, mejores resultados y potencia estadística. No obstante, eso también incrementa significativamente la duración

de un experimento, lo que puede generar ruido en los datos debido a factores conductuales del sujeto como fatiga, disminución de atención, habituación a los estímulos, entre otros (Armony et al., 2012). Como puede deducirse, el procesamiento y análisis de imágenes de un experimento con RMf son muy complejos, requieren de una metodología rigurosa, avanzados conocimientos en neuroanatomía funcional y una sólida experiencia en procesamiento de imágenes médicas tipo BOLD (Krainik, 2011).

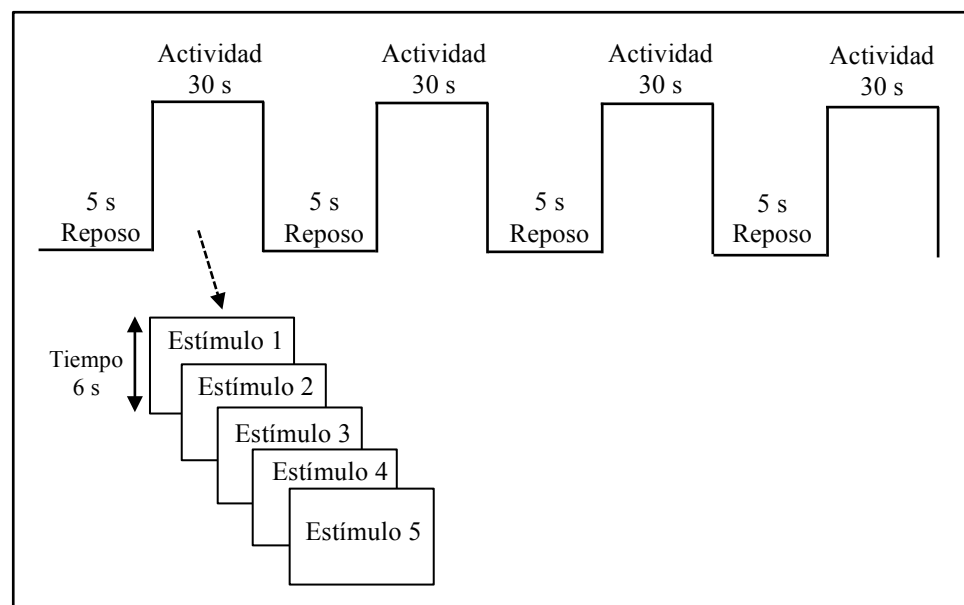
1.1.2 Paradigmas experimentales (tarea)

Para generar imágenes de la actividad cognitiva mediante RMf se emplean tareas experimentales conocidas como paradigmas, que son un conjunto de estímulos organizados en pautas temporales que conforman la tarea que debe realizar el sujeto durante la adquisición de imágenes (Cabrales, 2015). El objetivo de un paradigma es activar procesos mentales específicos para identificar la arquitectura cognitivo-funcional subyacente a ellos (Ríos-Lago, 2008).

Existen dos tipos de diseños de paradigmas para RMf: el diseño de bloques y el diseño relacionado con eventos. El primero consiste en presentar dos o más condiciones alternadamente en bloques de actividad (“condición experimental”) o control (“reposo” o “línea base”) durante un tiempo previamente establecido (Figura 1):

Figura 1

Ejemplo de secuencia de un paradigma con diseño de bloques



El tiempo de reposo es de 5 segundos (s) y el tiempo de actividad es de 30 s.

Nota: Diseño del Autor.

En estado de reposo el sujeto no realiza ninguna acción o se le presentan estímulos ajenos a la tarea diana, mientras que en la condición de actividad el sujeto resuelve el ejercicio propuesto. Un aspecto importante en el diseño de bloques es que cada estado de

actividad contiene una sola condición o tipo de tarea y las áreas cerebrales involucradas en la condición experimental se obtienen sustrayendo la señal obtenida durante los bloques de control (reposo o línea base) de aquella perteneciente a los bloques de actividad (Manes y Báez, 2019).

Entre las principales ventajas de este tipo de diseño se tienen su sencillez de aplicación y adquisición de imágenes, así como su alta potencia estadística. Es por ello que los paradigmas con diseño de bloques son los más utilizados en el ámbito clínico (Armony et al., 2012; Ríos-Lago, 2008).

Por su parte, el diseño relacionado a eventos consiste en presentar distintas condiciones experimentales de forma aleatoria o pseudoaleatoria. Este tipo de diseño es más complejo de desarrollar, aplicar, procesar e interpretar (Manes y Baéz, 2019). Por ello su uso es casi exclusivo para la investigación (Ríos-Lago, 2008). No obstante, permite caracterizar la señal BOLD en función de los distintos tipos de ensayo o de las respuestas del sujeto, ejecución de la tarea, tiempos de reacción, tipo de errores, etc.

Durante la fase de análisis en un diseño relacionado a eventos se obtiene una “respuesta hemodinámica promedio” para cada tipo de estímulo, respuesta o ensayo, así como un mapa estadístico. Por tanto, este tipo de diseños son más ricos en cuanto a las posibilidades que ofrecen y, a diferencia de los problemas de habituación y de expectación de los diseño de bloques, eliminan la posible confusión entre el “estado general del sujeto” y la “respuesta específica al estímulo” permitiendo aumentar el número de conclusiones que se pueden obtener en una misma adquisición, aumentando así la especificidad en cada una de ellas (Ríos-Lago, 2008). Sin embargo, el diseño de eventos tiene una potencia estadística mucho menor, por lo que generalmente necesitan más tiempo de aplicación, especialmente cuando existen varias condiciones de investigación (Armony et al., 2012).

Por otra parte, los paradigmas más frecuentes en los estudios clínicos con RMf son los visuales, motores y de lenguaje debido a su utilidad, validez, confiabilidad y estandarización. Incluso las tareas motoras han sido validadas mediante otras técnicas de neuroimagen como la electrocorticografía (ECoG) y la estimulación magnética transcraneal (TMS).

Los estudios motores están dirigidos a la localización de la red motora: áreas motoras primarias, suplementaria y cerebelo. Algunos ejemplos de paradigmas motores consisten en movimientos reales o simulados de las manos, pies, labios y lengua. Uno de los más empleados es la tarea llamada “finger-tapping”, en la cual la persona debe ir tocando con el pulgar de forma secuencial cada uno de los otros dedos de la mano.

Por su parte, el objetivo de los paradigmas de lenguaje es su localización y lateralización de sus componentes. Entre los más comunes están las tareas de fluidez verbal, generación de antónimo y sinónimos, comprensión de lectura, categorización semántica, repetición de palabras, denominación de objetos, etc. Los paradigmas de lenguaje tienen una alta fiabilidad test-retest y son los más extendidos en el uso clínico prequirúrgicos (Cortés et al., 2019; Ríos-Lago, 2008). Debido a ello, incluso la Sociedad

Americana de Neurorradiología Funcional (ASFNR, por sus siglas en inglés de American Society of Functional Neurology), ha propuesto la adopción estandarizada de paradigmas de lenguaje para RMf tanto para adultos como para niños con tareas como focalización de oraciones, generación silenciosa de palabras, rimas, denominación de objetos, escucha pasiva de historias y generación de antónimos (Black et al., 2017).

Como se aprecia, el empleo de la RMf en el área clínica está enfocado en el diagnóstico pre y post quirúrgico, así como para determinar el hemisferio dominante para el lenguaje y la memoria. No obstante, entre otras aplicaciones clínicas de la RMf tenemos (Ríos-Lago, 2008):

- demostrar el funcionamiento anormal del cerebro con fines de diagnóstico
- localizar la actividad asociada a la función cerebral lesionada
- estudiar los mecanismos de recuperación de la función mental después de una lesión cerebral o desarrollo anormal
- ser un biomarcador objetivo para evaluar la respuesta terapéutica y el pronóstico de los pacientes.

Cabe señalar que las imágenes obtenidas con RMf mediante paradigmas específicos no valoran el estado de procesos mentales como la atención, la memoria, el razonamiento abstracto o el lenguaje, puesto que cada función cognitiva es el resultado de una interrelación compleja entre varias áreas cerebrales. Tampoco permite determinar el grado de severidad de alteraciones cognitivas o conductuales productos de un daño cerebral (Armony et al., 2012). Es por ello que el uso clínico de la RMf es muy limitado y para que su uso se generalice se deben cumplir ciertos criterios (Ríos-Lago, 2008):

- *Desarrollar paradigmas específicos* para evocar la actividad neurológica de interés. Dichos paradigmas debe estar *validados* en sujetos sanos.
- Los procedimientos deben ser aplicables a la mayor cantidad de pacientes.
- Los resultados deben aportar información relevante en los estudios de caso único.
- La información proporcionada debe tener *validez convergente* proporcionada por la prueba de Wada (TW) o por electrocorticografía intra-operatoria.
- La información debe ser fiable como la que aportan otros métodos válidos.
- Se debe contar con *datos normativos* de actividad cerebral relacionados con datos demográficos y clínicos que incluyan edades, niveles educativos, grado de dificultad de la tarea, entre otros.

Aun así, la RMf ofrece información complementaria muy importante en la toma de decisiones clínicas y experimentales. Para ello se apoya en un equipo multidisciplinario formado por neurólogos, técnicos, médicos, ingenieros especializados en procesamiento de imágenes médicas, neuropsicólogos, entre otros. Entre las funciones del neuropsicólogo en

los estudios con RMf están: trazar un perfil neuropsicológico de los pacientes para seleccionar los paradigmas apropiados para su evaluación con RMf, entrenar a los sujetos y controlar la ejecución de paradigmas dentro del magneto, *diseñar paradigmas para suscitar procesos cognitivos específicos que tengan una alta especificidad, validez, confiabilidad y sean reproducibles para estudios control* y, por último, apoyar en la interpretación de los resultados mediante el análisis de la relación de las áreas cerebrales activadas con aquellas funciones mentales estudiadas a través de paradigmas específicos (Cabrales, 2015).

Como se puede observar, la RMf es una herramienta más de la que dispone el neuropsicólogo para el estudio del cerebro y su relación con la conducta. Sin embargo, y a pesar de una larga historia en la práctica clínica y de miles de artículos científicos, el rol de la RMf aún se centra en la elaboración de mapas corticales previo a una intervención quirúrgica o para la lateralización de funciones cerebrales (Cabrales, 2015; Krainik, 2011; Ríos-Lago, 2008). Es por eso que otra importante función del neuropsicólogo es promover y maximizar el uso de la RMf como un instrumento de investigación para las neurociencias, puesto que en un futuro cercano la neuroimagen funcional llegará a ser un campo de especialización en la ciencia psicológica (Ríos-Lago, 2008).

Si bien existe una gran cantidad de paradigmas motores y de lenguaje para RMf, también se han empleado paradigmas para mapear las zonas cerebrales involucradas en otras funciones cognitivas superiores como el razonamiento abstracto o la memoria. Por su naturaleza, dichas funciones implican un grado más complejo de estudio dentro de un RMf debido a las consideraciones técnicas del aparato y la validez y confiabilidad de los paradigmas empleados. No obstante, existen investigaciones de neuroimagen que han logrado trazar un mapa cerebral de las áreas implicadas en procesos mentales superiores.

El razonamiento abstracto es un proceso mental superior que ha sido localizado en la corteza prefrontal y en otras zonas subcorticales del cerebro (Hobeika, et al., 2016). La neuropsicología ha clasificado al razonamiento abstracto como una función ejecutiva implicada en la regulación de la conducta y el control cognitivo (Henríquez et al., 2019; Portellano, 2005). Por su parte, la psicometría ha documentado un aumento progresivo en los puntajes de diversas pruebas de razonamiento abstracto a lo largo de todo el siglo XX. Eso significa que las actuales generaciones tienen una mayor capacidad para manipular mentalmente símbolos, hipotetizar, emplear la lógica, realizar categorizaciones y establecer analogías (Flynn, 1999, 2007). Incluso se ha considerado al razonamiento abstracto como una de las posibles explicaciones para el declive mundial de la violencia, puesto que dichas facultades mentales inhibirían pensamientos y conductas relacionadas con la venganza, la impulsividad, la agresividad, el tribalismo, entre otras (Pinker, 2011, 2012).

A continuación, describiremos anatómicamente los componentes del lóbulo frontal y las características de la corteza prefrontal, así como sus principales facultades cognitivas implicadas en el control cognitivo y regulación conductual. Luego, se expondrán los enfoques de investigación del razonamiento abstracto y sus componentes neuropsicológicos.

CAPÍTULO SEGUNDO

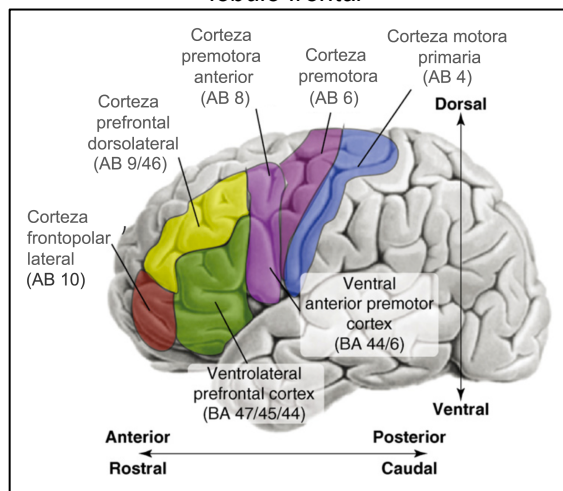
RAZONAMIENTO ABSTRACTO

2.1 Bases cerebrales del razonamiento abstracto

El avance de las técnicas de neuroimagen ha permitido identificar con precisión las áreas cerebrales relacionadas con la actividad de funciones cognitivas específicas. Para el abordaje teórico y clínico de las funciones del encéfalo y sus anomalías el neuropsicólogo se apoya en las áreas de Brodmann (AB).

El cerebro está formado por el lóbulo frontal, parietal, temporal, occipital y la ínsula. Los lóbulos están divididos por dos surcos profundos, el surco lateral (o cisura de Silvio) y el surco central (o cisura de Rolando). El lóbulo frontal se localiza por delante al surco central y arriba del surco lateral (Figura 2). La zona posterior que está por delante de la cisura de Rolando se conoce como área motora primaria (AB 4) que se encarga del control de los movimientos voluntarios del lado opuesto del cuerpo. Junto al área 4 de Brodmann, en la porción rostral del lóbulo frontal, está el área premotora (AB 6) cuya función es la planificación y programación de los movimientos complejos del hemicuerpo opuesto (Valadez y Granados, 2012):

Figura 2
Principales subdivisiones anatómicas del lóbulo frontal



Nota. Tomado de Badre (2008, p.194).

Como se ve en la figura 2, la corteza prefrontal y sus diferentes áreas están ubicadas por delante de las zonas premotoras del lóbulo frontal, ocupan el polo frontal y el giro frontal medial y se dividen en orbitofrontales, dorsolaterales y prefrontales mediales que corresponden a las áreas 9, 10, 11, 46, 47 así como la parte anterior de la 8, 12 y 13 de Brodmann. Según Portellano (2005) y Valadez y Granados (2012) la resolución de problemas, la activación de memorias, las estrategias organizacionales, el razonamiento abstracto, el control y regulación atencional, la formación de conceptos, la organización

temporal del comportamiento y la generación de acciones voluntarias se generan en la corteza dorsolateral, áreas 9 y 46 de Brodmann.

Desde el punto anatómico las áreas prefrontales reciben la mayor cantidad de conexiones aferentes corticales, ya que todas las zonas de la corteza envían fibras hacia esas regiones. También tienen conexiones recíprocas con estructuras subcorticales como la amígdala, el hipocampo, el núcleo accumbens, los núcleos basales, la corteza del cíngulo, el colículo superior, el área tegmental ventral o área de Tsai y la corteza.

Por su parte, las conexiones eferentes de la corteza prefrontal se establecen con estructuras subcorticales del sistema límbico, el hipotálamo, la sustancia gris periacueductual, algunos núcleos del tallo cerebral, el área de Tsai, los núcleos del raphé mesencefálico, el núcleo pedunculopontino, los núcleos parabranquiales y el locus coeruleus (Valadez y Granados, 2012). El córtex prefrontal no tiene conexiones con las áreas motoras primarias, por lo que sus lesiones no provocan parálisis.

Según Portellano (2005) la corteza prefrontal es la base del pensamiento más complejo, específico y simbólico, es la máxima expresión del desarrollo cerebral en la especie humana, por lo que también se la denomina el “centro de la humanidad”. Está relacionada con procesos cognitivos básicos (sensación, percepción, atención, memoria, concentración) y superiores (pensamiento, lenguaje, inteligencia).

La corteza prefrontal está asociada a procesos complejos como la intencionalidad, supervisión y control del comportamiento, o lo que se denomina globalmente como funciones ejecutivas. Por lo tanto, la corteza prefrontal funge un rol principalmente ejecutivo con el apoyo de otras estructuras corticales y subcorticales para la implementación de planes de acción (Henríquez et al., 2019).

2.2 Las funciones ejecutivas

El término “funciones ejecutivas” fue acuñado por primera vez por la neuropsicóloga Muriel Lezak en 1983 para referirse a las capacidades para llevar a cabo una conducta eficaz, creativa y socialmente aceptada (Muñoz y Tirapu, 2004). Sin embargo, los antecedentes conceptuales fueron propuestos por Alexander Luria en su modelo de unidades funcionales del cerebro, en el que el tercer sistema, localizado en el lóbulo frontal, se relacionaba con la programación, control y verificación de la actividad.

Para Henríquez et al. (2019) las funciones ejecutivas comprenden un amplio repertorio de conductas y procesos cognitivos como tareas múltiples o en paralelo, flexibilidad cognitiva, razonamiento verbal, resolución de problemas, secuenciación, planificación, mantenimiento de la atención, utilización de retroalimentación o resistencia a la interferencia. También incluye la auto-regulación de la conducta y el control cognitivo. La primera se refiere a la capacidad de responder mediante conductas adecuadas a las situaciones que demanda la vida cotidiana, es decir, es la capacidad de modificar el comportamiento de acuerdo al entorno y las consecuencias de las acciones realizadas por

el sujeto; mientras que el control cognitivo es la capacidad de regular, coordinar y secuenciar el pensamiento y las acciones para el logro de objetivos internos.

Las conceptualizaciones de las funciones ejecutivas son diversas y aún no existe entre los autores una definición consensuada. No obstante, muchas de las definiciones concuerdan en que las funciones ejecutivas se refieren al control cognitivo y la regulación de la conducta para lograr un objetivo (Henríquez et al., 2019). Y entre los elementos que la mayoría de autores incluyen en su conceptualización están: la planificación, inhibición, flexibilidad cognitiva, iniciación y memoria (Cid et al., 2016).

El desarrollo de las funciones ejecutivas se relaciona directamente con el crecimiento del cerebro, especialmente con la maduración de la corteza prefrontal. Si bien el córtex prefrontal es una de las últimas estructuras cerebrales en madurar, el desarrollo de las funciones ejecutivas inicia en la primera infancia y culmina alrededor de los veinte años de edad. Incluso se han podido diferenciar fases en el desarrollo de las funciones ejecutivas en los primeros cinco años de edad (Cid et al., 2016)

Por otra parte, el estudio de lesiones y las variaciones de actividad de las áreas prefrontales han permitido describir varios trastornos conocidos como síndromes prefrontales o disejecutivos. Entre ellos están el síndrome dorsolateral, medial, orbitofrontal y prefrontal global, cada uno de ellos con su propia sintomatología. Por ejemplo, en el síndrome orbitofrontal se presentan cambios de personalidad, descontrol de impulsos, etc. En el síndrome medial existe abulia, ausencia de respuestas motoras, verbales o emocionales, entre otras. Y entre la sintomatología que se manifiesta debido a lesiones del área dorsolateral están (Portellano, 2005; Valadez y Granados, 2012):

- incapacidad para generar nuevas hipótesis
- dificultad de resolución de problemas complejos
- pérdida de flexibilidad mental
- disminución de fluidez verbal
- incapacidad para establecer nuevas categorías o abstraer ideas
- dificultades de categorización
- problemas para la formación de nuevos conceptos
- disminución de la inteligencia fluida (Gf).

Como puede observarse, la corteza prefrontal se relaciona más específicamente con la abstracción y la inteligencia fluida. Cuando existe una lesión en los lóbulos frontales, la inteligencia en términos generales no se ve disminuida; es decir no se altera la inteligencia cristalizada (Gc), que depende de aprendizajes de tipo cultural, mientras que la inteligencia fluida (Gf), que dependen menos de factores culturales, se ve severamente afectada. Eso se evidencia en el bajo rendimiento de pruebas de razonamiento abstracto del tipo matrices progresivas de Raven (Flanagan y Kaufman, 2012; Portellano, 2005).

De esa manera, las funciones ejecutivas coordinan y supervisan procesos cognitivos del lóbulo frontal relacionados con la inteligencia en general, atención, memoria, lenguaje, flexibilidad mental, control motor y regulación conductual, emocional y cognitiva (Henríquez et al., 2019; Portellano, 2005). El razonamiento abstracto es un proceso fundamental en el desempeño intelectual y cotidiano de una persona, debido a un medio social y laboral cada vez más complejo que demanda nuevas habilidades cognitivas. A continuación, se exponen los enfoques investigativos del razonamiento abstracto.

2.3 Enfoques investigativos del razonamiento abstracto

Según van de Vijver (2006) existen dos tradiciones de investigación en la psicología cognitiva para el estudio de la relación entre la cultura y el razonamiento abstracto: el enfoque formal y el informal. En el primero, el enfoque científico es el modelo normativo para una adecuada solución de problemas. Ahí, se hace énfasis en la aplicación del razonamiento inductivo y deductivo para resolver de manera formal problemas teóricos que son poco probables de encontrarse en la vida diaria como problemas simbólicos e hipotéticos. El enfoque formal ha estudiado el pensamiento abstracto desde dos ámbitos: la teoría del desarrollo cognitivo de Jean Piaget y la psicometría

En el enfoque informal el modelo implícito de resolución de problemas se centra en la capacidad del sujeto, quien sin conocimientos científicos previos, crea una relación de hechos basada en la observación y la tradición previas. Es decir, el pensamiento abstracto está orientado por procedimientos concretos derivados de las experiencias cotidianas y soluciones preestablecidas..

2.3.1 El enfoque piagetiano del razonamiento abstracto

La teoría piagetiana propuso cuatro etapas del desarrollo cognitivo: la etapa sensorio-motora, pre-operacional, operaciones concretas y operaciones formales. Según Piaget el razonamiento abstracto emerge en la etapa de operaciones formales, entre los 11 y 15 años de edad, cuando los niños ya son capaces de manejar suposiciones (sin relación con la realidad), realizan operaciones mentales de segundo orden, manipulan conjuntos abstractos, separan “forma” y “contenido”, manejan conceptos de probabilidad y proporcionalidad, piensan en términos hipotéticos-deductivos más que en términos concretos, usan la lógica en símbolos relacionados con conceptos abstractos, entre otros (van de Vijver y Willemsen, 1993; van de Vijver, 2006).

Según Piaget el desarrollo de dichas habilidades cognitivas en la adolescencia van de la mano con la maduración biológica y las experiencias ambientales del joven. Por ejemplo, tómesese como referencia las operaciones de segundo orden que involucran operaciones cognitivas realizadas sobre los resultados de operaciones cognitivas previas que el niño escolar aún no es capaz de realizar mentalmente, sino hasta la adolescencia.

Por ejemplo, para resolver el siguiente ejercicio de extrapolación “1, 2, 4, 7, 11,…” son necesarias dos transformaciones cognitivas basadas en operaciones previas: la serie “1, 2, 4, 7, 11,…” debe ser transformada a una serie resultante de la diferencia del número subsecuente “1 (= 2-1), 2 (= 4-2), 3 (= 7-4), 4 (= 11-7). Luego, esa nueva serie “1, 2, 3, 4…” debe ser extrapolada (“5, 6,…”.) y los resultados de la extrapolación deben ser aplicados a la serie original (“1, 2, 4, 7, 11,…”.) produciendo “16 (= 11+5), 22 (= 16+6), 29 (= 22+7)” y así sucesivamente (van de Vijver y Willmensen, 1993).

Según la teoría piagetiana, a la etapa de operaciones formales le precede la etapa operaciones concretas, entre los 7 y 11 años de edad. Andrea diSessa explica el pensamiento concreto a través de los “primitivos fenomenológicos” (o p-prims, del inglés *phenomenological primitive*), que son abstracciones relativamente simples que generalmente se originan de experiencias cotidianas comunes (diSessa y Sherin, 1998). Es decir, los p-prims son productos de interpretaciones superficiales de la realidad experimentada en lo cotidiano y proporcionan a las personas un amplio vocabulario con el que recuerdan e interpretan esas experiencias. Es lo sencillamente evidente que se desprende de la experiencia, por tanto, no necesitan de justificaciones (diSessa, 1993). Ser concreto significa enfocarse en la estructura superficial cotidiana y obvia de problemas en áreas como la física o la biología (Smith et al., 1993).

La transición del razonamiento concreto al abstracto se considera como un crecimiento cognitivo dentro de un sistema complejo de conocimientos que diferencia al sujeto experto (doctor) del novato (estudiante). El razonamiento del novato se considera concreto, mientras que el razonamiento del experto se considera abstracto (Smith et al., 1993). James Flynn (2007) ejemplifica el pensamiento concreto mediante una serie de entrevistas que realizó Alexander Luria a campesinos de las zonas rurales de la Unión Soviética en 1900. En ese entonces la gente contaba con un máximo de cuatro años de escolaridad (p.26):

P: ¿Qué tienen en común un pollo y un perro?

R: No son semejantes. Un pollo tiene dos patas, un perro tiene cuatro. Un pollo tiene alas, el perro no. Un perro tiene orejas grandes y el pollo pequeñas.

P: ¿Hay una palabra que podrías utilizar para ambos?

R: No, claro que no.

P: ¿Encajaría la palabra *animal*?

R: Sí.

Como se puede observar en la entrevista el sujeto se resiste a clasificar su mundo concreto y es incapaz de analizar la abstracción del enunciado (categorización). Según la teoría piagetiana en la etapa pre-operacional los niños razonan principalmente en términos concretos, mientras que en la etapa de operaciones formales, el adolescente es capaz de deducir la abstracción de un enunciado hipotético o simbólico. Así, el razonamiento

abstracto constituye, hasta cierto punto, la principal barrera que divide a expertos de novatos en el aprendizaje de conceptos científicos. Por ejemplo, aprender física newtoniana significa dejar el mundo cotidiano de los objetos concretos y adentrarse en el mundo abstracto de la física a través de la educación directa de conceptos de expertos (Smith et al., 1993).

Piaget estudió la etapa operacional-formal mediante ejercicios experimentales de física en los cuales el sujeto debía evaluar el impacto de variables relevantes a través de la manipulación cognitiva experimental. Por ejemplo, en un ejercicio sobre el péndulo se pedía al sujeto que determinase cuál de las siguientes variables determinaba su tiempo de oscilación: la longitud de la cuerda, el peso del péndulo, el ángulo de balanceo o el impulso inicial del peso al comienzo del movimiento.

Ese tipo de pruebas se aplicó a sujetos de diferentes culturas y se halló un bajo rendimiento en las mismas tanto en grupos occidentales, como en no occidentales. Al parecer el método de evaluación afectaba el resultado de las pruebas y se identificó que la abstracción, a pesar de basarse en reglas independientes del contexto (como la lógica), es dominio-específico (Cosmides y Tooby, 2002; van de Vijver, 2006).

Asimismo, contrario a las postulaciones piagetianas, se ha demostrado que los niños preescolares y escolares construyen hipótesis y realizan inferencias acerca del mundo de objetos físicos, psicológicos y biológicos. Por ejemplo, los niños de primer y segundo grado son capaces de inferir que una mofeta que se le opera para darle aspecto de mapache, continúa teniendo padres y órganos internos de mofeta. No realizan la misma inferencia cuando se trata de un objeto físico como una cafetera que se modifica para que pareciera un comedero de pájaros. Es decir, desde muy tempranas edades, los niños son capaces de separar sus inferencias y aplicarlas de acuerdo a los dominios específicos como el comportamiento de los objetos (física) o el parentesco (biología) (Hirschfeld y Gelman, 2002)

2.3.2 El enfoque psicométrico del razonamiento abstracto

Por su parte, la investigación psicométrica del razonamiento abstracto se remonta a los años veinte cuando Charles Spearman reconoció, por primera vez, su importancia en el funcionamiento intelectual. Su estudio se basa en los modelos occidentales del concepto de inteligencia y en el empleo de pruebas psicométricas estandarizadas como las matrices progresivas de Raven y las escalas de inteligencia de David Wechsler conocida como WISC (del inglés, Wechsler Intelligence Scale for Children o Escala de Inteligencia Wechsler para niños). Con dichos instrumentos se han realizado investigaciones comparativas entre diversos países y grupos étnicos.

Los estudios han demostrado consistencia en sus resultados y se ha comprobado que la estructura de la inteligencia es idéntica a través de los grupos culturales. Sin embargo, también se han reportado diferencias significativas en los puntajes de pruebas

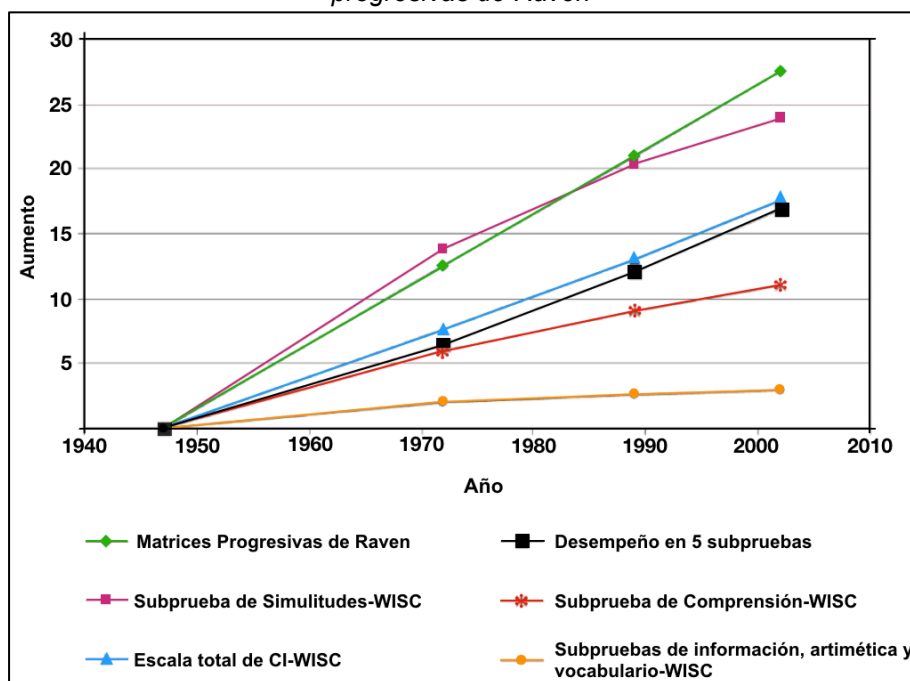
que evalúan el razonamiento abstracto entre grupos étnicos y entre poblaciones occidentales y no occidentales. Dichos resultados se han intentado explicar a la luz de la diversidad cultural, la influencia de la escolaridad y las potenciales dificultades de las pruebas de inteligencia como una “fuente” de evaluación de diferencias de desempeño interculturales (van de Vijver, 2006).

No obstante, las diferencias en dichos puntajes son reales y han sido bien documentadas alrededor del mundo. Así, en los años ochenta James Flynn descubrió que los puntajes de coeficiente intelectual (CI) de las principales pruebas estandarizadas de inteligencia, como la WISC y las matrices progresivas de Raven, aumentaron en tres puntos cada diez años a lo largo del siglo XX (Figura 3). A ese fenómeno persistente, y quizás universal, se conoce actualmente como “Efecto Flynn” (Flynn 1999, 2007; Stobart, 2010).

Lo sorprendente es que el incremento de puntajes revelados por Flynn no se dio en la capacidad intelectual total, sino que se concentró en las pruebas de razonamiento abstracto como analogías o similitudes (Flynn 2007; Pinker, 2011). Eso quiere decir que los niños y adolescentes de hoy son mejores que sus padres y abuelos para resolver problemas de forma simbólica alejándose del razonamiento concreto:

Figura 3

Aumento de puntajes en pruebas de inteligencia WISC y Matrices progresivas de Raven



Se muestran los puntajes de Coeficiente Intelectual (CI) de la WISC empezando desde 1947-1948 hasta el año 2002.

Nota: Tomado de Flynn (2007, p. 8).

Adaptado por el autor

Entre las probables razones del efecto Flynn están la calidad y duración de la escolarización, la manipulación de símbolos en el trabajo y en actividades de ocio, el uso frecuente del razonamiento científico y analítico en la vida cotidiana, el mejoramiento

nutricional, un medio social más complejo y nuevas estructuras familiares caracterizadas por un menor número de hijos, lo que supondría mayores recursos para una mejor alimentación, escolarización e insumos educativos (Daley et al., 2003; Pinker, 2011).

2.4 Componentes conceptuales del razonamiento abstracto

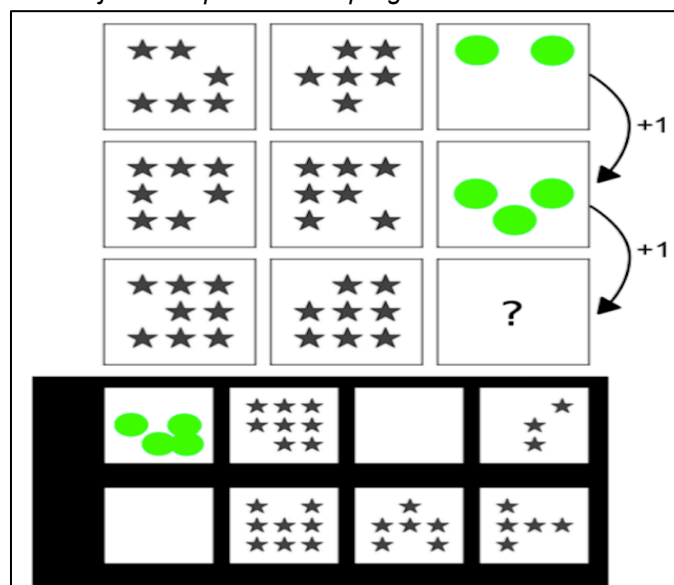
Por lo general, el enfoque psicométrico ha estudiado el razonamiento abstracto mediante pruebas de similitudes (“¿en qué se parecen un reloj y una regla?”), analogías (“pájaro es a huevo, como árbol es a...”), clasificación (“¿qué animal no pertenece a la siguiente fila: ballena, tiburón, delfín, león?”), secuenciación (“continúe con la siguiente secuencia: o + oo ++ ooo...”), entre otras.

Para resolver dichas pruebas se deben hacer relaciones conceptuales entre objetos, generar conclusiones, categorizar y percibir visualmente un patrón lógico. A esas habilidades cognitivas también se las conoce como razonamiento o inteligencia fluida (Gf) que se define como las operaciones mentales que se usan para solucionar tareas relativamente nuevas que no pueden ser realizadas de forma automática (Flanagan y Kaufman, 2012).

El Gf incluye la formación y reconocimiento de conceptos, percepción de las relaciones entre patrones, obtención de conclusiones, comprensión de implicaciones, resolución de problemas, extrapolación y reorganización o transformación de información. Las tareas de Gf son importantes ya que dependen muy poco de los antecedentes culturales y educativos. Un ejemplo de ello son las pruebas *tipo* matrices progresivas de Raven (Flanagan y Kaufman, 2012) (Figura 4):

Figura 4

Ejercicio tipo matrices progresivas de Raven



La regla abstracta es un progresión aritmética del número de formas a lo largo de cada columna.

Nota: Tomado de Barrett (2018, p. 4477).

El razonamiento relacional es un proceso clave del Gf (Hobeika et al., 2016), mientras que la inducción (inferir a partir de observaciones con el fin de hacer generalizaciones) y deducción (usar un principio de generalización con el fin de tratar de predecir el resultados de un evento) son indicadores de las habilidades específicas características del Gf (Flanagan y Kaufman, 2012). El razonamiento analógico es una forma de razonamiento relacional que depende de la capacidad para considerar y comparar relaciones e integrar y unir esas relaciones. La identificación de similitudes entre objetos o situaciones aparentemente diferentes, permite unir diferentes dominios de conocimiento y transferir soluciones de un dominio a otro. En el razonamiento analógico las similitudes son principalmente relacionales, puesto que se centran en las relaciones entre los componentes de los objetos, más que en los objetos en sí mismo. Por tanto, el razonamiento relacional apoya al pensamiento abstracto (Hobeika, et al., 2016).

2.5 El concepto de razonamiento abstracto

Tanto el enfoque de estudio formal, como el informal han demostrado que el razonamiento abstracto es un universal cognitivo que se puede encontrar, con sus respectivas similitudes y diferencias, en todos los grupos culturales. Así, podemos concluir que el razonamiento abstracto es un sello distintivo de la inteligencia humana, es el núcleo de diversos tipos de pensamientos complejos, tales como el razonamiento inductivo, deductivo, lógico, probabilístico, proporcional y condicional (van de Vijver y Willesmsen, 1993). La abstracción es un nivel elevado del pensamiento y se asocia a la capacidad de analizar fenómenos de forma simbólica, separando las cualidades de un objeto o fenómeno para captar su significado o esencia.

El pensamiento abstracto no necesita de estímulos concretos y genera conclusiones a partir del razonamiento lógico y el uso de premisas, conceptos y categorías que destacan sus aspectos y relaciones fundamentales; es la capacidad de conocer el mundo más allá de los sentidos (Jaramillo y Puga, 2016).

2.6 Redes neurológicas del razonamiento abstracto

Las bases neurológicas del razonamiento abstracto se han mapeado con diferentes técnicas de neuroimagen funcional mediante la aplicación de paradigmas de analogías semánticas y visoespaciales. En ese sentido, un metaanálisis de estudios con técnicas de neuroimagen funcional identificó, de forma general, que la red neurológica involucrada en el razonamiento abstracto está formada por una red frontoparietal bilateral que incluye la corteza prefrontal rostrolateral izquierda, centrada en el AB 10, con extensión a las AB 47, 45 y 46, la ínsula bilateral, la corteza parietal posterior (AB 7 y 40), algunos sectores de la región posterior del giro frontal inferior, giro frontal medio, surco frontal superior, córtex

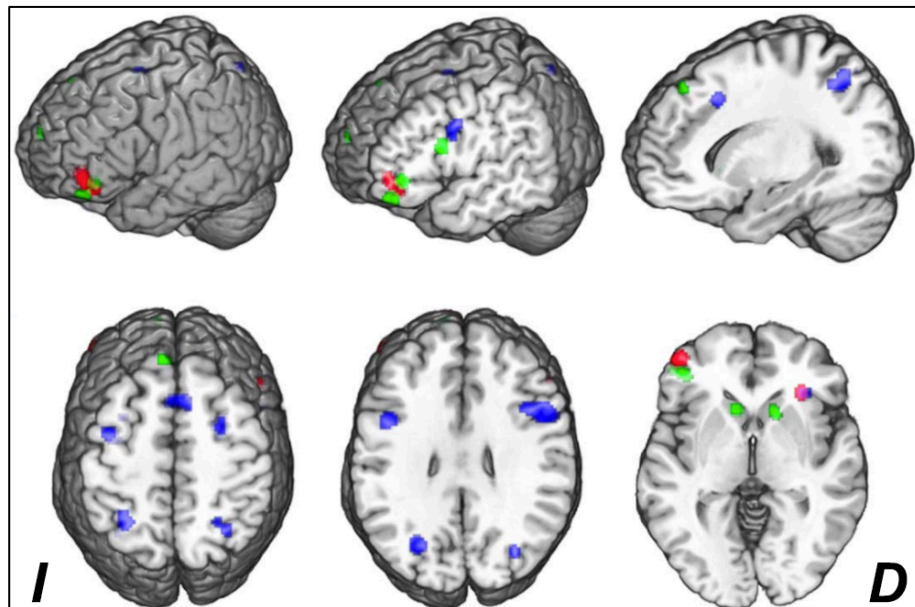
prefrontal medial y la región dorsolateral derecha (AB 9, parte posterior del giro frontal inferior) (Hobeika et al., 2016).

De forma más específica (véase la figura 5), en el *razonamiento analógico-semántico* participa una red prefrontal lateral izquierda, con principal actividad en el sector rostrolateral del giro frontal inferior y giro frontal medio izquierdos (AB 10, 47 y 46). Otro sector de activación se detectó en la parte posterior del giro frontal inferior izquierdo (AB 44). Otras áreas adicionales de activación fueron en circunvolución frontal superior en el sector anterior (AB 9) y dorsal (AB 8) y en las cabezas del núcleo caudado bilaterales. En el *razonamiento analógico-visoespacial* están involucradas cuatro áreas corticales, con mayor preponderancia en la región rostrolateral del surco frontal inferior izquierdo y la circunvolución (AB 10, 47 y 46), así como el giro frontal medio derecho (AB9), la ínsula anterior derecha y el cerebelo.

Por su parte, el sistema neurológico involucrado en la resolución de ejercicios de matrices *tipo matrices de Raven* está formada por una amplia red frontoparietal bilateral distribuida en ocho grupos de activación: las áreas más grandes se localizan bilateralmente en el lóbulo parietal extendiéndose desde las regiones superiores a las inferiores (AB 7 y 40), y en el precuneus (AB 7 y 31). En el lóbulo frontal participan bilateralmente la corteza prefrontal posterior y dorsolateral centrado en el surco frontal inferior posterior (AB 6, 44 y 9) con predominio derecho, en la región posterior de las regiones frontales superiores centrados en el surco frontal superior posterior (AB 6 y 8) y en la corteza prefrontal medial bilateral. Dos zonas adicionales de activación se identificaron en la región anterior de la ínsula derecha y en la circunvolución cingulada izquierda (AB 32) (Hobeika et al., 2016).

Figura 5

Áreas corticales involucradas en el razonamiento abstracto.



Los colores representan: **analogías semánticas**, **analogías visoespaciales** y **problemas de matrices**.

Nota: Tomado de Hobeika et al. (2016, p. 1959).

Como se observa en la figura 5, las redes neuronales involucradas en el razonamiento abstracto involucran estructuras corticales y subcorticales. Si bien, la figura 5 muestra didácticamente la localización de las zonas cerebrales, es importante señalar que en las tareas de razonamiento abstracto también interactúan otras áreas cerebrales relacionadas con la memoria de trabajo y la atención (Hammer, et al., 2019; Modi et al., 2018). Es decir, mientras un sujeto es sometido a un paradigma abstracto, no sólo se activan las zonas específicas de la corteza prefrontal, sino que los hallazgos muestran que dicha activación es el resultado de una compleja interacción neuronal en la que participan otras estructuras y áreas corticales (Trápaga, 2018).

Como ya se mencionó, las lesiones en la corteza prefrontal, y más específicamente en el área dorsolateral, están relacionadas con una disminución en la inteligencia fluida (Gf), por lo que el desempeño en pruebas de razonamiento abstracto se ve severamente afectado (Portellano, 2005). Por otra parte, el “Efecto Flynn” ha demostrado un aumento progresivo en los puntajes de pruebas de razonamiento abstracto en las principales pruebas de Coeficiente Intelectual como la WISC o las matrices progresivas de Raven (Flynn 1999, 2007). Así, quizás un bajo desempeño en pruebas de abstracción no sólo se relacione con el daño cerebral, sino también con la evolución progresiva de una sociedad cada vez más compleja que demanda nuevas habilidades cognitivas para el desempeño cotidiano, laboral, escolar, profesional y tecnológico.

Eso indicaría una diferencia de conectividad o actividad en las redes neurológicas involucradas en el razonamiento abstracto entre las actuales generaciones y las anteriores (abuelos o adultos-mayores). Es muy probable que estos últimos presenten diferencias en la red neurológica del procesamiento abstracto, puesto que en la práctica clínica los adultos-mayores y las personas con pocos años de escolaridad, evidencian dificultades para resolver problemas de abstracción. Por ejemplo, cuando se pregunta las similitudes entre una regla y un reloj, muchos responden que ambos objetos tienen en común “los números”. Es decir, aplican un razonamiento de tipo concreto o fenomenológico.

En ese sentido, las técnicas de neuroimagen funcional podrían dar cuenta de las probables diferencias en la red neurológica del razonamiento abstracto entre grupos. Para ello, se tendrían que realizar comparaciones grupales (jóvenes vs adultos, sujetos escolarizados vs no escolarizados) y mapear su desempeño en la resolución de ejercicios abstractos dentro de un RMf. Y para obtener mejores resultados se debería contar con paradigmas abstractos válidos y confiables que mapeen acertadamente las áreas neurológicas a investigar.

CAPÍTULO TERCERO

METODOLOGÍA

3.1 Justificación

A nivel mundial la RMf se emplea principalmente en el ámbito clínico prequirúrgico más que en el área de investigación (Cabralés 2015; Krainik, 2011), y la mayoría de sus estudios se han centrado en la lateralización hemisférica de la función sensoriomotriz y del lenguaje (Cortés et al., 2019; Ríos-Lago, 2008).

Si bien existen muchos estudios con RMf en el área de la investigación que han explorado otras funciones cognitivas, como la atención, la memoria de trabajo o el razonamiento abstracto, no está claro si los paradigmas empleados en dichos estudios han pasado por un proceso previo de validación, como los empleados en el ámbito clínico que cuentan con un alto grado de validez y fiabilidad con otras técnicas neurológicas como la prueba de Wada o la electrocorticografía intraoperatoria.

En el caso del estudio del razonamiento abstracto mediante RMf, la literatura muestra que los paradigmas empleados son de gran diversidad: unos se basan en pruebas estandarizadas de inteligencia (Whitaker et al., 2017), otros emplean imágenes y palabras al mismo tiempo (Hammer et al., 2019) y otros se basan en pruebas psicológicas del tipo matrices progresivas de Raven (Hobeika et al., 2016; Modi et al., 2018). No obstante, dichos estudios no detallan en su metodología un proceso de validación de las tareas empleadas. De ahí la importancia de investigar si los paradigmas de razonamiento abstracto usados en nuevas investigaciones han pasado por un proceso de validación previo a su aplicación dentro del RMf. Con ello, se contaría con un marco de referencia que motivaría en el futuro el diseño y estandarización de paradigmas válidos y fiables que mapeen y localicen procesos cognitivos específicos mediante RMf.

Por otra parte, se calcula que a nivel mundial se publican diariamente tres estudios que utilizan RMf (Armony et al., 2012). En nuestro país, el uso de la RMf en el área de la investigación neuropsicológica es aún incipiente. Muestra de ello son los escasos estudios realizados con RMf para mapear procesos cognitivos superiores como la atención (Aguirre y Bustamante, 2014; Llivisaca, 2017), las funciones ejecutivas (Esparza, 2017), la memoria (Gutiérrez, 2017) y el lenguaje (Palacios, 2017). Irónicamente, dichas investigaciones se llevaron a cabo por el área de la ingeniería electrónica y de telecomunicaciones, y no desde las neurociencias. Es posible que eso se deba a la complejidad y al alto grado de especialización que se necesita para trabajar con imágenes médicas generadas por RMf, a sus altos costos de uso y a la ausencia de desarrollo de paradigmas válidos y confiables para RMf. Por tanto, el presente estudio es relevante porque indagará un tema poco explorado en nuestro medio y contribuirá a la potenciación del RMf como herramienta de investigación neuropsicológica. El estudio es viable y aportará nuevos datos al *corpus* de conocimiento de las neurociencias de nuestro país.

3.2 Preguntas de investigación

1. ¿Cuentan los estudios que usan paradigmas de razonamiento abstracto para RMf con procesos previos de validación estadística de las tareas experimentales empleadas? Si es así:

- 1.1 ¿Cuáles son las pruebas estadísticas empleadas en la validación?
- 1.2 ¿Cuáles son los datos normativos de la validación: características demográficas, clínicas, edad, escolaridad, dificultad?
- 1.3 ¿Cuál es el grado de validez y confiabilidad estadística?
- 1.4 ¿Cuentan los paradigmas con validez convergente con otras técnicas de neuroimagen? Si es así: ¿cuáles son esas técnicas?

2. ¿Cuáles son las características de los paradigmas de razonamiento abstracto empleados en los estudios de la revisión sistemática?

3.3 Objetivo general

Realizar una revisión sistemática de literatura relacionada con la validación de paradigmas de razonamiento abstracto para RMf.

3.4 Objetivos específicos

Esta revisión sistemática plantea cuatro objetivos específicos:

1. Desarrollar la metodología de búsqueda de literatura sobre paradigmas de razonamiento abstracto y RMf para bases de datos especializadas.
2. Desarrollar un protocolo de búsqueda reproducible de literatura relacionada con paradigmas de razonamiento abstracto y RMf.
3. Identificar los procesos de diseño, validación y confiabilidad de los paradigmas de razonamiento abstracto para RMf.
4. E identificar los tipos de paradigmas empleados en la literatura para el mapeo del razonamiento abstracto mediante RMf.

3.5 Hipótesis de investigación

Hi.: “Los estudios que emplean paradigmas de razonamiento abstracto para RMf cuentan con validación estadística de las tareas experimentales aplicadas”.

Ho: “Los estudios que emplean paradigmas de razonamiento abstracto para RMf no cuentan con validación estadística de las tareas experimentales aplicadas”.

3.6 Elaboración de Protocolo de búsqueda

Se realizó un protocolo de búsqueda en el que se estableció la metodología de trabajo, los criterios de inclusión y exclusión de los estudios y las estrategias de búsqueda (Anexo 1)

3.7 Estrategias de búsqueda, fuentes de información y criterios de inclusión y exclusión:

La búsqueda se realizó entre el 02 y el 04 de agosto del 2020 con el fin de intentar localizar todos los estudios que cumplieran con los criterios de inclusión previamente establecidos en el protocolo. Se trató de localizar todos los estudios referenciados del 01 de enero del 2015 al 31 de julio del 2020. Las bases de datos consultadas fueron tres: Medline (PubMed), Scopus y EbscoHost.

Se emplearon los siguientes términos MeSH (Medical Subject Headings): “adult”, “magnetic resonance imaging” o “fMRI”, los cuales se combinaron con las siguiente palabras clave: “analogical reasoning”, “fluid reasoning”, “relational reasoning” y “abstract reasoning”.

Los criterios de inclusión de los estudios fueron:

- Estudios redactados en inglés
- Muestra constituida por adultos entre 19 y 44 años de edad.
- Estudios que emplearon RMf
- Los estudios contaron con imágenes por RMf
- Se incluyó artículos científicos y literatura gris (tesis, informes técnicos, etc.)

Se excluyeron estudios de caso, ensayos clínicos, estudios de cohortes, metaanálisis, estudios con daño cerebral, patologías neuropsicológicas y estudios que emplearon otras técnicas de neuroimagen como “Eye Tracking”, “Electroencefalogramas”, “Magnetoencefalografía”, “Estimulación transcraneal”, etc.

3.8 Adquisición de evidencia

La búsqueda de evidencia se realizó en tres bases de datos: Medline, Scopus y EbscoHost de la siguiente forma:

Base de datos **Medline (PubMed)**:

1. La búsqueda se realizó el 02/08/2020.
2. Se realizó la adquisición de literatura a través de la opción “búsqueda avanzada” empleando términos MeSH junto a palabras clave y operadores booleanos. La ecuación de búsqueda fue la siguiente:

```
(((“adult”) AND fMRI) AND analogical reasoning) AND fluid reasoning) AND relational reasoning)
```

3. Se filtró la búsqueda a los últimos 5 años.
4. Se obtuvieron 24 resultados.

Base de datos **Scopus**:

1. La búsqueda se realizó el 03/08/2020.
2. Se realizó la adquisición de evidencia a través de la opción “búsqueda avanzada” empleando términos MeSH, palabras clave y operadores booleanos. La ecuación de búsqueda empleada fue la siguiente:

```
(TITLE-ABS-KEY (“adult”) AND TITLE-ABS-KEY (“fMRI”) OR TITLE-ABS-KEY (“functional magnetic resonance imaging”) AND TITLE-ABS-KEY (“analogical reasoning”) OR TITLE-ABS-KEY (“fluid reasoning”) OR TITLE-ABS-KEY (“relational reasoning”) OR TITLE-ABS-KEY (“abstract reasoning”)) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2015))
```

3. Se filtró la búsqueda a los últimos 5 años.
4. Se obtuvieron 25 resultados.

Base de datos **EbscoHost**:

1. La búsqueda se realizó el 04/08/2020
2. Se realizó la adquisición de evidencia a través de la opción “búsqueda avanzada” sin seleccionar ninguna especificación en la caja de opción “Selección de campo” empleando palabras clave y operadores booleanos. La ecuación de búsqueda fue la siguiente:

AB reasoning AND AB fMRI study AND AB adults

3. Se filtró la búsqueda a los últimos 5 años.
4. Se obtuvieron 8 resultados.

El total de la evidencia adquirida entre las tres bases de datos consultadas fue de **57 resultados** como se muestra en la tabla 1:

Tabla 1

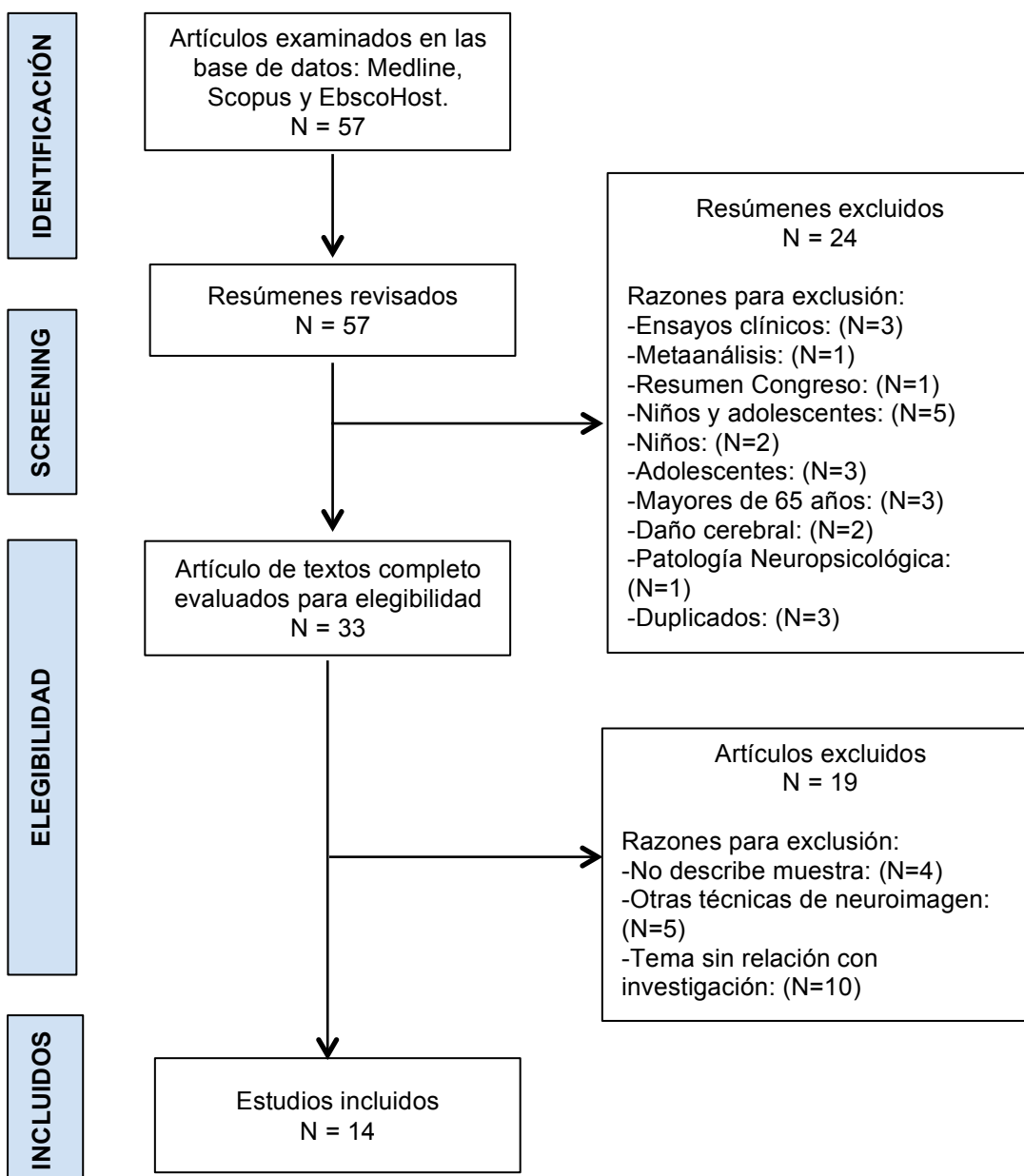
Bitácora de búsqueda

Base de datos	Fecha de búsqueda	Ecuación de búsqueda	Número de resultados	Comentario
Medline (PubMed)	02/08/2020	((("adult") AND fMRI) AND analogical reasoning) AND fluid reasoning) AND relational reasoning)	24	Se empleó la opción de “búsqueda avanzada”
Scopus	03/08/2020	(TITLE-ABS-KEY (“adult”) AND TITLE-ABS-KEY (“fMRI”) OR TITLE-ABS-KEY (“functional magnetic resonance imaging”) AND TITLE-ABS-KEY (“analogical reasoning”) OR TITLE-ABS-KEY (“fluid reasoning”) OR TITLE-ABS-KEY (“relational reasoning”) OR TITLE-ABS-KEY (“abstract reasoning”)) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2015))	25	Se empleó la opción de “búsqueda avanzada”
EbscoHost	04/08/2020	AB reasoning AND AB fMRI study AND AB adults	8	Se empleó la opción de “búsqueda avanzada”
Total			57	

3.9 Selección de estudios:

Para la selección de la evidencia se realizó en el programa Microsoft Excel 2011 para MacOS versión 14.0.0 un “**Formulario de estudio de elegibilidad**” basado en los criterios de inclusión y exclusión establecidos a priori en el protocolo.

Allí se analizaron 57 artículos (Anexo 2). Posteriormente, se realizó el cribado de resúmenes y textos completos a través de la metodología PRISMA como se muestra en el siguiente diagrama de flujo:



Dado que el objetivo del presente estudio fue indagar el tipo de paradigmas de razonamiento abstracto empleados en las investigaciones, así como identificar si contaron con una validación previa a su utilización en el RMf, se eliminó los ensayos clínicos puesto

que son experimentos que realizan una intervención con seguimiento para observar modificaciones posteriores.

Asimismo, no se incluyeron estudios con sujetos con daño cerebral o patología neuropsicológica porque su actividad neurológica es diferente y los protocolos de aplicación de paradigmas deberían tomar en consideración sus características cognitivas.

La eliminación de estudios sin relación con el tema de investigación se llevó a efecto puesto que en ellos se trataban temas de razonamiento abstracto pero enfocados a otras áreas como el lenguaje, genética, bilingüismo, estados emocionales, patologías neuropsicológicas, entre otros.

3.10 Síntesis de la evidencia

Una vez seleccionados los 14 estudios finales, se construyó una base de datos en el programa Microsoft Excel 2011 para MacOS versión 14.0.0 para recoger información de forma detallada con el fin de responder la pregunta de investigación (Anexo 3).

La base de datos se aplicó de forma homogénea a todos los estudios seleccionados con los siguientes ítems:

- El estudio planteó hipótesis de investigación
- Muestra inicial
- Sexo: cuántos hombres y mujeres
- Cómo se reclutó a la muestra
- Contó el estudio con consentimiento informado de los participantes
- Los sujetos fueron compensados monetariamente por su participación
- Total de sujetos excluidos
- Muestra total final
- Descripción de promedio, desviación estándar y rango de edad de los sujetos
- Idioma de participantes
- Lateralidad de los participantes
- Marca y teslaje del RMf
- Número de sesiones de trabajo
- Número de escaneos experimentales en el RMf
- Entrenamiento de paradigma previo al ingreso al RMf
- Número de paradigmas empleados
- Existencia de paradigma control
- Tipo de diseño de paradigma: bloques, eventos, mixto, otro.
- Si hubo validación estadística de paradigmas empleados
- Tipo de paradigma empleado dentro del RMf
- Total de tiempo de duración del paradigma experimental
- Pruebas psicométricas aplicadas fuera del RMf

Cada estudio fue revisado según los parámetros anteriores y se colocó “1” si cumplía y “0” si no lo hacía. Estos datos se emplearon para la descripción de los resultados mediante estadística descriptiva.

3.11 Evaluación de riesgo de sesgos: calidad de la evidencia

Se realizó la evaluación de sesgos respecto al análisis de la metodología de cada estudio según los siguientes criterios (Anexo 4):

- **Sesgo de selección:** se refirió a si cada estudio describió:
 - la forma en cómo se reclutó a los sujetos
 - si describió el total de hombres y mujeres (sexo)
 - si los sujetos fueron diestros y
 - si se contó con consentimientos informados.

Cuando el estudio sí cumplía con los ítems se colocó “1”. Cuando el estudio no cumplió con los ítems se colocó un “0”. Puntaje máximo a obtener = 4 puntos.

- **Sesgo de realización:** se evaluó si cada estudio:
 - planteaba hipótesis de investigación
 - si el número de sujetos fue el mínimo necesario para estudios con RMf respecto al teslaje del equipo empleado (3 T o 1.5 T)
 - se evaluó si los sujetos tuvieron entrenamiento en el paradigma empleado antes de ingresar al RMf
 - si el estudio contó con un paradigma control
 - si el estudio describió el tipo de diseño de paradigma empleado (bloques, eventos)
 - si el paradigma experimental fue validado estadísticamente previo a su uso en el RMf
 - si el estudio empleó el paradigma dentro del RMf o se usó fuera del RMf como variable de correlación con las imágenes funcionales, y
 - si el estudio describió el total de duración (tiempo) del paradigma empleado.

Cuando el estudio sí cumplía con los ítems se colocó “1”. Cuando el estudio no cumplía con los ítems se colocó un “0”. Puntaje máximo a obtener = 8 puntos.

- **Sesgo de exclusión:** para la retirada de participantes durante el estudio se puso como límite un 10 % de sujetos excluidos respecto a la muestra inicial de cada investigación. Si el estudio sobrepasaba el 10 % de sujetos excluidos se colocó "1", si el estudio no sobrepasó el 10 % de sujetos excluidos se colocó "0".

En el siguiente capítulo se presentan los resultados de la evaluación de calidad de los estudios incluidos aplicando estadística descriptiva.

CAPÍTULO CUARTO RESULTADOS

4.1 Evaluación del riesgo sistemático de los estudios incluidos

Se inicia presentando los resultados de la tabla de riesgo de sesgo generada a partir de la síntesis de la evidencia:

Figura 6

Riesgo de sesgo de los estudios seleccionados

		Sesgo de selección	Sesgo de exclusión	Sesgo de realización
1.	Westphal et al. (2016)	+	+	?
2.	Hsu et al. (2019)	?	-	-
3.	Kong et al. (2015)	+	+	-
4.	Habeck et al. (2015)	-	+	-
5.	Habeck et al. (2016)	-	+	-
6.	Dumontheil et al. (2016)	?	-	-
7.	Westphal et al. (2017)	?	+	-
8.	Stern et al. (2018)	-	+	?
9.	Modi et al. (2018)	+	+	?
10.	Hammer et al. (2019)	+	-	?
11.	Zappasodi et al. (2019)	+	+	+
12.	van Loenhoud et al. (2020)	?	-	-
13.	Saxe et al. (2018)	-	+	-
14.	Bonner et al. (2016)	+	-	?

Nota: punto verde (+) = bajo riesgo de sesgo; punto amarillo (?) = riesgo incierto de sesgo; punto rojo (-) = alto riesgo de sesgo.

El *sesgo sistemático* de los estudios incluidos se calculó en porcentajes sobre el puntaje total de los ítems previamente seleccionados en la evaluación de riesgo de sesgos, tal y como se muestra en la tabla 2:

Tabla 2

Cálculo en porcentajes del sesgo sistemático de todos los estudios incluidos

Autores	Año	N sujetos	Sesgo de selección Máx. puntaje = 4		Sesgo de exclusión Puntaje superior a 10 %		Sesgo de realización Máx. puntaje = 8	
			Total puntaje	%	Total sujetos excluidos	%	Total puntaje	%
Westphal et al.	2016	20	4	100	2	9	6	75
Hsu et al.	2019	49	3	75	13	20,9	2	25
Kong et al.	2015	291	4	100	8	2,6	2	25
Habeck et al.	2015	106	0	0	0	0	5	63
Habeck et al.	2016	291	2	50	0	0	5	63
Dumontheil et al.	2016	14	3	75	4	22,2	4	50
Westphal et al.	2017	20	3	75	0	0	4	50
Stern et al.	2018	255	2	50	0	0	6	75
Modi et al.	2018	22	4	100	0	0	6	75
Hammer et al.	2019	229	4	100	66	22,3	6	75
Zappasodi et al.	2019	18	4	100	2	10	8	100
van Loenhoud et al.	2020	265	3	75	58	17,9	3	38
Saxe et al.	2018	892	2	50	0	11,1	2	25
Bonner et al.	2016	17	4	100	2	11,7	6	75

El riesgo de **sesgo de selección** se calculó el porcentaje sobre un total de 4 puntos: color rojo = estudios que obtuvieron ≤ 50 %; color amarillo = estudios que obtuvieron ≥ 75 %; y color verde = estudios con 100%.

Respecto al **sesgo de exclusión** se colocó color rojo a los estudios que sobrepasaron el 10% de sujetos excluidos respecto a sus muestras iniciales, y color verde a los estudios que no sobrepasaron el 10% de participantes excluidos en el estudio.

Para el **sesgo de realización** se calculó el porcentaje sobre un total de 8 puntos: color rojo = estudios que obtuvieron ≤ 60 %; color amarillo = estudios que obtuvieron ≥ 70 %; y color verde = estudios con un 100% (Anexo 4).

4.2 Características de los paradigmas empleados en los estudios incluidos

A continuación, en la tabla 3 se presentan las características de los paradigmas empleados en los estudios incluidos en la revisión sistemática:

Tabla 3
Características de los paradigmas empleados incluidos en la revisión sistemática

Autores	Año	País	N sujetos	Clase de paradigma	Descripción de tarea	Tipo de relación	Tipo de respuesta
Westphal et al.	2016	Estados Unidos	20	Analogías semánticas	4 términos análogos	Semántica	Selección múltiple
Hsu et al.	2019	Estados Unidos	49	-	-	-	-
Kong et al.	2015	China	291	-	-	-	-
Habeck et al.*	2015	Estados Unidos	106	Analogías visoespaciales/ semánticas	Tipo Raven	Visoespacial Semejanza	Selección múltiple
Habeck et al.*	2016	Estados Unidos	291	Analogías visoespaciales/ semánticas	Tipo Raven	Visoespacial Semejanza	Selección múltiple
Dumontheil et al.	2016	Inglaterra	14	Analogías visoespacial	4 figuras análogas	Visoespacial	Evaluar (sí/no)
Westphal et al.	2017	Estados Unidos	20	Analogías semánticas	4 términos análogos	Semántica	Selección múltiple
Stern et al.*	2018	Estados Unidos	255	Analogías visoespaciales/ semánticas	Tipo Raven	Visoespacial Semejanza	Selección múltiple
Modi et al.	2018	India	22	Secuenciación	3 imágenes secuenciales	Visoespacial	Elección forzada entre 2 opciones
Hammer et al.	2019	Estados Unidos	229	Analogías visuales y semánticas	4 dibujos comparativos	Visual y semántico	Evaluar (sí/no)
Zappasodi et al.	2019	Italia	18	Similitudes Relaciones espaciales	Tipo Raven	Semejanzas Visoespacial	Selección múltiple
van Loenhoud et al.*	2020	Países Bajos	265	Analogías visoespaciales/ semánticas	Tipo Raven	Visoespacial Semejanza	Selección múltiple
Saxe et al.	2018	Estados Unidos	892	-	-	-	-
Bonner et al.	2016	Estados Unidos	17	Analogías semánticas	3 palabras análogas	Semántica	Elección forzada entre 2 opciones

Nota: (-) indica que dichos estudios no emplearon un paradigma de razonamiento abstracto *dentro* de un RMf, sino afuera como una prueba manual. (*) indica que dichos estudios emplearon las mismas muestra y tareas experimentales.

La tabla 3 muestra que el 64 % de estudios proviene de los Estados Unidos, el 21% pertenecen a Europa y el 15 % provienen de países de Asia.

Respecto a la clase de paradigmas utilizados, el 63,6 % de los estudios empleó paradigmas de razonamiento semántico combinados con paradigmas de razonamiento visoespacial tipo matrices progresivas de Raven. En los estudios de Hsu et al. (2019) y Kong et al. (2015) también emplearon la prueba matrices progresivas de Raven de forma manual como medida del razonamiento fluido (Gf) de los sujetos. Dicha medición fue usada

como una variable de correlación con las imágenes cerebrales tomadas en el RMf con otro tipo de tarea. Lo mismo sucedió en el estudio de Saxe, et al. (2016), quienes aplicaron las subpruebas de matrices y vocabulario de la Escala de Inteligencia de Wechsler para adultos (WAIS) de forma manual. Por tanto, dichos estudios no cuentan con datos descriptivos puesto que no emplearon paradigmas de razonamiento abstracto *dentro* del RMf.

En la tabla 3 también se observa que el 63,6 % de los estudios empleó como opción de respuesta “selección múltiple”, el 18 % utilizó como opción de respuesta “Evaluar si/no” y el 18 % utilizó como opción de respuesta “elección forzada entre dos opciones”.

4.3 Metodología de aplicación de los paradigmas de los estudios incluidos

A continuación, la tabla 4 presenta el análisis de la aplicación de los paradigmas empleados en los estudios incluidos en la revisión sistemática:

Tabla 4
Metodología de aplicación de los paradigmas empleados en los estudios revisados

Autores	Año	Tiempo total duración paradigma	Teslaje (T) de RMf	Diseño paradigma	Práctica previa de paradigma	# de paradigmas empleados	¿Empleó paradigma control?	Validación previa de paradigma
Westphal et al.	2016	No	3 T	Bloques	Sí	3	Sí	No
Hsu et al.	2019	-	3 T	-	-	-	-	-
Kong et al.	2015	-	3 T	-	-	-	-	-
Habeck et al.	2015	No	3 T	+	Sí	12	Sí	No
Habeck et al.	2016	No	3 T	+	Sí	12	Sí	No
Dumontheil et al.	2016	No	1.5 T	Bloques	Sí	1	Sí	No
Westphal et al.	2017	No	3 T	Bloques	Sí	3	No	No
Stern et al.	2018	No	3 T	Bloques	Sí	12	Sí	No
Modi et al.	2018	No	3 T	Bloques	Sí	1	Sí	No
Hammer et al.	2019	Sí	3 T	Eventos	Sí	1	No	No
Zappasodi et al.	2019	Sí	3 T	Bloques	Sí	3	Sí	Sí
van Loenhoud et al.	2020	No	3 T	+	No	11	Sí	No
Saxe et al.	2018	-	3 T	-	-	-	-	-
Bonner et al.	2016	No	3 T	Bloques	Sí	4	Sí	Sí
Media =						5,6		

Nota: (+) indica que dichos estudios no mencionaron en la metodología el tipo de diseño de paradigma empleado. (-) indica que dichos estudios no emplearon un paradigma de razonamiento abstracto *dentro* de un RMf.

La tabla 4 muestra que sólo el 18,1 % mencionaron en la metodología el total de tiempo de duración del paradigma empleado en la investigación. El teslaje del RMf en el 92,8 % de los estudios fue de 3 T y sólo un estudio utilizó un RMf de 1.5 T. También se

observa que el 87,5 % de investigaciones aplicó un diseño de paradigmas de bloques y un 12,5% utilizó un diseño de eventos.

En el 90 % de los estudios los sujetos realizaron paradigmas de práctica antes de ingresar al RMf. Así, parece ser un denominador común que los sujetos practiquen, generalmente en un ordenador, los paradigmas seleccionados para cada investigación previo a su presentación dentro de un RMf. De esa manera los participantes se familiarizan y conocen la forma de responder. Con ello, se pretende reducir el ruido en la adquisición de imágenes cerebrales una vez que el sujeto resuelve los paradigmas experimentales dentro del magneto. Los paradigmas de práctica obviamente no se incluyeron posteriormente en la presentación dentro del RMf.

De los 11 estudios que reportaron el número de paradigmas empleados, se obtuvo que el promedio de paradigmas utilizados en las investigaciones fue de 5 tareas experimentales.

En la tabla 4 no se describen los datos de los estudios de Hsu et al. (2019), Kong et al. (2015) y Saxe et al. (2018) puesto que emplearon pruebas de razonamiento abstracto como las matrices progresivas de Raven y las subpruebas de “vocabulario” y “matrices” de la escala Wechsler de inteligencia para adultos (WAIS) *fuera* del RMf como medidas correlacionales con las imágenes generadas en el RMf.

Asimismo, la tabla 4 muestra que el 81,8 % de los estudios sí utilizaron un paradigma control durante la adquisición de imágenes para diferenciar la actividad cognitiva de los paradigmas experimentales aplicados.

Respecto a la validación estadística de paradigmas previo a ser empleados en el RMf, se obtuvo que sólo el 18,1 % (2 estudios) mencionaron una clase de validación de sus tareas experimentales. Dicha validación no fue estadística, sino un pilotaje de aplicación que resultó en modificaciones de instrucciones o tiempo de exposición para su presentación en el RMf. No obstante, no se detalla un proceso estadístico previo de dichos pilotajes.

Con base en los resultados anteriores:

Se acepta la hipótesis nula (H_0) y se rechaza la hipótesis de investigación. Por tanto, los estudios que emplean paradigmas de razonamiento abstracto para RMf no cuentan con validación estadística de las tareas experimentales aplicadas.

Por tanto, no se hallaron datos estadísticos relacionados con la validez, confiabilidad, tipo de pruebas estadísticas y datos normativos de los paradigmas incluidos en los estudios para el escaneo del razonamiento abstracto mediante RMf.

DISCUSIÓN

Realizar investigaciones con técnicas de neuroimagen funcional implica tomar en cuenta una serie de desafíos metodológicos debido al alto grado de complejidad en el procesamiento y análisis de imágenes cerebrales (Krainik, 2011), así como a la carencia de paradigmas válidos y confiables para su uso en un entorno de escaneo.

Ese es el caso de paradigmas empleados para mapear procesos cognitivos superiores como el razonamiento abstracto, la atención o la memoria de trabajo. Debido a su alto grado de validez y confiabilidad, los paradigmas más empleados en un RMf son los motores, visuales y de lenguaje. Incluso, muchos de ellos cuentan con validez convergente con otras pruebas neurológicas como el test de Wada (Ríos-Lago, 2008).

El objetivo del presente estudio se orientó a indagar a través de una revisión sistemática de literatura si los paradigmas de razonamiento abstracto empleados en los estudios revisados contaron con un proceso de validación estadística previo a su uso en un RMf. Los resultados descritos en la tabla 4 muestran que la respuesta es negativa. De los catorce estudios, sólo dos de ellos incluyeron en su metodología procesos de validación psicométrica relacionada con la dificultad y las características de los estímulos (Zappasodi et al., 2019; Bonner et al., 2016). Sin embargo, aún en dichos estudios no se menciona el proceso psicométrico realizado para la validación de los paradigmas empleados, es decir, se desconoce la población, las pruebas estadísticas aplicadas o el grado de confiabilidad de las mismas.

La importancia de la validez estadística de una tarea experimental radica en que su proceso permite identificar aspectos importantes en el diseño final de un paradigma antes de ser utilizado con cualquier técnica de neuroimagen, especialmente en un RMf. De esa manera, el investigador se asegurará de que el mapeo cerebral sea el resultado de la activación de las áreas corticales de interés, evitando así que dicha activación cortical se dé entorno a confusión o a los errores frente a la resolución de los ejercicios planteados. Ello aumentará el grado de confiabilidad de las imágenes cerebrales obtenidas de acuerdo a cada localización de procesos mentales a investigar.

No obstante, la falta de validación previa de los paradigmas empleados en los estudios revisados no es el único factor para la valoración de la confiabilidad de las imágenes cerebrales obtenidas por RMf. Dado que el efecto BOLD no es un marcador directo de la actividad neuronal y que los investigadores siempre toman en cuenta el “ruido” durante la adquisición de imágenes cerebrales, los vóxeles pasan por sofisticados procesos estadísticos para aceptar o rechazar aquellas imágenes que no alcanzan significación estadística (Aguirre, 2012; Armony et al., 2012). Dicho “ruido” puede generar fluctuaciones de en la señal debido a la conducta del sujeto dentro del RMf como movimientos bruscos, estornudos, fatiga, e, incluso, tendencias a continuar razonando sobre el ítem anterior una vez que ya pasó, tal y como Zappasodi et al. (2019) revelaron en un estudio piloto antes de ingresar a los sujetos al RMf.

Los investigadores que emplean técnicas de neuroimagen funcional se aseguran de que los procesos post-procesamiento de imágenes (realineación, normalización, suavizado y análisis estadístico) se realice con rigurosidad para evitar sesgos en los mapeos cerebrales. Sin embargo, y como muestra el presente estudio, no se ha prestado suficiente atención al aspecto psicométrico de los paradigmas que se emplean *dentro* de un RMf.

Para sopesar ese aspecto, los investigadores emplean paradigmas basados en conocidos test psicométricos con alto grado de confiabilidad como la prueba de matrices progresivas de Raven, considerada el *Golden Standard* para la medición del razonamiento fluido (Bartley et al., 2018; Momi et al., 2020). Sin embargo, dichas pruebas están validadas para un proceso de aplicación manual, a papel y lápiz y no para un ambiente de escaneo.

Para solucionar ese aspecto los investigadores adaptan los estímulos de las pruebas psicométricas a través de programas computacionales para experimentos psicológicos y ajustan su presentación para RMf empleando espejos, proyectores e instrumentos de respuesta adaptados a los dedos del sujeto (Aguirre, 2014; Ramos et al., 2017). En algunos casos, los estímulos se presentan tal cual aparecen en las pruebas de papel y lápiz, y en otros casos se utilizan estímulos modificados, pero siguiendo la metodología de aplicación de las pruebas psicométricas validadas manualmente (Hobeika et al., 2016).

Como muestra la tabla 3 de nuestros resultados, más de la mitad de los estudios emplearon paradigmas de razonamiento visoespacial *tipo matrices progresivas de Raven*. Y en los casos de los estudios que reportaron una validación psicométrica de los paradigmas empleados, ambos también se basaron en pruebas psicométricas de papel y lápiz. Zappasodi et al. (2019) basaron sus paradigmas de razonamiento abstracto en la prueba de inteligencia fluida FIT (por sus siglas en inglés de *Fluid Intelligence Test*) desarrollado por Roberta Romanelli y Aristide Saggino, mientras que Bonner et al. (2016) adaptaron sus paradigmas de relacionamiento semántico de palabras con base en la prueba de “Acceso semántico a partir de imágenes y palabras: Pirámides y palmeras” creado por David Howrad y Karalyn Patterson.

Así, los autores asumen que la validez de un paradigma se basa en la validación psicométrica con la que ya cuenta la prueba empleada. Sin embargo, el ambiente de aplicación y el proceso de validación de las pruebas utilizadas no cumplen los requerimientos de diseño para un ambiente de escaneo. No se tiene claro si este factor podría alterar las imágenes que se obtienen al emplear paradigmas sin una validación estadística previa *para* RMf. En ese sentido, Ramos et al. (2017) validaron, a través de un programa informático de código abierto, tres pruebas neuropsicológicas para ser presentadas en un ordenador y hallaron una correlación estadísticamente significativa entre los tres experimentos, concluyendo que la adaptación computacional fue válida. Este es un ejemplo de validación previa de paradigmas experimentales que posteriormente se podrían aplicar dentro de un RMf.

Sería importante entonces que los paradigmas adaptados para RMf, pasen por un proceso previo de validación que simule su aplicabilidad en un contexto de escaneo en grupos controles y experimentales como lo hicieron Ramos et al. (2017). De esa forma se podría observar si la aplicación estandarizada arroja las mismas imágenes cerebrales (confiabilidad) y mide lo que se pretende medir (validez) de acuerdo a la literatura del proceso cognitivo a investigar.

En el metaanálisis realizado por Hobeika et al. (2016) sobre las redes neuronales implicadas en la resolución de paradigmas de razonamiento analógico y fluido (Gf), se revisaron las imágenes de 27 estudios y se localizaron las áreas corticales y subcorticales involucradas en dichos procesos. Para ello, emplearon el método de “Estimación de la activación similar” o ALE (del inglés Activation Likelihood Estimation). Dicho método determina las áreas cerebrales en los cuales la convergencia entre todos los estudios incluidos es mayor de lo que se esperaría aleatoriamente.

Así, el método ALE evalúa qué tan confiable es la participación de regiones cerebrales de un proceso cognitivo específico a través de diferentes investigaciones. Para ello ALE emplea un sofisticado algoritmo que convierte las coordenadas pico de activación de cada estudio en coordenadas del atlas automatizado de Talairach (Lancaster, et al., 2000), que luego las moldea como distribuciones gaussianas, estima la variación entre sujetos y experimentos, analiza la probabilidad de activación por cada vóxel cerebral de todos los estudios, realiza estadística corregida para campos Gaussianos (FWE- del inglés Family Wise Error), etc. En pocas palabras, los valores ALE son mapas estadísticos creados por distribuciones de probabilidad combinadas centradas en cada coordenada empleada en el análisis y refleja la coherencia entre los experimentos (Hobeika et al., 2016).

De esa manera, mediante ALE se esperaría que a mayor similitud de las áreas corticales activadas frente a determinado estímulo, mayor grado de validez de las tareas experimentales puesto que casi todos ellos activan las mismas área cerebrales. Ese análisis es un factor importante a considerar respecto a la ausencia de procesos estadísticos de validación interna, externa y convergente de paradigmas validados para evaluar procesos mentales complejos como el razonamiento abstracto.

Sin embargo, y a pesar de la gran variedad de pruebas estadísticas que se puedan aplicar a un instrumento psicométrico para darle validez, las deficiencias metodológicas ponen en tela de juicio los resultados de cualquier medición y con ello su replicabilidad (Turner et al., 2018). Si bien no existe un patrón de oro para evaluar la “verdadera” calidad metodológica de un estudio, se pueden tomar en cuenta ciertos defectos metodológicos que sesgan los resultados de cualquier ensayo y permiten distinguir entre calidad buena, intermedia o baja (Greenhalgh, 2016).

Nuestros resultados evidenciaron que la mayoría de los estudios incluidos en la revisión sistemática adolecen de serias deficiencias metodológicas a la hora de reportar sus investigaciones. Como muestra la figura 6 de los resultados, sólo uno de los catorce

estudios cuenta con una buena calidad metodológica, mientras que los demás evidencian una calidad intermedia y baja.

Tómese el caso del estudio de Dumonthail et al. (2016), quienes al emplear un RMf de 1.5 T sólo trabajaron con 14 sujetos, cuando la literatura recomienda que el número de participantes para trabajar con un equipo de 1.5 T debe ser de 16 participantes (Aguirre, 2012). Incluso así, para algunos autores 16 sujetos es una muestra demasiado pequeña que le resta poder estadístico a cualquier estudio con RMf que se desee replicar con el fin de comprobar su confiabilidad test-retest (Turner et al., 2018).

De los catorce estudios incluidos sólo siete contaron con una muestra total de más de 100 sujetos. Según Turner et al. (2018) los investigadores continúan empleando muestras pequeñas en estudios con RMf por tres razones: la primera es que los investigadores no consideran necesario muestras grandes debido a que se ha demostrado que la RMf tiene, generalmente, una confiabilidad test-retest de regular a buena. La segunda es la dificultad que tienen los investigadores para comprender las sofisticadas herramientas de procesamiento de imágenes funcionales, que en el contexto de la RMf implican decenas o cientos de miles de pruebas estadísticas. Y la tercera, son los gastos económicos que implican estudios con RMf, los cuales aún con muestras demasiado pequeñas, pueden llegar a costar miles de dólares. Y en muchos ambientes académicos no se acostumbra a invertir en la recolección de datos de muestras grandes, como por ejemplo más de 100 sujetos.

Turner et al. (2018) concluyen que a pesar de que los tamaños típicos de muestra empleados en experimentos con RMf son inadecuados, no consideran apropiado, con base en sus hallazgos, identificar un *tamaño de muestra mínimo universal* que debería adoptarse en todo el campo de la RMf.

Asimismo, sólo dos de los catorce estudios incluidos reportaron el tiempo total de duración de los paradigmas empleados, otros no incluyeron una fase de control que permita evaluar la diferencia de actividad neuronal (reposo-actividad) y así registrar el efecto BOLD. Tres estudios tampoco reportaron el tipo de diseño de paradigma empleado (bloques, eventos o mixtos) y cinco estudios excluyeron más del diez por ciento de sujetos de la muestra inicial. Por ejemplo, Hammer et al. (2019) excluyeron 66 sujetos de los 296 con los que iniciaron. Todos estos aspectos redujeron significativamente la calidad metodológica y hacen complicada la replicabilidad de dichos estudios de una manera explícita y transparente. En ese sentido, Zappasodi et al. (2019) y Bonner et al. (2016) son el contraejemplo de lo anterior, puesto que a pesar de las limitaciones típicas de los artículos de publicación, describen con claridad y exactitud los paradigmas empleados en el RMf.

Por otra parte, el diseño de paradigmas en bloques fue el más empleado en las investigaciones revisadas debido a su sencillez de aplicación, adquisición de imágenes y potencia estadística en relación a las complicadas condiciones dentro de un RMf (Armony et al., 2012). De todos los estudios incluidos, sólo uno utilizó un diseño de eventos. Este

hallazgo contradice lo descrito por Ríos-Lago (2008), quien refiere que el diseño de eventos es el más utilizado en la investigación.

Un dato importante a considerar fue el número de paradigmas empleados en los estudios incluidos. La tabla 4 de resultados muestra que algunos autores incluyeron hasta 12 paradigmas de distintas clases (Habeck et al., 2015; Habeck et al., 2016; Stern et al., 2012; van Loenhoud et al., 2020). Si se toma en cuenta las condiciones de inmovilidad y ruido dentro de un RMf, así como los factores conductuales de los sujetos como el cansancio, la habituación o la disminución de la atención, permanecer mucho tiempo dentro de un RMf también podría alterar las imágenes adquiridas (Armony et al., 2012). Ello, sin duda, haría que los resultados pierdan potencia estadística y por ende confiabilidad. Tómese en cuenta que el tiempo promedio para una tarea dentro de un RMf de 3 T es de 240 segundos (Aguirre, 2012). Lamentablemente, los estudios mencionados no reportaron el tiempo total de los paradigmas empleados, lo cual también disminuyó su calidad metodológica y el riesgo de sesgo.

Algo similar sucede con la variabilidad de paradigmas para mapear el razonamiento abstracto identificados en la literatura. Si bien nuestros hallazgos, así como los de Hobeika et al. (2016) muestran que el paradigma mayormente empleado para evaluar el razonamiento fluido (Gf) son las tareas experimentales tipo matrices progresivas de Raven, otros estudios adaptaron sus paradigmas de acuerdo a escalas de inteligencia para niños y adultos (Whitaker et al., 2017; Zappasodi et al., 2019). Otra investigación incluyó en el paradigma dibujos y texto al mismo tiempo, lo cual elicitaría varios procesos mentales a la vez como el lenguaje, la visión, el reconocimiento de formas y colores, etc. Por tanto, no hay un consenso entre los investigadores de un paradigma estándar para el mapeo de áreas cerebrales relacionadas con el razonamiento abstracto.

Ello quizás se deba, principalmente, a que la abstracción no es un proceso cognitivo que involucre un solo proceso mental, sino que en su procesamiento también intervienen al mismo tiempo otros mecanismos cognitivos como la memoria de trabajo y el control atencional (Hammer, et al., 2019; Modi et al., 2018).

En contraste, los procesos motores, de lenguaje y visuales cuentan con áreas corticales bien definidas e identificadas debido a que en ellos no intervienen múltiples mecanismos mentales a la vez. Abrir o cerrar la mano, por ejemplo, implica comprender la instrucción y ejecutar motrizmente la orden. Pero realizar procesos abstractos, implica un nivel de cognición más complejo y la participación de varias redes neuronales que no sólo se limitan a la corteza prefrontal, sino que abarcan ambos hemisferios, estructuras corticales y subcorticales (Hobeika et al., 2016).

No en vano en neuropsicología se ha dotado de especial atención a la corteza prefrontal como el centro de la humanidad (Portellano, 2005), función ejecutiva (Henríquez et al., 2019), sello distintivo de la inteligencia humana (Barrett et al., 2018; Hammer et al., 2019) o responsable principal del declive mundial de la violencia (Pinker, 2011, 2012).

Conclusiones

Con base en los resultados de la presente revisión sistemática podemos concluir que:

- Los paradigmas de razonamiento abstracto empleados en los estudios incluidos no cuentan con un proceso de validación estadística previo a su empleo dentro del RMf.
- Casi todos los estudios incluidos adolecen de errores metodológicos (sesgo de realización) que hacen complicada su replicabilidad.
- La mayoría de los paradigmas identificados en los estudios incluidos se basan en pruebas de inteligencia validadas y estandarizadas
- La prueba matrices progresivas de Raven continúa siendo el test más usado para evaluar el razonamiento fluido (Gf) dentro de un RMf.
- El diseño de paradigma más frecuentemente usado en las investigaciones es el diseño de bloques.
- Aplicar paradigmas de práctica previo al mapeo cerebral dentro del RMf es una práctica común que se halló en todos los estudios incluidos que lo reportaron.
- El tamaño de muestra ideal para experimentos con RMf de acuerdo al teslaje del resonador o las características propias de cada estudio cognitivo aún continúa en debate, puesto que aún no se cuenta con un tamaño de aplicación universal para experimentos de neuroimagen funcional.
- Se debe trabajar en la validación de paradigmas para RMf que puedan estandarizarse y contar con validez convergente mediante otras técnicas de neuroimagen funcional.

Limitaciones de estudio

En el presente estudio identificamos algunas limitaciones que son importantes señalar:

- El rango de edad de la población incluida en el estudio fue de adultos entre 19 y 44 años de edad. Incluir a niños y adolescentes en la población arrojaría más resultados y, por tanto, se contarían con más datos para analizar los paradigmas de razonamiento abstracto empleados. No se incluyó a niños y

adolescentes puesto que las funciones ejecutivas, entre ellas el razonamiento abstracto, aún están en desarrollo y terminan de madurar alrededor de los veinte años (Cid et al., 2016). Ello conllevaría a una actividad neuronal diferente a lo largo de las edades.

- De los 14 estudios incluidos en la revisión sistemática, tres de ellos no emplearon paradigmas de razonamiento abstracto *dentro* del RMf (Hsu et al., 2019; Kong et al., 2015; Saxe et al., 2018), sino que utilizaron pruebas de razonamiento abstracto de papel y lápiz como una medida de correlación con las imágenes generadas por el RMf. Ese criterio de exclusión no se tomó en cuenta al realizar el Protocolo de búsqueda, por lo que dichos estudios se incluyeron finalmente.
- La búsqueda de evidencia se limitó a estudios publicados en idioma inglés debido a que en un pilotaje de búsqueda en bases de datos en español, los resultados arrojados no se relacionaban con nuestro tema de investigación. No obstante, se hallaron otros estudios importantes que se tomaron en cuenta en el marco teórico de esta obra.

Alcances e implicaciones del estudio

Los resultados del presente estudio abren un vasto espacio de trabajo en la incipiente campo de investigación neuropsicológica de nuestro país. Dentro del área de la imagen médica, uno de los principales roles del neuropsicólogo es proporcionar paradigmas experimentales válidos, confiables y reproducibles para la localización de procesos cognitivos específicos mediante RMf (Cabrales, 2015; Ríos-Lago, 2008). En ese sentido, este estudio podrá servir de referencia metodológica para el diseño y validación de paradigmas experimentales que aporten nuevos conocimientos a la neurociencia desde nuestro país.

Así, los futuros estudios deberán profundizar la problemática de investigación aquí planteada de tal manera que aporten nuevos datos relacionados con la validación de paradigmas de razonamiento abstracto para RMf u otras técnicas de neuroimagen. Para ello, una propuesta metodológica de validación de paradigmas deberá incluir la adaptación de los estímulos a un programa informático para experimentos psicológicos que sea compatible con la tecnología de un RMf como el programa de acceso libre PsychoPy 3 (Peirce, 2009). El diseño del paradigma deberá tomar en cuenta desde su inicio el ambiente de aplicación para el cual será diseñado. Es decir, el contexto de un RMf. Así, la tarea tendrá que ser diseñada considerando las características del ambiente de escaneo como la inmovilidad, el ruido del magneto, etc.

Para ello, se deberá realizar un protocolo de aplicación del paradigma creado, el cual se aplicará en un ordenador a una muestra representativa para recabar datos sobre la comprensión de instrucciones y estímulos, tiempo de ejecución, número de aciertos y errores, nivel de complejidad, etc. Dichos resultados deberán ser analizados empleando pruebas estadísticas para el análisis del comportamiento de datos. A partir de esos resultados, y junto a las correcciones que se generen a partir de la primera aplicación, se diseñará el paradigma final que deberá ser aplicado nuevamente a una muestra representativa con el fin de obtener una tarea experimental válida. Finalmente, el paradigma válido se aplicaría en un RMf, así como en otra técnica de neuroimagen con el fin de indagar su confiabilidad y validez interna, externa y convergente.

Un ejemplo de este proceso se lo puede encontrar en el trabajo de Ramos et al. (2017), quienes validaron tres pruebas neuropsicológicas (Go/No-Go, tarea de Simon y Stroop) en población ecuatoriana empleando el programa de código abierto PEBL (Psychology Experiment Building Language) para su aplicación en ordenador.

Finalmente, los hallazgos de esta investigación no sólo motivarían a emplear el RMf como una herramienta de investigación, sino que también abrirían un nuevo campo de especialización neuropsicológica dentro del área de la neuroimagen funcional y las neurociencias, tal y como lo propuso Ríos-Lago (2008). Como se documentó en el presente estudio, el uso del RMf, el procesamiento e interpretación estadística de imágenes cerebrales y el diseño y aplicabilidad de paradigmas en el contexto del escaneo requieren de una amplia formación en diversas disciplinas como la estadística, la neuroimagen funcional, la psicometría, entre otras. Para ello, se necesitarán de profesionales especializados en técnicas de neuroimagen lo que generaría la necesidad de abrir un nuevo campo de formación en las neurociencias. Con ello, nuestro país podría ser pionero en la investigación de tareas experimentales (paradigmas específicos) válidos, confiables y estandarizadas *para* RMf.

Referencias bibliográficas

- Aguirre, D. F. (2012). Tamaño de muestra a considerarse en un estudio de Resonancia Magnética funcional (RMf) con un equipo de resonancia magnética de 1.5. T. *Revista Ecuatoriana de Neurología*, 21 (1-3), 10-14.
- Aguirre, D. F., y Bustamante, B. (2014). Mapeo de la Función Cerebral. *BIOscientis Revista de Divulgación Científica*, 1 (2), 44-48.
- Armony, J. L, Trejo-Martínez, D., y Hernández, D. (2012). Resonancia Magnética Funcional (RMf): principios y aplicaciones en Neuropsicología y Neurociencias Cognitivas. *Neuropsicología Latinoamericana*, 4 (2), 36-50.
- Badre, D. (2008). Cognitive control, hierarchy, and the rostro-caudal organization of the frontal lobes. *Trends in Cognitive Sciences*, 12 (5), 193-200.
- Black, D.F., Vachha, B., Mian, A., Faro, S.H., Maheshwari, M., Sair, H.I., Petrella, J.R., Pillai, J.J., y Welker, K. (2017). American Society of Functional Neuroradiology-Recommended fMRI Paradigm Algorithms for Presurgical Language Assessment. *American Journal of Neuroradiology*, 38 (10), E65-E73.
- Barrett, D. G., Hill, F., Santoro, A., Morcos, A. S., y Lillicrap, T. (2018). Measuring abstract reasoning in neural networks. En *International Conference on Machine Learning* (pp.4477-4486).
- Bartley, J., Boeving, E., Riedel, M., Bottenhorn, K., Salo, T., Eickhoff, S., Brewe, E., Sutherland, M., y Laird, A. (2018). Meta-analytic evidence for a core problem solving network across multiple representational domains. *Neurosci Biobehav Rev*, 92, 318-337.
- Bonner, M., Price, A., Peelle, J., y Grossman, M. (2016). Semantics of the Visual Environment Encoded in Parahippocampal Cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 28 (3), 361-378.
- Cabrales, A. (2015). Neuropsicología y la localización de las funciones cerebrales superiores en estudios de resonancia magnética funcional con tareas. *Acta Neurológica Colombiana*, 31 (1), 92-100.
- Cid, N., Pinilla, C., Quezada, S., y Santana, P. (2016). *Atención selectiva, atención sostenida, inhibición y flexibilidad cognitiva en niñas y adolescentes de 12 a 14 años con TDAH predominio de falta de atención* [tesis de grado, Universidad Católica de la Santísima Concepción]. Repositorio Institucional UCSC. <http://repositoriodigital.ucsc.cl/handle/25022009/1161>
- Cortés, P., Gutiérrez, C., Jara, C., y Peña, M. (2019). Neuroimagen y Cognición. En E. Labos, A. Slachevsky, T. Torralva, P. Fuentes y F. Manes (Eds.), *Tratado de Neuropsicología Clínica* (pp. 35-49). Akadia.
- Cosmides, L., y Tooby, J. (2002). Orígenes de la especificidad de dominio: la evolución de la organización funcional. En L. Hirschfeld y S. Gelman (Comp.), *Cartografía de la mente. La especificidad de dominio en la cognición y en la cultura: Vol. 1. Orígenes, procesos y conceptos* (pp.132-173). Gedisa.

- Daley, T. C., Whaley, S. E., Sigman, M. D., Espinosa, M. P., y Neumann, C. (2003). IQ On The Rise: The Flynn Effect in Rural Kenyan Children. *Psychological Science*, 14 (3), 215-219.
- de la Fuente, R. (2015). La localización de las funciones mentales en el cerebro. En R., de la Fuente y F. Álvarez-Leefmans (Comp.), *Biología de la mente* (pp. 22-47). Fondo de Cultura Económica.
- diSessa, A. A., y Sherin, B. L. (1998). What changes in conceptual change?. *Int. J. Sci. Educ.*, 20 (10), 1155-1191.
- diSessa, A. A. (1993). Toward an Epistemology of Physics. *Cognition and Instruction*, 10 (2 y3), 105-225.
- Dumontheil, I., Wolf, L., Blakemore, S. (2016). Audience effects on the neural correlates of relational reasoning in adolescence. *Neuropsychologia*, 87, 85-95.
- Esparza, N. E. (2017). *Mapeo de la función cerebral en adultos mayores enfocados en la tarea de Funciones Ejecutivas* [tesis de grado, Universidad Particular de Loja]. Repositorio Institucional UTPL. <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/17616>
- Flanagan, D. P., y Kaufman, A. S. (2012). *Claves para la evaluación con WISC-IV*. Manual Moderno.
- Flynn, J. R. (1999). Searching for Justice. The Discovery of IQ Gains Over Time. *American Psychologist*, 54 (1), 5-20.
- Flynn, J. R. (2007). *What Is Intelligence? Beyond the Flynn Effect*. Cambridge University Press.
- Gutiérrez, M. G. (2017). *Diseño e implementación de una herramienta computacional dinámica para mejorar las habilidades de memoria de adultos mayores, y comprobar su eficacia por medio de la detección de actividad cerebral utilizando imágenes de resonancia magnética* [tesis de grado, Universidad Particular de Loja]. Repositorio Institucional UTPL. <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/17102>
- Greenhalgh, T. (2016). *Cómo leer un artículo científico. Las bases de la medicina basada en evidencia*. Elsevier.
- Habeck, C., Ganges, Y., Razlighi, Q., Steffener, J., Brickman, A., Barulli, D., Salthouse, T., y Stern, Y.(2016). The Reference Ability Neural Network Study: Life-time stability of reference-ability neural networks derived from task maps of young adults. *NeuroImage*, 125, 693-704.
- Habeck, C., Steffener, J., Barulli, D., Ganges, Y., Razlighi, Q., Shaked, D., Salthouse, T., y Stern, Y. (2015). Making Cognitive Latent Variables Manifest: Distinct Neural Networks for Fluid Reasoning and Processing Speed. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27 (6), 1249-1258.
- Hammer, R., Paul, E. J., Hillman, C. H., Kramer, A. F., Cohen, N. J., y Barbey, A. K. (2019). Individual differences in analogical reasoning revealed by multivariate task-based functional brain imaging. *NeuroImage*, 184 , 993-1004.
- Hirschfeld, L. y Gelman, S. (2002). Hacia una topografía de la mente: una introducción a la especificidad de dominio. En *Cartografía de la mente. La especificidad de dominio en la cognición y en la cultura: Vol. 1. Orígenes, procesos y conceptos* (pp.23-67). Gedisa.

- Henríquez, F., Martínez-Pernía, D., Forno, G., Nuñez-Huasaf, J., y Slachevsky, A. (2019). Anatomía Funcional del Córtex Prefrontal y Modelos de Funcionamiento. En E. Labos, A. Slachevsky, T. Torralva, P. Fuentes y F. Manes (Eds.), *Tratado de Neuropsicología Clínica* (pp. 453-473). Akadia.
- Hobeika, L., Diard-Detoeuf, C., Garcin, B., Levy, R., y Volle, E. (2016). General and Specialized Brain Correlates for Analogical Reasoning: A Meta-analysis of Functional Imaging Studies. *Human Brain Mapping*, 37 (5), 1953-1969.
- Hsu, Chun-Ting, Clariana, R., Scholoss, B., y Li, P. (2019). Neurocognitive Signature of Naturalistic Reading of Scientific Texts: A Fixation-Related fMRI. *Scientific Reports*, 9 (1), 1-16.
- Jaramillo, L. M., y Puga, L. A. (2016). El pensamiento lógico-abstracto como sustento para potenciar los procesos cognitivos en la educación. *Sophia, colección de Filosofía de la Educación*, 21 (2), 31-55.
- Krainik, A. (2011). Functional MRI. En H. Duffau (Ed.), *Brain Mapping. From Neural Basis Of Cognition to Surgical Applications* (pp.45-59). Springer.
- Kong, F., Chen, Z., Xue, S., Wang, X., y Liu, J. (2015). Mother's but Not Father's Education Predicts General Fluid Intelligence in Emerging Adulthood: Behavioral and Neuroanatomical Evidence. *Human Brain Mapping*, 36, 4582-4591.
- Lancaster, J., Woldorff, M., Parsons, L., Liotti, M., Freitas, C., Rainey, L. Kochunov, P., Nickerson, D., Mikiten, S. y Fox, P. (2000). Automated Talairach Atlas Labels For Functional Brain Mapping. *Human Brain Mapping*, 10, 120-131.
- Llvisaca, L. S. (2017). *Mapeo de la función cerebral en adultos mayores enfocado en la tarea de atención* [tesis de grado, Universidad Particular de Loja]. Repositorio Institucional UTPL. <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/17663>
- Manes, F., y Báez, S. (2019). Métodos de investigación en Neurociencias cognitivas. En E. Labos, A. Slachevsky, T. Torralva, P. Fuentes y F. Manes (Eds.), *Tratado de Neuropsicología Clínica* (pp.69-104). Akadia.
- Modi, S., Kumar, M., Nara, S., Kumar, P., y Khushu, S. (2018). Trait anxiety and neural efficiency of abstract reasoning: An fMRI investigation. *J Biosci*, 43 (5), 877-886.
- Momi, D., Neri, F., Coiro, G., Smeralda, C., Veniero, D., Sprugnoli, G., Rossi, A., Pascual-Leone, A., Rossi, S., y Santarnecchi, E. (2020). Cognitive Enhancement via Network-Targeted Cortico-cortical Associative Brain Stimulation. *Cerebral Cortex*, 30 (3), 1516-1527.
- Muñoz-Céspedes, J.M., y Tirapu-Ustároz, J. (2004). Rehabilitación de las funciones ejecutivas. *Revista de Neurología*, 38 (7), 656-663.
- Palacios, B. X. (2017). *Mapeo de la función cerebral en adultos mayores enfocado en la tarea de Lenguaje* [tesis de grado, Universidad Particular de Loja]. Repositorio Institucional UTPL. <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/17626>
- Peirce, W. (2009). Generating stimuli for neuroscience using PsychoPy. *Frontiers in Neuroinformatics*, 2 (10), 1-8.
- Pinker, S. (2005). *La Tabla Rasa, El Buen Salvaje y el Fantasma en la Máquina*. Paidós Asterisco.

- Pinker, S. (19 de octubre del 2011). Taming the devil within us. *Nature*, 478, 309–311.
<https://doi.org/10.1038/478309a>
- Pinker, S. (2012). *Los ángeles que llevamos dentro. El declive de la violencia y sus implicaciones*. Paidós.
- Portellano, J. A. (2005). *Introducción a la Neuropsicología*. McGraw-Hill.
- Ramos-Galarza, C., Ramos, V., Jadán-Guerrero, J., Lepe-Martínez, N., Paredes-Núñez, L., Gómez-García, A., y Bolaños-Pasquel, M. (2017). Conceptos fundamentales en la teoría Neuropsicológica. *Revista Ecuatoriana de Neurología*, 26 (1), 53-60.
- Ramos-Galarza, C., Jadán-Guerrero, J., Ramos, D., Bolaños, M., Ramos, V., y Fiallo-Karolys, W. (2017). Evaluación Neuropsicológica del Control Inhibitorio y el Control de la Interferencia: validación de Tareas Experimentales en el Contexto Ecuatoriano. *Revista Ecuatoriana de Neurología*, 26 (1), 27-34.
- Ríos-Lago, M. (2008). Neuropsicología y resonancia magnética funcional: Conceptos generales. *Radiología*, 50(5), 351–365.
- Saavedra, M. A. (2019). Historia de la Neuropsicología y Neuropsiquiatría. En E. Labos, A. Slachevsky, T. Torralva, P. Fuentes y F. Manes (Eds.), *Tratado de Neuropsicología Clínica* (pp. 3-8). Akadia.
- Smith, J. P., diSessa, A. A., y Roschelle, J. (1993). Misconceptions reconceived: A constructivist analysis of Knowledge in transition. *The Journal Of The Learning Sciences*, 3 (2), 115-163.
- Stern, Y., Ganes, Y., Razlighi, Q., Steffener, J., y Habeck, C. (2018). A task-invariant cognitive reserve network. *Neuroimage*, 178, 36-45.
- Stobart, G. (2010). *Tiempos de pruebas. Los usos y abusos de la evaluación*. Morata.
- Saxe, G., Calderone, D., y Morales, L. (2018). Brain entropy and human intelligence: A resting-state fMRI study. *PloS ONE*, 3 (2). 1-21.
- Trápaga, C. M. (2018). Introducción a la estimulación y rehabilitación de las funciones cognitivas. En C. Trápaga, H. Pelayo, I. Sánchez, Z. Bello y A. Bautista (Comp.), *De la psicología cognitiva a la neuropsicología* (pp. 1-34). Manual Moderno.
- Turner, B., Paul, E., Miller, M., y Barbey, A. (2018). Small sample sizes reduce the replicability of task-based fMRI studies. *Communications Biology*, 1 (1), 1-10.
- Valadez, J. y Granados, E. (2012). *Neuroanatomía funcional para neuropsicólogos*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- van Loenhoud., A., Habeck, C., van der Flier, W., Ossenkoppele, R., y Stern, Y. (2020). Identifying a task-invariant cognitive reserve network using task potency. *NeuroImage*, 210, 116593.
- van de Vijver, F. (2006). Cultural Differences in Abstract Thinking. *Encyclopedia of Cognitive Science*.
- van de Vijver, F., y Willemsen, M. (1993). Abstract Thinking. En J. Altarriba (Edi.), *Cognition and Culture: A Cross-Cultural Approach to Psychology* (pp. 317-342). Elsevier.
- Westphal, A., Reggente, N., Ito, K., y Rissman, J. (2016). Shared and Distinct Contributions of Rostrolateral Prefrontal Cortex to Analogical Reasoning and Episodic Memory Retrieval. *Human Brain Mapping*, 37, 806-912.

Westphal, A., Wang, S., y Rissman, J. (2017). Episodic Memory Retrieval Benefits from a Less Modular Brain Network Organization. *The Journal of Neuroscience*, 37 (13), 3523-3531.

Whitaker, K. J., Vendetti, M. S., Wendelken, C., y Bunge, S. A. (2017) Neuroscientific insights into the development of analogical reasoning. *Developmental Science*, 21 (2), 1-11.

Zappasodi, F., Perrucci, M., Saggino, A., Croce, P., Mercuri, P., Romanelli, R., Colom, R., y Ebisch, S. (2019). EEG microstates distinguish between cognitive components of fluid reasoning. *NeuroImage*, 189, 560-573.

Anexos 1
PROTOCOLO DE BÚSQUEDA DE EVIDENCIA

1. Preguntas clínicas:

¿Cuentan con validación estadística los paradigmas de razonamiento abstracto para RMf? Si es así ¿qué tipo de estadísticos se emplean?

¿Qué tipo/clase de paradigmas de razonamiento abstracto emplean los estudios para RMf?

P	Adultos
I	Paradigmas de razonamiento abstracto para RMf
C	-
O	Imagen cerebral

Se contemplaron aquellos estudios publicados sólo en inglés realizados entre enero del 2015 y julio del 2020 con adultos diestros y sanos entre 19 y 44 años de edad. Los estudios contaron con el reporte de imágenes cerebrales por RMf.

2. Protocolo de búsqueda

2.1. Metodología de trabajo:

2.1.1 La búsqueda de evidencia se realizó en **tres bases de datos**: Medline (PubMed), Scopus y EbscoHost.

2.1.2 En la búsqueda se incluyeron **descriptores MeSH** (Medical Subject headings) relacionados con el tema, así como palabras clave. La búsqueda se realizó empleando la caja de opciones “avanzadas” de cada base de datos y operadores booleanos AND, OR y NOT.

2.1.3 Se realizó una **bitácora de búsqueda** en el programa Microsoft Excel 2011 para MacOS versión 14.0.0, donde se registró la fecha de búsqueda, la base de datos consultada, la ecuación lógica de búsqueda utilizada y el número de registros obtenidos.

2.1.4 Se realizó en el programa Microsoft Excel 2011 para MacOS versión 14.0.0 un **“Formulario de estudio de elegibilidad”** basado en los criterios de inclusión y exclusión establecidos a priori en el protocolo con el fin de **“rechazar”** o **“aceptar”** los resultados generados en la búsqueda de las tres bases de datos. Para ello se

aplicó la metodología PRISMA para el cribado de resúmenes y selección de textos completos.

2.1.5 Se realizó en el programa Microsoft Excel 2011 para MacOS versión 14.0.0 un **“Formulario de síntesis de evidencia”** con los estudios seleccionados como **“aceptados”** con base en los criterios de inclusión y exclusión establecidos a priori en el protocolo.

2.1.6 Se realizó la **“Evaluación de riesgo de sesgo: calidad de la evidencia”** con base en criterios a partir de la pregunta de investigación.

2.2. Criterios de inclusión y exclusión:

Inclusión	Exclusión
Estudios en idioma inglés	Estudios de caso
Artículos científicos	Ensayos clínicos
Libros	Estudios de cohortes
Literatura gris: Tesis, acta de congresos, informes técnicos.	Metaanálisis
Población adultos entre 19 - 44 años	Resúmenes de Congresos
Los estudios emplean RMf	Muestra conformadas por niños
Los estudios cuentan con imágenes cerebrales por RMf	Muestra conformada por adolescentes
	Adultos mayores (+ 65 años)
	Estudios con sujetos con daño cerebral
	Estudios con sujetos con lateralidad zurda
	Estudios con sujetos con patologías neuropsicológicas: autismo, etc.
	Estudios sin tamaño de muestra
	Estudios sin descripción de rango o promedio de edad de la muestra.
	Estudios que empleen otras técnicas de neuroimagen como Eye-tracking, tractografía, magnetoencefalografía, etc.

2.3. Integrantes de la revisión:

- Investigador

2.4. Estrategias y términos de búsqueda:

- La búsqueda se realizó por el investigador del 02 al 04 de agosto del 2020. La búsqueda intentó ubicar todos los estudios referenciados en las bases de datos desde el 01 de enero del 2015 al 31 de julio del 2020.

- Las bases de datos consultadas fueron Medline (PubMed), Scopus y Ebscohost.
- La literatura se buscó a través de las opciones de “búsqueda avanzada” para emplear operadores booleanos AND, OR y NOT.
- Se emplearon los siguientes términos MeSH:

“adult”: que se define a una persona que ha alcanzado pleno crecimiento o madurez. Adultos que tienen entre 19 y 44 años.

“magnetic resonance imaging”: método no invasivo para demostrar la anatomía interna basado en el principio de que los núcleos atómicos en un campo magnético fuerte absorben pulsos de energía de radiofrecuencia y los emiten como ondas de radios que se pueden reconstruir en imágenes computarizadas. El concepto incluye técnicas tomográficas de espín protónico. Se emplearon los sinónimos aceptados “fMRI” y “functional magnetic resonance imaging”.

- Se emplearán también las siguientes palabras clave: “analogical reasoning”, “fluid reasoning”, “relational reasoning” y “abstract reasoning”.

Anexo 2

Formulario de estudio de elegibilidad del total de estudios (N = 57) obtenidos en las bases de datos: Medline, Scopus y EbscoHost

NO.	AUTORES	AÑO	TÍTULO	IDIOMA	TIPO DE DISEÑO			TIPO DE PUBLICACIÓN			POBLACION				PATOLOGIAS		ECONICAS DE NEUROIMAGE		OTROS	RESULTADO	COMENTARIOS
					ENSAJO CLINICO	META-ANALISIS	MUESTRA DEFINIDA	ARTICULO	ABSTRACT CONGRESO	NIÑOS	ADOLESC	JÓVENES ADULTOS (19-24 AÑOS)	ADULTOS MADUROS (19-44 AÑOS)	ADULTOS MAYORES (MÁS DE 65)	NO DESCRIBE EDAD DE LA MUESTRA	DANO CEREBRAL	PATOLOGIA NEUROPSIC	Duplicados			
1	Alexander et al.	2016	Relational thinking and relational reasoning: harnessing the power of patterning	INGLÉS				1												RECHAZADO	No reporta muestra. Sin relación con el tema de investigación artículo teórico
2	Wesphal et al.	2016	Shared and distinct contributions of rostralateral prefrontal cortex to analogical reasoning and episodic memory retrieval	1		1		1				1								ACEPTADO	
3	Whitaker et al.	2018	Neuroscientific insights into the development of analogical reasoning	1		1		1												RECHAZADO	Población: niños y adolescentes
4	Guerra-Carrillo et al.	2018	Eye gaze patterns reveal how reasoning skills improve with experience	1		1		1												RECHAZADO	Emplea otra técnica de neuroimagen: Eye tracking
5	Stern et al.	2018	Eye movements provide insight into individual differences in children's analogical reasoning strategies	1		1		1												RECHAZADO	Población: niños. Emplea otra técnica de neuroimagen: Eye tracking
6	Green et al.	2017	Thinking Cap Plus Thinking Zap: DCS of Frontopolar Cortex Improves Creative Analogical Reasoning and Facilitates Conscious Augmentation of State Creativity in Web Generation	1		1		1												RECHAZADO	Emplea otra técnica de neuroimagen: Estimulación transcraneal
7	Morge et al.	2016	Visuospatial Attention are Associated with Prefrontal and Parietal White Matter Tracts in Healthy Older Adults	1		1		1												RECHAZADO	Población: adultos-mayores. Sin relación con el tema de investigación
8	Mags-Wienberg et al.	2017	Nonspatial Relational Reasoning in Adolescence and Adulthood	1		1		1												RECHAZADO	Población: niños y adolescentes Sin relación con el tema de investigación.
9	Bartley et al.	2018	Meta-analytic evidence for a core problem solving network across multiple representational domains	1		1		1												RECHAZADO	Metaanálisis de 1997-2015
10	Mackay, et al.	2015	Characterizing Behavioral and Brain Change Associated with Practicing Reasoning Skills	1		1		1												RECHAZADO	Ensayo clínico

Insert author(s), describe studies

Anexo 3

Síntesis de evidencia de los estudios incluidos

Autores	Sujetos														RMF										Paradigma empleado DENTRO del RMF				Tests aplicados FUERA del RMF																									
	Aptitud		Sexo		Cómo reclutó	Consentimiento informado		Compensación monetaria		Total excluidos	Muestra final	Promedio Edad	Rango Edad	Idioma		Lateralidad	Marca	# sesiones trabajo	# sesiones espe	Entre paradigmas antes ingresar a RMF	# de paradigmas empleados a lo largo del estudio	Paradigma control		Dentro de paradigmas		Validación paradigma		Tipo paradigmas DENTRO del RMF				Matrices PPR	Matrices WMS																					
	SI	NO	H	M	No describe	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO																					
1- Wechsler et al.	2016	1	0	22	10	10	0	Universitaria y comunidad	1	0	1	0	2	20	21.1	0	19-25	1	0	1	Siemens	3T	2	8	1	0	3	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0													
2- Hau, Chau-Ting et al.	2019	1	0	62	23	26	0	*	1	0	0	1	13	49	22.69	4.57	18-40	1	0	1	Siemens	3T	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0												
3- Kong et al.	2015	1	0	299	140	159	0	Universitaria	1	0	1	0	8	201	21.57	1.21	18-25	0	1	1	Siemens	3T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
4- Hocke et al.	2015	1	0	106	0	0	1	*	0	1	0	1	0	106	50.13	16.53	22-77	1	0	1	0	Philips	3T	2	2	1	0	12	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0							
5- Hocke et al.	2016	1	0	291	132	159	0	*	0	1	0	1	0	291	0	0	20-79	1	0	0	1	Philips	3T	3	2	1	0	12	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
6- Dorothea et al.	2016	1	0	18	0	18	0	Universitaria	1	0	1	0	4	14	24.8	1.4	23-28	1	0	0	0	Siemens	1.5T	2	2	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
7- Wechsler et al.	2017	1	0	20	10	10	0	Universitaria y comunidad	1	0	1	0	0	20	21.1	0	0	0	1	0	0	0	Siemens	3T	2	8	1	0	3	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
8- Sim et al.	2018	1	0	256	0	0	0	Per carne	0	1	0	1	0	255	0	0	20-80	1	0	0	1	Philips	3T	2	2	1	0	12	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
9- Mod et al.	2018	1	0	22	10	12	0	Sujetos de instituto	1	0	0	1	0	22	21.09	1.51	20-30	0	1	0	1	Siemens	3T	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
10- Harner et al.	2019	1	0	296	111	118	0	Comunidad	1	0	1	0	66	229	23.4	5.1	18-43	1	0	0	1	Siemens	3T	1	3	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
11- Zappas et al.	2019	1	0	20	0	20	0	Universitaria	1	0	0	1	2	18	0	0	20-24	0	1	0	1	Philips	3T	1	6	1	0	3	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
12- van Loenhout et al.	2020	0	1	323	0	0	1	Per carne	1	0	0	1	58	265	0	0	20-80	1	0	0	1	Philips	3T	2	2	0	1	11	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
13- Sawe et al.	2018	1	0	882	0	0	1	Comunidad	1	0	0	1	0	882	21.61	2.84	18-35	1	0	0	0	Siemens	3T	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14- Borner et al.	2016	0	1	18	8	10	0	Universitaria	1	0	0	1	2	17	23.4	2.5	0	1	0	0	1	Siemens	3T	0	0	1	0	4	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Anexo 4

Cálculo de evaluación de sesgo: calidad de los estudios incluidos

	AUTORES	AÑO	Sesgo de selección					Sesgo de exclusión		Sesgo de realización										
			Cómo reclutó	Sexo	Laterali	Conse inform	Total	%	Exclu sujetos	%	Hipótesis	Muestra total	Entrena paradigma	Paradg control	Diseño paradig	Valida paradig	Paradig DENTRO del RMf	Tiempo duración paradig	Total	%
1	Westphal et al.	2016	1	1	1	1	4	100	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	6	75
2	Hsu, Chun-Ting et al.	2019	0	1	1	1	3	75	1	100	1	0	0	0	0	0	0	0	2	25
3	Kong et al.	2015	1	1	1	1	4	100	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	25
4	Habeck et al.	2015	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	5	63
5	Habeck et al.	2016	0	1	1	0	2	50	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	5	63
6	Dumonthell et al.	2016	1	1	0	1	3	75	1	100	0	1	1	1	0	0	0	0	4	50
7	Westphal et al.	2017	1	1	0	1	3	75	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	4	50
8	Stern et al.	2018	1	0	1	0	2	50	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	6	75
9	Modi et al.	2018	1	1	1	1	4	100	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	6	75
10	Hammer et al.	2019	1	1	1	1	4	100	1	100	1	1	0	1	0	1	1	1	6	75
11	Zappasodi et al.	2019	1	1	1	1	4	100	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8	100
12	van Loenhouw et al.	2020	1	0	1	1	3	75	1	100	0	0	1	0	1	1	0	0	3	38
13	Saxe et al.	2018	1	0	0	1	2	50	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	25
14	Bonner et al.	2016	1	1	1	1	4	100	1	100	0	1	1	1	1	1	0	0	6	75