



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación

Trabajo Fin de Grado

Las neuronas espejo, funciones e implicaciones en el autismo

Alumno/a: Victoria Fernández Moyano
Tutor/a: Prof. D. Ángeles Agüero Zapata
Dpto.: Psicobiología

Mayo, 2023

ÍNDICE

1.RESUMEN Y PALABRAS CLAVE/ABSTRACT AND KEY WORDS	3
2.METODOLOGÍA	4
3.INTRODUCCIÓN	4
4.DEFINICIÓN DEL TRASTORNO DEL ESPECTRO AUTISTA (TEA) Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	5
5.NEURONAS ESPEJO Y SUS FUNCIONES	8
5.1. Lenguaje	
5.2. Imitación	
6.IMPLICACIONES DE LAS NEURONAS ESPEJO EN EL AUTISMO	12
6.1. Ritmo mu	
6.2. Teoría del espejo roto	
6.3. Teoría de la mente	
6.4.Hipótesis del cerebro social	
7.ACTUALIDAD EN LA INVESTIGACIÓN DE LAS NEURONAS ESPEJO Y EL AUTISMO	17
8.CONCLUSIONES	19
9.BIBLIOGRAFÍA	21

1. RESUMEN

Esta revisión recopila información sobre investigaciones acerca de las neuronas espejo, su funcionamiento y la implicación en el Trastorno del Espectro Autista (TEA). Desde su descubrimiento, se han realizado cientos de investigaciones sobre estas neuronas y encontramos un gran número que las relacionan con el autismo, ya que se ha observado una actividad disminuida de estas, las cuales están localizadas en áreas cerebrales relacionadas con los déficits de estas personas.

Se hace especial hincapié en investigaciones que han aportado luz de la influencia de estas neuronas en el lenguaje, la imitación o el ritmo μ cerebral y sobre la relación con la teoría del espejo roto, la teoría de la mente o la hipótesis del cerebro social. Por último, también encontramos un resumen sobre algunas investigaciones más recientes en este ámbito y unas conclusiones finales donde se proponen futuras líneas de investigación .

Palabras clave: Neuronas espejo, trastorno del espectro autista, ritmo μ , teoría de la mente, cerebro social

ABSTRACT

This review collects information on research on mirror neurons, their function, and their involvement in autism spectrum disorder (ASD). Since their discovery, hundreds of investigations have been carried out on these neurons and we found a large number that relate them to autism, since a decrease in the activity of these neurons has been observed, which are located in brain areas related to deficits in this people. .

Special emphasis is placed on research that has shed light on the influence of these neurons on language, imitation or brain rhythm and on the relationship with the theory of the broken mirror, the theory of mind or the hypothesis of the social brain. Finally, we also find a summary of some of the most recent research in this field and some final conclusions where future lines of research are proposed.

Keywords: Mirror neurons, autism spectrum disorder, μ rhythm, theory of mind, social brain

2.METODOLOGÍA

En el presente trabajo, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica sobre las neuronas espejo y su relación con el autismo. Para realizar esta investigación, se han utilizado diversas fuentes de información, entre las que se encuentran la base de datos de PsycInfo, Pubmed, Science Direct y Google Académico.

En primer lugar, se realizó una búsqueda sistemática en la base de datos de PsycInfo utilizando términos clave relacionados con las neuronas espejo y el autismo, por ejemplo "mirror neurons", "mirror neurons AND autism", "Theory of mind" "Autism spectrum disorder". Al principio no se restringió el periodo de publicación, ya que la intención era ver los avances en investigación desde su descubrimiento, posteriormente se realizaron estas búsquedas incluyendo únicamente los artículos publicados en los últimos 10 años. A pesar de haber seleccionado artículos dentro de este rango de fecha, también se han seleccionado otras publicaciones anteriores, con mayor antigüedad, ya que han sido investigaciones importantes y que ayudan a dar contexto y entender algunos conceptos. También se llevó a cabo una búsqueda en Pubmed, Science Direct y google académico para encontrar artículos que pudieran ser relevantes para la investigación. En esta búsqueda, se utilizaron términos clave similares a los utilizados en la búsqueda en la base de datos de PsycInfo. Una vez recopilados los artículos, se realizó una revisión de cada uno de ellos para identificar aquellos que fueran relevantes para el tema de investigación, para ello se revisaron los resúmenes y los textos completos.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis de la información más relevante de cada artículo y se agruparon los hallazgos en los diferentes puntos de este trabajo.

Los resultados de esta revisión pueden ser útiles para futuros estudios en este campo y para mejorar la comprensión de los posibles mecanismos neuronales subyacentes al autismo.

3.INTRODUCCIÓN

El cerebro del humano está repleto de millones de neuronas, las cuales se comunican para transmitir la información que reciben del organismo. Esta comunicación se da a través de señales eléctricas y químicas (neurotransmisores) y se denomina "Sinapsis".

Giacomo Rizzolatti, neurobiólogo italiano, descubrió casualmente en 1992 lo que conocemos actualmente como "Neuronas espejo". Rizzolatti estaba en Parma (Italia), estudiando junto a su equipo de investigación la actividad de las neuronas motoras en el cerebro de un grupo de macacos (macaca nemestrina). El fin de su investigación, era explorar los movimientos de la mano y la boca, esto lo hicieron registrando mediante electrodos los

potenciales de acción que se producían en la superficie de las neuronas en un área de la corteza premotora, llamada área F5, la cual se encarga de planificar y llevar a cabo la motricidad voluntaria. En una de las sesiones, Vittorio Gallese, uno de los investigadores que acompañaban a Rizzolatti, agarró algo con su mano mientras el macaco, ya monitorizado, le observaba e instantáneamente escuchó un sonido que alertaba de la activación de las neuronas de este animal, a pesar de que este no hubiese realizado ningún movimiento. Este hecho causó gran impresión y curiosidad e hizo que surgiera gran interés por estudiar este fenómeno. Debido a este descubrimiento fortuito, se dieron cuenta de que había un conjunto de neuronas localizadas en esta ya nombrada área F5, que se activaban tanto al realizar una acción como al observar a otros realizarla. (Rizzolatti y Craighero, 2004)

Desde su descubrimiento, se han realizado numerosos estudios sobre estas neuronas y su implicación en la vida de los humanos, ya que se ha observado que estas pueden tener relevancia en los procesos de socialización y aprendizaje, y por tanto también podrían estar implicadas en la sintomatología de algunos trastornos como es el caso del Trastorno del espectro autista (TEA).

El objetivo de esta revisión es recopilar y analizar información sobre la evolución que ha tenido la investigación de estas neuronas, las evidencias encontradas y las creencias respecto a su implicación en el Trastorno del Espectro Autista (TEA)

4.DEFINICIÓN DEL TRASTORNO DEL ESPECTRO AUTISTA Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

El trastorno del espectro autista (TEA) es considerado como un trastorno del neurodesarrollo, caracterizado por dificultades en la comunicación social, patrones de comportamiento repetitivo y estereotipado, y una escasa y repetitiva variedad de intereses y actividades (APA, 2013).

Los síntomas del TEA suelen aparecer en la primera infancia, pudiendo variar tanto en su gravedad como en su presentación clínica y, aunque los síntomas pueden ir desde leves a graves, la mayoría de las personas con TEA presentan aspectos en común como son las dificultades significativas en la comunicación social (por ejemplo, la dificultad para iniciar y mantener conversaciones o la incapacidad para comprender las emociones e intenciones de los demás). Además de esto, también pueden presentar dificultades a la hora de comprender y responder a las expresiones faciales y gestos que observan (APA, 2013)

Añadido a las dificultades ya mencionadas, las personas con TEA, también suelen presentar por lo general patrones motores repetitivos y estereotipados, intereses intensos en

objetos o temas específicos y rutinas/rituales inflexibles que pueden provocar gran ansiedad (APA, 2013). Estos patrones de comportamiento pueden interferir significativamente con las actividades de la vida diaria de la persona, llegando a causar momentos de gran angustia y ansiedad. Los movimientos repetitivos pueden incluir, por ejemplo, balanceos, girar, mover o torsionar los dedos de manera repetitiva, etc.. A menudo, como ya hemos mencionado, estas personas tienen intereses muy específicos y restringidos, lo cual conlleva que puedan pasar periodos prolongados hablando sobre un mismo tema o realizando una misma actividad o comportamiento sin llegar a ser conscientes de ello. Debido a esta cantidad de problemas, suelen ser personas a las que les cuesta relacionarse con los demás y afrontar cambios en sus rutinas y su ambiente

Dentro de esta variedad de características, es importante recalcar la gran variabilidad en que se pueden presentar, ya que cada sujeto es único y por tanto podemos encontrar diferentes perfiles dentro de lo que es el autismo. Desde el DSM-V (APA, 2013) se hace alusión a 3 niveles de autismo basados en la severidad de los síntomas y en la cantidad de apoyo que necesitan estas personas en función de sus características. (Ver Figura 1)

Nivel de gravedad	Comunicación social	Comportamientos repetitivos y restringidos
Grado 1. "Necesita ayuda"	Sin ayuda <i>in situ</i> , las deficiencias en la comunicación social causan problemas importantes. Dificultad para iniciar interacciones sociales y ejemplos claros de respuestas atípicas o insatisfactorias a la apertura social de las otras personas. Puede parecer que tiene poco interés en las interacciones sociales. Por ejemplo, una persona que es capaz de hablar con frases completas y que establece la comunicación, pero cuya conversación amplia con otras personas falla y cuyos intentos de hacer amigos son excéntricos y habitualmente no tienen éxito	La inflexibilidad del comportamiento causa una interferencia significativa con el funcionamiento en uno o más contextos. Dificultad para alternar actividades. Los problemas de organización y de planificación dificultan la autonomía.
Grado 2 "necesita ayuda notable"	Deficiencias notables en las aptitudes de comunicación social, verbal y no verbal; problemas sociales obvios incluso con ayuda <i>in situ</i> ; inicio limitado de interacciones sociales, y respuestas reducidas o anormales a la apertura social de otras personas. Por ejemplo, una persona que emite frases sencillas, cuya interacción se limita a intereses especiales muy concretos y que tiene una comunicación no verbal muy excéntrica	La inflexibilidad del comportamiento, la dificultad para hacer frente a los cambios y los otros comportamientos restringidos/repetitivos resultan con frecuencia evidentes para el observador casual e interfieren con el funcionamiento en diversos contextos. Ansiedad y/o dificultad para cambiar el foco de la acción.
Grado 3 "necesita ayuda muy notable"	Las deficiencias graves de las aptitudes de comunicación social, verbal y no verbal, causan alteraciones graves del funcionamiento, un inicio muy limitado de interacciones sociales y	La inflexibilidad del comportamiento, la extrema dificultad para hacer frente a los cambios y los otros

	<p>una respuesta mínima a la apertura social de las otras personas. Por ejemplo, una persona con pocas palabras inteligibles, que raramente inicia una interacción y que, cuando lo hace, utiliza estrategias inhabituales para cumplir solamente con lo necesario, y que únicamente responde a las aproximaciones sociales muy directas.</p>	<p>comportamientos restringidos/repetitivos interfieren notablemente con el funcionamiento en todos los ámbitos. Ansiedad intensa/ dificultad para cambiar el foco de la acción.</p>
--	---	--

Figura 1: Tabla de niveles de gravedad del TEA según el DSM-5 (APA,2013)

Partiendo de estos niveles descritos en el DSM-5, es necesario tener en cuenta que cada persona puede presentar sus síntomas de formas distintas, afectando en mayor o menor medida a su vida, por ello también podemos hablar de perfiles como el llamado ‘Autismo de alto funcionamiento’ el cual se caracteriza por tener unos síntomas del TEA menos intensos, mejores habilidades comunicativas y mayor independencia, sin embargo estas personas aún presentan dificultades en la socialización y a la hora de entender las reglas sociales. y pueden tener intereses limitados y obsesivos con temas específicos. También podemos encontrar lo que es llamado como ‘autismo atípico’ o ‘autismo regresivo’, que se caracteriza por un desarrollo ‘normal’ en los primeros años de vida y una posterior pérdida de habilidades sociales, lingüísticas y motoras que ya habían sido adquiridas durante la infancia.

Para realizar un diagnóstico de TEA en un niño, se lleva a cabo una evaluación multidisciplinar que incluye la observación clínica, diferentes entrevistas con padres y/o cuidadores, y la aplicación de pruebas estandarizadas, por ejemplo la escala ADOS -2 (Lord, Rutter et al, 2015), el ABAS-II o Sistema de Evaluación de la conducta Adaptativa de Harrison y Oakland (2013), o el cuestionario AQ, desarrollado por Baron Cohen et al. (2001). A día de hoy, el tratamiento de personas con TEA se centra en abordar los síntomas específicos que presente la persona, pudiendo incluir para ello la terapia ocupacional, terapia con logopedia y terapia psicológica (National Institute of Mental Health, 2018).

La terapia ocupacional puede servir de gran ayuda, sobre todo a los niños, para que puedan desarrollar habilidades motoras y a aprender a realizar tareas cotidianas de la forma más efectiva y temprana posible. Por otro lado, la terapia con logopedia, puede mejorar sus habilidades lingüísticas y comunicativas. Por último, en cuanto a la terapia psicológica, esta puede proporcionar apoyo y ayudar a desarrollar habilidades emocionales de afrontamiento ante los distintos problemas y desafíos diarios a los que se enfrentan estas personas.

Aunque actualmente no existe una cura para el TEA, es importante que las personas con este trastorno puedan ser diagnosticadas desde edades muy tempranas, por ello es de vital importancia que los padres y/o cuidadores principales estén atentos a signos como pueden ser

la ausencia de respuesta ante estímulos sociales, la falta de contacto visual y el retraso en el desarrollo del habla para buscar profesionales que pueden realizar una evaluación y posteriormente llevar a cabo una intervención temprana y un tratamiento adecuado que permita desarrollar al máximo sus capacidades para procurar una mejor calidad de vida.

5.LAS NEURONAS ESPEJO Y SUS FUNCIONES

Tras el descubrimiento de las neuronas espejo, se comprobó su existencia en el cerebro de los humanos utilizando técnicas, como la resonancia magnética funcional (RMF), la estimulación magnética transcranial (EMT) o el electroencefalograma (EEG), que permiten observar la activación de algunas zonas del cerebro, por ejemplo, las primeras pruebas sobre esto, se publicaron en un estudio cuantitativo en el que participaron 20 sujetos (10 hombres y 10 mujeres), en el que los sujetos observaban y ejecutaban movimientos de los dedos mientras se registraba mediante EEG las variaciones eléctricas cerebrales (Cochin, S., Barthelemy, C., et al, 1999) Lo que sucedía durante este estudio, era que los sujetos mostraban una activación de la corteza motora tanto al realizar el movimiento como al observarlo, lo cual sugería que tanto la observación como la ejecución compartían la misma red.

A lo largo de los años, se han realizado numerosos estudios que han detectado la existencia de neuronas espejo en zonas como el lóbulo parietal inferior y en la corteza premotora, además de la zona caudal del giro frontal inferior (Ver Figura 2)

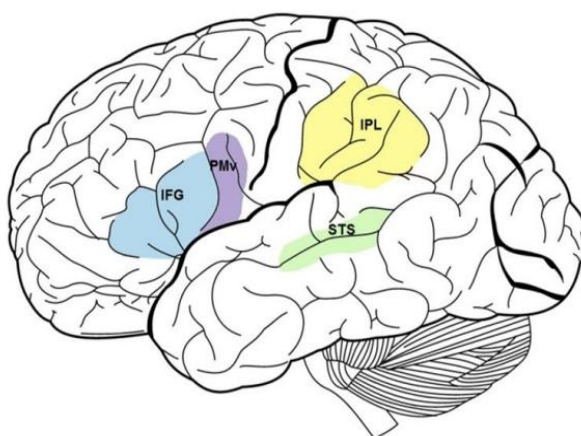


Figura 2: Sistema de Neuronas Espejo. Giro Frontal Inferior (IFG); Corteza Premotora Ventral (PMV); Lóbulo Parietal Inferior (IPL); Lóbulo Parietal; Sulcus Temporal Superior (STS).

Imagen Extraída de Werner et al. (2012)

En 2009 y 2010, se llevaron a cabo estudios de resonancia magnética funcional con supresión de repetición en sujetos sanos y estudios que utilizaban registros unicelulares en

pacientes prequirúrgicos (Kilner et. al, 2009;Mukamel et al., 2010;), que han evidenciado la existencia de neuronas espejo en humanos en estas distintas áreas.

Kilner et al. (2009) registraron mediante resonancia magnética funcional los datos de 10 sujetos sanos mientras observaban y ejecutaban una serie de acciones con la finalidad de encontrar evidencia de la existencia de neuronas espejo en el giro frontal inferior de los humanos. Los resultados mostraron datos significativos de activación tanto cuando la acción observada iba seguida por una acción ejecutada como viceversa, lo cual confirmaba su hipótesis.

Por otro lado,Mukamel et al, 2010 llevaron a cabo una investigación con 21 pacientes, en la que registraron la actividad neuronal mientras los sujetos observaban y ejecutaban expresiones faciales y acciones de agarre con las manos. Los resultados de esta investigación, mostraron que un gran número de neuronas dentro del área motora suplementaria y del hipocampo respondían tanto a la observación como a la ejecución, sin embargo, un pequeño grupo de estas neuronas mostró excitación durante la ejecución e inhibición durante la observación.

Las neuronas de la corteza premotora, influyen en la planificación motora a través de conexiones con la corteza motora primaria. La zona caudal del giro frontal inferior se corresponde con el área de Broca (área principal del lenguaje), cuya función es permitir la ejecución de los patrones motores a la hora de expresar el lenguaje tanto hablado como escrito. Zonas como la corteza cingulada anterior, la amígdala y la ínsula, tienen que ver con la regulación y expresión emocional, por tanto estas neuronas pueden estar relacionadas con la empatía, como veremos más adelante. Todo esto, nos indicaría que las neuronas espejo se reparten por distintas zonas del cerebro y no de forma localizada, cumpliendo así distintas funciones en el ser humano.

5.1 Lenguaje

Di Pellegrino et al.,1992 observaron que las neuronas espejo eran capaces de reconocer movimientos de la boca, ya que las neuronas se activaban cuando el mono observaba la comunicación entre otros individuos.Iacoboni et al.,1999 consiguieron demostrar la existencia de neuronas espejo en el área de Broca ya que vieron que existía activación de un grupo de neuronas espejo cuando los sujetos observaban la comunicación y los gestos faciales que derivaban de ella.

Según la teoría de la simulación lingüística propuesta por Gallese y Lakoff (2005), las palabras referidas a acciones y sensaciones motoras activan las mismas regiones del cerebro

que se activan cuando se realiza la acción o se experimenta la sensación. Esto nos sugiere que las neuronas espejo podrían estar involucradas en la comprensión del lenguaje y en la formación de representaciones mentales de las acciones y sensaciones descritas en el discurso.

Otro estudio realizado por Pulvermüller (2005) sugiere que las neuronas espejo también podrían estar involucradas en el proceso de adquisición del lenguaje. Según este autor, la asociación entre los sonidos de las palabras y las representaciones motoras de las acciones que describen estas podría ser fundamental para el aprendizaje del lenguaje. Los resultados de este estudio mostraron que las palabras que se referían a acciones manuales, como "apretar" o "golpear", activaban las mismas regiones del cerebro que cuando se realiza la acción correspondiente. Además, se encontró que la activación de estas regiones se correlaciona con la velocidad de aprendizaje de nuevas palabras.

En resumen, las neuronas espejo podrían desempeñar un papel importante en la comprensión y la producción del lenguaje, así como en el aprendizaje del lenguaje por imitación. Si bien aún es necesaria mayor investigación, los estudios hasta ahora nos proporcionan evidencia convincente de la participación de las neuronas espejo en la simulación de acciones motoras y en la comprensión del lenguaje.

5.2. Imitación

Estas neuronas permiten comprender las acciones y relacionarlas con otras similares, por ello el Sistema de Neuronas Espejo (SNE) se encarga del aprendizaje por imitación. Su función es entender la acción observada e imitarla. Para que este SNE se active, el sujeto debe conocer previamente la acción que observa.

Cuando un sujeto realiza una acción en un determinado contexto, lo hace con una finalidad o intención. Esta finalidad o intención se asocia al acto motor y dicha información se almacena en el cerebro, de manera que cuando observamos a otro sujeto realizar esta acción, podemos intuir y comprender la intención y el propósito que tiene e incluso deducir cuál será el siguiente acto. Podemos decir pues, que el SNE es quien nos permite aprender por imitación y entender a las personas y sus motivaciones.

Numerosos estudios han examinado el papel de las neuronas espejo en la imitación. Por ejemplo, en el estudio de Iacoboni y colaboradores (1999) los investigadores utilizaron imágenes de resonancia magnética funcional (fMRI) para medir la actividad cerebral de los participantes mientras imitaban o simplemente observaban a otra persona realizando una tarea de agarre de objetos. La tarea consistió en agarrar una taza de café y levantarla hasta la boca. Los participantes vieron a un modelo realizar la tarea y luego la imitaron. Los resultados

mostraron que había una mayor activación en las áreas cerebrales que contienen neuronas espejo (es decir, el área premotora y la corteza parietal inferior) cuando los participantes imitaban la tarea en comparación con cuando solo la observaban. Esto sugiere que las neuronas espejo juegan un papel importante en la comprensión y la imitación de acciones.

El SNE también se relaciona con otras áreas cerebrales, entre ellas el sistema límbico, como hemos comentado anteriormente. El área frontal envía la información a la ínsula y ésta a otras estructuras, haciendo que comprendamos el significado de las expresiones faciales que observamos y que posteriormente imitamos. Esta interacción es muy importante para la comprensión y la socialización y por tanto para la empatía (Iacoboni y Dapretto, 2006). Esto es algo muy relevante para la supervivencia humana, ya que somos seres sociales.

Otros estudios han investigado el papel de las neuronas espejo en el desarrollo infantil y en la comprensión de los gestos y expresiones faciales. Por ejemplo, el estudio de Meltzoff y Moore (1997) donde los investigadores observaron a bebés recién nacidos mientras imitaban las expresiones faciales de los adultos. Los bebés fueron grabados mientras realizaban expresiones faciales como abrir la boca, sacar la lengua y fruncir el ceño. (Ver Figura 3)

Los resultados mostraron que estos eran capaces de imitar las expresiones faciales observadas, lo que sugiere que las neuronas espejo pueden estar presentes desde edades tempranas.



Figura 3: Bebés imitando expresiones faciales. Imagen extraída de Meltzoff y Moore, (1997)

6.IMPLICACIONES DE LAS NEURONAS ESPEJO EN EL AUTISMO

Aunque la etiología del autismo sigue siendo un misterio actualmente, gracias al avance en tecnología cada vez tenemos más herramientas para investigar y profundizar en ello. Como ya hemos explicado anteriormente, el trastorno del espectro autista, en general, tiene como resultado una alteración de la conducta durante la infancia, y está se va extendiendo a lo largo del crecimiento ocasionando mayores problemas durante la adultez y provocando déficits sobretodo en las habilidades sociales y comunicativas (imitación, lenguaje pragmático, empatía..)

En las últimas décadas, se han llevado a cabo diversas investigaciones acerca del autismo y la posible implicación de las neuronas espejo en este. Así Ramachandran y Oberman (2007), revisaron estudios en los que se demostraban que las neuronas espejo se activaban tanto cuando una persona realizaba una acción como cuando observaba a otros realizarla y hablaron sobre las dificultades que presentan las personas con TEA para simular y comprender las emociones, pensamientos y creencias de los demás, lo cual provoca déficits sociales y comunicativos. Argumentan que el déficit en las neuronas espejo, parece aportar una explicación a estas funciones alteradas.

6.1 Ritmo mu (μ)

Ultimamente se ha estado relacionando el funcionamiento del sistema de neuronas espejo con ciertos ritmos cerebrales, como es el caso del "ritmo mu". El ritmo mu (μ), es una actividad eléctrica de baja frecuencia producida en el área motora primaria y en las regiones corticales asociadas a la percepción y producción de movimientos. Esta oscilación neuronal se produce en el rango de frecuencia de 8 a 13 Hz y se puede medir a través de la electroencefalografía (EEG).

En la investigación sobre las neuronas espejo, el ritmo mu se utiliza como un marcador de la actividad de las neuronas espejo, ya que se ha observado que la amplitud de la señal disminuye cuando una persona realiza una acción o la observa (Muthukumaraswamy, 2013).

Además de su relación con las neuronas espejo, el ritmo mu también se ha relacionado con otras funciones cerebrales, como la atención, la memoria y el procesamiento sensorial (Pfurtscheller & Lopes da Silva, 1999). En el ámbito clínico, se ha utilizado el ritmo mu para estudiar trastornos neurológicos y psiquiátricos, por ejemplo en el autismo, ya que se ha observado una disfunción del ritmo mu en estos trastornos (Oberman et al., 2016)

Oberman et al. (2005) examinó la actividad cerebral en 10 niños con TEA comparándolos con un grupo control de 10 niños neurotípicos, durante la observación de movimientos de su propia mano, movimientos de una mano ajena y movimientos de pelotas rebotando. Los investigadores utilizaron el electroencefalograma (EEG), una técnica no invasiva para medir la actividad eléctrica en el cerebro, para registrar los cambios en la actividad cerebral .

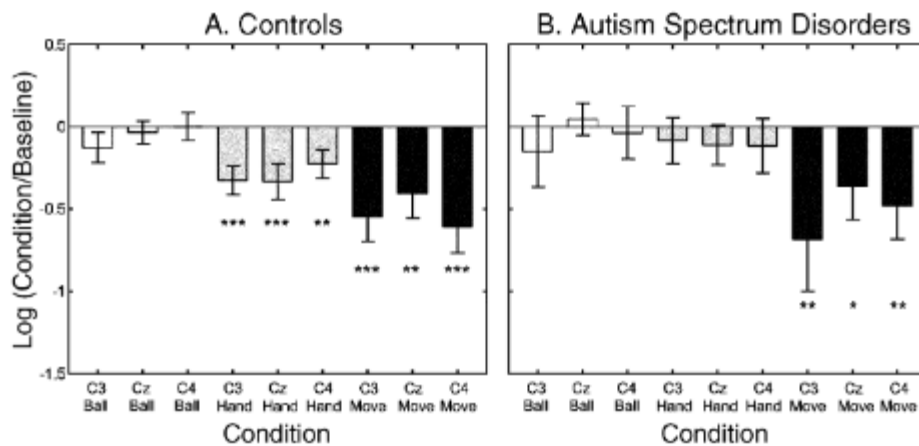


Figura 4: Imagen extraída de Oberman et al. (2005)

Los resultados del estudio indicaron que los niños con TEA mostraron una actividad cerebral diferente a la de los niños típicamente desarrollados. El grupo control mostró una supresión significativa del ritmo mu durante la observación del movimiento de su propia mano y durante la observación del movimiento de la mano ajena. El grupo con TEA mostró supresión significativa durante la observación del movimiento de su propia mano pero no en la observación del movimiento de la mano ajena. Ninguno de los grupos mostró supresión del ritmo ante la observación de las pelotas en movimiento (Ver Figura 4). Estos hallazgos sugieren que los niños con TEA tienen una disfunción en el sistema de neuronas espejo, lo que puede contribuir a sus dificultades en la comprensión y la imitación de las acciones de otras personas.

Estas evidencias pueden llevarnos a pensar que existe algún defecto en el SNE, sin embargo se ha observado que cuando el movimiento procede de personas que son cercanas, si que se da la supresión del ritmo mu (Palau-Baduell, et. al, 2011). Esto ha dado lugar a pensar en dos hipótesis, la primera es que las personas con autismo requieren un nivel más alto de activación del SNE y la segunda es que el SNE puede que tenga déficits conectivos con otras áreas del cerebro

Todo esto, nos lleva a la idea de que, en las personas autistas, el SNE no se desarrolla correctamente lo cual produce incapacidad a la hora de comprender los actos de los demás y de imaginar las intenciones y motivaciones que les mueven. Esto estaría relacionado con la ``Teoría del espejo roto`` y por consiguiente con la ``Teoría de la mente``

6.2 Teoría del espejo roto

La teoría del espejo roto sugiere que las personas con autismo tienen dificultades para comprender los estados mentales de los demás debido a una disfunción en las neuronas espejo. Esto se ha demostrado en varios estudios que han encontrado una menor activación de las neuronas espejo en personas con autismo en comparación con personas sin autismo (Oberman, Ramachandran y Pineda, 2008). Además, se ha encontrado que las personas con autismo tienen dificultades para imitar las acciones de los demás y para comprender las expresiones faciales, lo que sugiere una disfunción en la capacidad de imitación y en la teoría de la mente

La teoría del espejo roto ha sido objeto de debate y críticas por parte de algunos investigadores, quienes argumentan que la disfunción de las neuronas espejo en el autismo es solo una parte del problema y que la teoría de la mente en sí misma es un proceso complejo que involucra muchas áreas del cerebro. Sin embargo, otros estudios han confirmado que la disfunción de las neuronas espejo en personas con autismo puede afectar su capacidad para comprender los estados mentales de los demás y para experimentar empatía (Southgate, Johnson, Osborne, & Csibra, 2009).

A pesar de las críticas, la teoría del espejo roto ha tenido un gran impacto en la comprensión del autismo y ha llevado a una mayor investigación sobre las neuronas espejo y su relación con la empatía y la teoría de la mente. Estos hallazgos sugieren que las neuronas espejo pueden ser importantes para la cognición social y emocional ya que la capacidad de comprender acciones e intenciones son la base de la empatía, la cual es crucial para las interacciones sociales. También pueden tener implicaciones para el tratamiento del autismo, ya que como veremos más adelante se están llevando a cabo investigaciones acerca de la eficacia de la visualización e imitación de acciones sociales, como por ejemplo los gestos faciales, de cara a fortalecer la activación de esta red de neuronas y mejorar la comprensión social y por tanto atenuar los déficits sociales del autismo.

6.3. Teoría de la mente

La teoría de la mente consiste en la capacidad que tiene un individuo para comprender los estados mentales de uno mismo y de los demás, incluyendo sus creencias, deseos, intenciones y emociones. (Premack y Woodruff, 1978).

Esto es esencial para llevar a cabo una interacción social de éxito ya que nos permite predecir y realizar hipótesis acerca del comportamiento de otras personas, además de reconocer situaciones engañosas, empatizar con los demás, etc.. El desarrollo normal de la teoría de la mente suele darse entre los 18 y los 24 meses de vida, cuando los bebés comienzan a reconocer expresiones faciales y tonos de voz. A los 18 meses, comienzan a comprender que los demás tienen creencias y pensamientos diferentes a los suyos, algo que hasta entonces no ocurría lo que se conoce como "falsa creencia" (Wellman et al., 2001)

El aprendizaje por imitación es un proceso de gran importancia, ya que nos permite conocer el mundo, regular los procesos de interacción con otros y dar significado a lo que observamos. Cuando este proceso falla, como ocurre en las personas con Autismo, acarrea serios problemas emocionales y de integración social. Es importante destacar que existen diferencias individuales en el desarrollo de la teoría de la mente, ya que puede variar según la cultura y el contexto social en el que se desenvuelve el individuo, debido a que existen culturas en las que se gestualiza menos o incluso donde el significado de los gestos puede variar al significado que tienen en otras. Su déficit puede estar presente en algunos trastornos del desarrollo, como el autismo y en estos casos, la intervención temprana puede ayudar a mejorar la capacidad para comprender y manejar las situaciones sociales.

Existen diferentes pruebas y métodos para evaluar la teoría de la mente en niños y adultos, como por ejemplo la prueba de Sally-Anne o tarea de la falsa creencia, desarrollada por Wellman y Cross (1985) (Ver Figura 5), que se basa en la capacidad de comprender que los demás pueden tener una perspectiva diferente a la propia.

En la prueba, Sally y Anne son dos personajes que entran en escena. Sally guarda una canica en una cesta y sale de la escena, después aparece Anne y cambia la canica de lugar, la mete en una caja. Una vez el niño/a ha visualizado esto, se le pregunta dónde cree que Sally buscará su canica al volver. En caso de que el niño indique que Sally buscará la canica en la cesta, esto querrá decirnos que este es capaz de entender que Sally no sabe que han cambiado su canica de sitio, sin embargo si el niño/a nos indica que Sally buscará la canica en la caja esto será indicador de que no ha comprendido la situación y por tanto no superaría la prueba.

Los niños con menos de cuatro años no suelen superarla. Esta prueba, sirve a los profesionales e investigadores para comprender mejor cómo se desarrolla esta habilidad y a

identificar las posibles dificultades en niños/as con trastornos del desarrollo, como es el caso de los niños con Autismo.

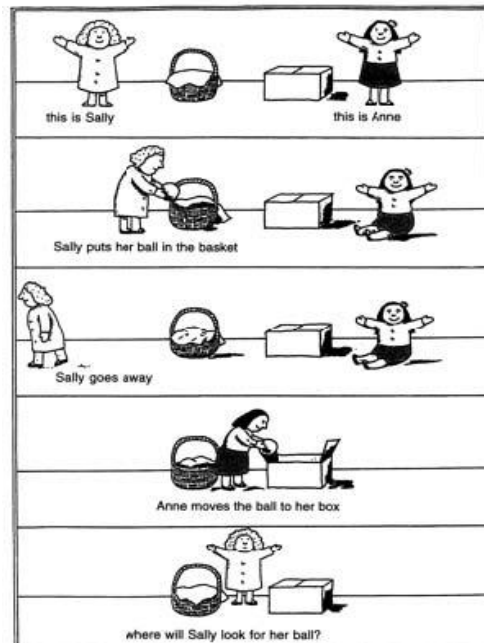


Figura 5:Representación prueba Sally y Anne Imagen extraída de Happé, (1994)

Por último, cabe mencionar que la teoría de la mente no solo es esencial para la interacción social, sino que también está relacionada con la capacidad de comprender la ficción y el humor, y de ser creativos en el pensamiento y la resolución de problemas.

6.4.Hipótesis del cerebro social

Robin Dunbar (2014), sugiere que la evolución del cerebro humano y su complejidad están directamente relacionados con la necesidad de mantener relaciones sociales complejas. Según esta teoría, el tamaño del neocórtex, región del cerebro responsable del pensamiento complejo y la toma de decisiones, se relaciona con la capacidad para mantener un número limitado de relaciones sociales, de manera que los individuos con un neocórtex más grande tendrían la capacidad de manejar grupos sociales más grandes y complejos.

Dunbar sostiene que, como seres sociales, los humanos dependen de relaciones sociales complejas para sobrevivir y evolucionar. Sin embargo, debido a la complejidad y el desgaste energético que estas relaciones suponen, sólo son capaces de mantener un número limitado de relaciones significativas, el cual estima alrededor de 150 personas.

Powell et al. (2010, 2012) demostraron en humanos adultos que el tamaño de la red social se correlacionaba positivamente tanto con las competencias cognitivas como con el tamaño de su corteza orbitofrontal.

Si nos comparamos con nuestros predecesores y con los primates, la evolución y supervivencia humana ha pasado por diferentes etapas, desde la caza para obtener sustento y la evitación de ser devorados por otras especies, hasta la creación del lenguaje y la civilización, lo cual ha supuesto un desarrollo en las estructuras y conexiones neuronales y un aumento del tamaño del neocórtex humano a lo largo del tiempo, que permita procesar la información y responder a las demandas del contexto.

Se sabe que la corteza prefrontal media (CPM) y la ínsula son, como ya hemos dicho anteriormente, regiones importantes para el procesamiento de la información social y la empatía. La CPM se activa cuando una persona piensa en las creencias, deseos e intenciones de los demás, lo cual sugiere que esta región es importante para la empatía y la comprensión de los estados emocionales de los demás y por tanto, también estaría implicada en la teoría de la mente y la hipótesis del cerebro social.

Por otro lado, la ínsula se activa en respuesta a estímulos sociales y emocionales y se ha relacionado con la capacidad de sentir dolor como respuesta a la observación del dolor de los demás, por tanto, también estaría implicada en la empatía.

Como ya hemos explicado en puntos anteriores, las neuronas espejo se encuentran en varias regiones cerebrales, incluyendo la corteza prefrontal, la ínsula y el lóbulo parietal, lo cual nos aporta evidencia de que estas podrían estar relacionadas con todos estos procesos de socialización y por tanto con la hipótesis del cerebro social, la cual pone su foco de atención en las relaciones sociales.

7.ACTUALIDAD EN LA INVESTIGACIÓN DE LAS NEURONAS ESPEJO Y EL AUTISMO

Recientemente se han llevado a cabo diversas investigaciones sobre las neuronas espejo, realizándose algunos descubrimientos interesantes. Estos son algunos de los estudios que se han realizado:

Dreyer y Rieger (2021) utilizaron la magnetoencefalografía (MEG) para investigar los patrones de actividad cerebral en humanos durante la observación, retención y ejecución de movimientos de alcanzar y agarrar objetos. El objetivo principal fue examinar si los patrones de actividad gamma de las áreas motoras y de observación del cerebro están implicados en la observación y la comprensión de los movimientos de alcanzar y agarrar objetos. La actividad

gamma es una frecuencia de ondas cerebrales que están involucradas en procesos cognitivos como la atención, la memoria y la toma de decisiones. El experimento incluyó a 18 participantes sanos, a quienes se les presentó una tarea de observación, retención y ejecución. En la tarea de observación, se mostraron videos de una mano humana que alcanzaba y agarraba objetos, mientras que en la tarea de retención se les pidió que recordaran los movimientos que habían visto en los videos. En la tarea de ejecución, los participantes realizaron ellos mismos los movimientos que habían observado anteriormente. Durante estas tareas, se registró la actividad cerebral de los participantes utilizando MEG. Los resultados del estudio mostraron que los patrones de actividad gamma alta se producían en las áreas motoras del cerebro durante la observación, retención y ejecución de estos movimientos. Estos patrones se encontraron en áreas cerebrales específicas, incluidas la corteza premotora y la corteza parietal inferior y por tanto estos resultados son consistentes con la teoría de las neuronas espejo, que propone que el cerebro utiliza las mismas regiones para la observación y la ejecución de acciones motoras.

Otro estudio reciente es el de Kowallik et al., 2021, en el que querían investigar si la imitación facial es capaz de mejorar la capacidad de reconocer emociones en adultos con diferentes niveles de rasgos autistas. Este estudio involucró a 55 adultos con diferentes niveles de rasgos autistas medidos mediante el cuestionario AQ de Baron Cohen et al. 2001, los cuales fueron asignados al azar a un grupo experimental que imitó expresiones faciales o a un grupo de control que simplemente observó las expresiones faciales. Para la tarea, se mostraban diferentes expresiones emocionales y los participantes tenían que identificar las emociones que se mostraban en cada estímulo. Los resultados de este experimento mostraron que la imitación facial mejoró significativamente la capacidad de reconocer emociones en los sujetos con niveles más altos de rasgos autistas, sin embargo no hubo un efecto de mejora en los participantes con niveles bajos de rasgos autistas. Esto podría deberse a que las personas con puntuaciones AQ más altas tienen menos probabilidades de imitar espontáneamente sin instrucción previa, por lo que mostrarían mayor mejora en el reconocimiento de emociones de la imitación voluntaria a través de la cognición incorporada. Esto sugiere que a pesar de haber mejoras, estas podrían deberse a la mera instrucción de la imitación y no a la mejora real de la capacidad de identificar emociones.

Thompson et al., 2022 examinaron el papel de las regiones cerebrales asociadas a las neuronas espejo en la identificación de acciones e intenciones. Para realizar esto se mostraban imágenes de gestos a los participantes, acompañadas de palabras de intención o palabras de acción y además administraban estimulación magnética transcraneal. Los resultados

mostraron que las regiones cerebrales asociadas a las neuronas espejo, específicamente el área premotora ventral y la corteza parietal inferior, estaban más activas durante la identificación de acciones que durante la identificación de intenciones. Los autores señalan que esto podría tener implicaciones importantes para la comprensión de la cognición social y el comportamiento humano, ya que la identificación de las intenciones detrás de las acciones es un aspecto importante de la cognición social.

Por último, Trujillo et al., 2022 llevaron a cabo dos experimentos con un grupo de individuos autistas y otro grupo de individuos neurotípicos en el que medían la conectividad de la red de observación de la acción mediante resonancia magnética. Las diferencias en la conectividad de la red de observación de la acción (AON) se correlacionan con los síntomas del autismo y por tanto tiene relevancia en el funcionamiento social. Los sujetos debían visualizar unos vídeos en los que observaban gestos de la mano, por ejemplo pelar una banana, y pulsar un botón para seleccionar la respuesta correcta. Los resultados mostraron que, en comparación con las personas neurotípicas, las personas con autismo presentaban una menor conectividad en las regiones cerebrales asociadas con la percepción visual de gestos y la toma de decisiones, lo que sugiere una falta de comunicación efectiva entre ellas. En relación con las neuronas espejo, como ya hemos visto, se ha propuesto que estas neuronas desempeñan un papel clave en la percepción y comprensión de los gestos y movimientos de otras personas, y que las dificultades en su funcionamiento pueden estar relacionadas con las dificultades en la percepción social que se observan en personas con autismo, por lo tanto, este estudio sugiere que las diferencias en la organización funcional del cerebro durante la percepción de gestos en personas con autismo pueden estar relacionadas con el funcionamiento alterado de las neuronas espejo.

Estos solo son algunos ejemplos de las investigaciones que se han realizado en los últimos años a cerca de las neuronas espejo y el autismo y aunque en las últimas décadas se han realizado numerosas investigaciones, ya que es un tema de interés para la comunidad científica, aún falta mucha información por descubrir y que podría esclarecer la relación de esta red neuronal con este trastorno del neurodesarrollo.

8.CONCLUSIONES

La investigación de las neuronas espejo ha sido un tema de gran interés en la neurociencia en las últimas décadas. Además de su implicación en los procesos sociales y de aprendizaje, también se ha explorado su papel en la empatía, la imitación y la comprensión de la intención de otras personas, sin embargo, también existen perspectivas críticas sobre el

alcance y la relevancia de las neuronas espejo en la cognición y el comportamiento humano. Su descubrimiento e investigación han aportado mucha luz a aspectos que antes no conocíamos y para los cuales no teníamos explicación.

En cuanto al TEA, aunque se ha sugerido que las disfunciones en las neuronas espejo podrían ser una de las causas que provocan los déficits presentes en personas con autismo, sobre todo aquellos relacionados con la vida social y emocional, aunque sería inadecuado reducir a esto las causas del autismo y su sintomatología, debido a la gran variabilidad de los perfiles de las personas con TEA y a que la evidencia es todavía limitada y se requiere de más investigación para determinar su papel en este trastorno

En cuanto a los aspectos a tener en cuenta para futuras investigaciones, considero interesante llevar a cabo investigaciones longitudinales, ya que la mayoría de los estudios publicados se han realizado en un único momento en el tiempo y esto podría estar limitando la comprensión de cómo las neuronas espejo pueden cambiar a lo largo del tiempo y esto podría ayudar a entender como se desarrollan en personas con autismo y su evolución de los síntomas y desarrollo cognitivo.

Otro aspecto a tener en cuenta sería llevar a cabo estudios comparativos, ya que aunque la hipótesis de las neuronas espejo ha sido ampliamente estudiada y relacionada con el autismo, se sabe relativamente poco sobre cómo se comparan los patrones de actividad de las neuronas espejo en el autismo con los patrones de otros trastornos del neurodesarrollo y enfermedades psiquiátricas. Este tipo de estudios podrían ayudar a entender mejor cómo esta red de neuronas espejo se relaciona con otras afecciones neuropsiquiátricas.

9. BIBLIOGRAFÍA

- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders* (5th ed.).
- Baron-Cohen, S., Wheelwright, S., Skinner, R., Martin, J., & Clubley, E. (2001). The Autism-Spectrum Quotient (AQ): Evidence from Asperger Syndrome/High-Functioning Autism, Males and Females, Scientists and Mathematicians. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 31(1), 5-17.
- Cochin, S., Barthelemy, C., Roux, S., & Martineau, J. (1999). Observation and execution of movement: Similarities demonstrated by quantified electroencephalography. *European Journal of Neuroscience*, 11(5), 1839-1842. <https://doi.org/10.1046/j.1460-9568.1999.00598.x>
- Di Pellegrino, G. Fadiga, L. Fogassi, L. Gallese, V. Rizzolatti, G. (1992) Understanding motor events: a neurophysiological study. *Experimental Brain Research* 91: 176-180 <https://doi.org/10.1007/BF00230027>
- Dreyer, A. M., & Rieger, J. W. (2021). High-gamma mirror activity patterns in the human brain during reach-to-grasp movement observation, retention, and execution-An MEG study. *Plos one*, 16(12), e0260304. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260304>
- Dunbar, R. I. M. (2014). What's so social about the social brain? In J. Decety, & Y. Christen (Eds.), *New frontiers in social neuroscience*; (pp. 1-10, 219 Pages). Springer International Publishing/ Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02904-7_1
- Gallese, V., Gernsbacher, M. A., Heyes, C., Hickok, G., & Iacoboni, M. (2011). Mirror Neuron Forum. *Perspectives on Psychological Science*, 6(4), 369-407. <https://doi.org/10.1177/1745691611413392>
- Gallese, V., & Lakoff, G. (2005). The Brain's concepts: the role of the Sensory-motor system in conceptual knowledge. *Cognitive neuropsychology*, 22(3-4), 455-479. <https://doi.org/10.1080/02643290442000310>

- Happé, F. (1994). Introducción al autismo. *Alianza editorial*
- Harrison, P., & Oakland, T. (2013). ABAS-II: Sistema de Evaluación de la Conducta Adaptativa - 2. Manual (Segunda edición). *Madrid: TEA Ediciones.*
- Iacoboni, M. Woods, R. P. Brass, M. Beckkering, H. Mazziotta J. C. et al. (1999). Cortical mechanisms of human imitation. *Science* 286: 2526-2528. <https://doi.org/10.1126/science.286.5449.2526>
- Iacoboni M, Dapretto M. (2006)The mirror neuron system and the consequences of its dysfunction. *Nat Rev Neurosci.*;7(12):942-51 <https://doi.org/10.1038/nrn2024>
- Iacoboni, M. (2009). Imitation, empathy, and mirror neurons. *Annual Review of Psychology*, 60, 653-670. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.60.110707.163604>
- Kilner, J. M., Neal, A., Weiskopf, N., Friston, K. J., & Frith, C. D. (2009). Evidence of mirror neurons in human inferior frontal gyrus. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 29(32), 10153–10159. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2668-09.2009>
- Kowallik, A. E., Pohl, M., & Schweinberger, S. R. (2021). Facial Imitation Improves Emotion Recognition in Adults with Different Levels of Sub-Clinical Autistic Traits. *Journal of Intelligence*, 9(1), 4. <https://doi.org/10.3390/jintelligence9010004>
- Lord, C., Rutter, M., DiLavore, P. C., Risi, S., Gotham, K. y Bishop, S. L. (2015). ADOS-2 . Escala de Observación para el Diagnóstico del Autismo - 2 . Manual (Parte I): Módulos 1-4. *Madrid: TEA Ediciones.*
- Meltzoff, A. N., & Moore, M. K. (1997). Explaining facial imitation: A theoretical model. *Early Development and Parenting*, 6(4), 179-192. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0917\(199709/12\)6:3/4<179::AID-EDP157>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0917(199709/12)6:3/4<179::AID-EDP157>3.0.CO;2-R)

- Muthukumaraswamy, S. D. (2013). High-frequency brain activity and muscle artifacts in MEG/EEG: A review and recommendations. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 138. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00138>
- Mukamel R., Ekstrom A. D., Kaplan J., Iacoboni M., Fried I. (2010). Single neuron responses in humans during execution and observation of actions. *Current Biology*, 20, 750–756. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.02.045>
- National Institute of Mental Health. (2018). Autism spectrum disorder. Recuperado de <https://www.nimh.nih.gov/health/topics/autism-spectrum-disorders-asd/index.shtml>
- Oberman LM, Hubbard EM, McCleery JP, Altschuler EL, Ramachandran VS, Pineda JA.(2005) EEG evidence for mirror neuron dysfunction in autism spectrum disorders. *Brain Res Cogn Brain Res*; 24: 190-8. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.01.014>
- Oberman, L. M. y Ramachandran V. S. (2007). The simulating social mind: the role of the mirror neuron system and simulation in the social and communicative deficits of autism spectrum disorders. *Psychological Bulletin*, 133, 310-327. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.133.2.310>
- Oberman, L. M., Ramachandran, V. S., & Pineda, J. A. (2008). Modulation of mu suppression in children with autism spectrum disorders in response to familiar or unfamiliar stimuli: the mirror neuron hypothesis. *Neuropsychologia*, 46(5), 1558-1565. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.01.010>
- Oberman, L. M., Enticott, P. G., Casanova, M. F., Rotenberg, A., Pascual-Leone, A., McCracken, J. T., & TMS in ASD Consensus Group (2016). Transcranial magnetic stimulation in autism spectrum disorder: Challenges, promise, and roadmap for future research. *Autism research : official journal of the International Society for Autism Research*, 9(2), 184–203. <https://doi.org/10.1002/aur.1567>

- Palau-Baduell M, Valls-Santasusana A, Salvadó-Salvadó B.(2011) Trastornos del espectro autista y ritmo mu. Una nueva perspectiva neurofisiológica. *Rev Neurol*; 52 (Supl 1): S141-6.
- Powell, J. L., Lewis, P. A., Dunbar, R. I., García-Fiñana, M., & Roberts, N. (2010). Orbital prefrontal cortex volume correlates with social cognitive competence. *Neuropsychologia*, 48(12), 3554–3562. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.08.004>
- Powell, J., Lewis, P. A., Roberts, N., García-Fiñana, M., & Dunbar, R. I. (2012). Orbital prefrontal cortex volume predicts social network size: an imaging study of individual differences in humans. *Proceedings. Biological sciences*, 279(1736), 2157–2162. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.2574>
- Premack, D., & Woodruff, G. (1978). Does the chimpanzee have a theory of mind? *Behavioral and Brain Sciences*, 4(4), 515-526.
- Pulvermüller, F. (2005). Brain mechanisms linking language and action. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(7), 576-582. <https://doi.org/10.1038/nrn1706>
- Pfurtscheller, G.,Lopez da Silva, F.H (1999) Event related EEG/MEG synchronization and desynchronization: Basic principles. *Clinical Neurophysiology* 110(11), 1842-1857 [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(99\)00141-8](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(99)00141-8)
- Ramachandran, V. S. y Oberman, L. M. (2006) Broken mirrors: a theory of autism. *Scientific American*, 295, 39-45. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican1106-62>
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). THE MIRROR-NEURON SYSTEM. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 169-192. <http://www.ujaeen.debiblio.com/login?&url=https://www.proquest.com/scholarly-journals/mirror-neuron-system/docview/198832146/se-2>
- Rizzolatti, G., & Fabbri-Destro, M. (2009). The mirror neuron system. In G. G. Berntson, & J. T. Cacioppo (Eds.), *Handbook of neuroscience for the behavioral sciences, Vol 1*;

Handbook of neuroscience for the behavioral sciences, Vol 1 (pp. 337-357, Chapter xvi, 613 Pages). John Wiley & Sons Inc.
<https://doi.org/10.1002/9780470478509.neubb001017>

Southgate, V., Johnson, M. H., Osborne, T., & Csibra, G. (2009). Predictive motor activation during action observation in human infants. *Biology Letters*, 5(6), 769-772.
<https://doi.org/10.1098/rsbl.2009.0474>

Thompson, E. L., Bird, G., & Catmur, C. (2022). Mirror neuron brain regions contribute to identifying actions, but not intentions. *Human brain mapping*, 43(16), 4901–4913.
<https://doi.org/10.1002/hbm.26036>

Trujillo, J. P., Özyürek, A., Kan, C. C., Sheftel-Simanova, I., & Bekkering, H. (2022). Differences in functional brain organization during gesture recognition between autistic and neurotypical individuals. *Social cognitive and affective neuroscience*, 17(11), 1021–1034. <https://doi.org/10.1093/scan/nsac026>

Wellman, H. M., & Cross, D. (1985). From talking about a rock to thinking about a mind. *Cognitive Development*, 1(1), 67-97. [https://doi.org/10.1016/S0885-2014\(85\)80024-9](https://doi.org/10.1016/S0885-2014(85)80024-9)

Wellman, H. M., Cross, D., & Watson, J. (2001). Meta-analysis of theory-of-mind development: The truth about false belief. *Child Development*, 72(3), 655-684.

Werner J.M., Cermak S.A., Aziz-Zadeh L. (2012) Neural Correlates of Developmental Coordination Disorder: The Mirror Neuron System Hypothesis. *Journal of Behavioral and Brain Science*, 2:258–268 <https://doi.org/10.4236/jbbs.2012.22029>