



Revisión

Psicobiología de las altas capacidades intelectuales. Una revisión actualizada

M. Isabel Gómez-León

Departamento de Psicobiología, Universidad Internacional de La Rioja, Logroño, La Rioja, España



INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 2 de junio de 2019

Aceptado el 18 de septiembre de 2019

Palabras clave:

Altas capacidades
Inteligencia
Desarrollo
Cerebro
Genética
Psicobiología

R E S U M E N

Las personas con altas capacidades intelectuales están dotadas de un sistema cognitivo más eficiente, capaz de lograr objetivos con menos recursos. El desarrollo adecuado de este potencial es un determinante importante para la salud y el bienestar social y personal. El objetivo de este trabajo es recopilar y sintetizar los últimos hallazgos sobre los mecanismos neurobiológicos subyacentes. Los estudios de asociaciones genéticas han identificado genes y loci genéticos que generan propiedades celulares asociadas con la inteligencia. La aparición de la transcriptómica y la neurociencia celular proporcionan datos sobre el desarrollo diferencial de las células cerebrales asociadas con la alta capacidad. Los estudios de imágenes cerebrales aportan una visión macroscópica, estructural y funcional, de las áreas involucradas en la manifestación de la inteligencia. Los modelos neurocomputacionales del desarrollo cognitivo intentan explicar las trayectorias del desarrollo en función de la poligenicidad y las variaciones en el nivel de estimulación ambiental.

© 2019 Elsevier España, S.L.U. y Sociedad Española de Psiquiatría y Sociedad Española de Psiquiatría Biológica. Todos los derechos reservados.

Psychobiology of giftedness. An updated review

A B S T R A C T

Gifted people are endowed with a more efficient cognitive system, and capable of achieving objectives with fewer resources. The proper development of this potential is an important determinant for health and social and personal well-being. The aim of this work is to collect and analyse the latest findings on the underlying neurobiological mechanisms. Studies of genetic associations have identified genes and genetic loci that generate cellular properties associated with intelligence. The appearance of transcriptomics and cellular neuroscience provide data on the differential development of brain cells associated with giftedness. Brain imaging studies provide us with a macroscopic, structural, and functional vision of the areas involved in intelligence. The neuro-computational models of cognitive development try to explain the trajectories of development in terms of polygenicity and variations in the level of environmental stimulation.

© 2019 Elsevier España, S.L.U. and Sociedad Española de Psiquiatría y Sociedad Española de Psiquiatría Biológica. All rights reserved.

Keywords:

Giftedness
Intelligence
Development
Brain
Genetic
Psychobiology

Introducción

La inteligencia se puede definir como la habilidad mental general para razonar, resolver problemas y aprender¹. El término de alta capacidad (AC) hace referencia a las personas que son potencialmente más eficientes que otras para adquirir dicha habilidad².

Muchas de las observaciones empíricas, hasta la fecha, relacionan las diferencias individuales en la capacidad cognitiva con las variaciones en la estructura y la función del cerebro^{1,3,4}. El objetivo de este trabajo es intentar describir los fundamentos biológicos que subyacen a estas diferencias y, en concreto, a la alta capacidad intelectual.

La inteligencia es un rasgo altamente poligénico, de tal manera que la influencia genética en la capacidad cognitiva parece involucrar a muchos genes, cada uno de los cuales contribuye con pequeños efectos⁵. Los estudios de asociación de genoma com-

Correo electrónico: mabelgomezleon@gmail.com

<https://doi.org/10.1016/j.psiq.2019.09.001>

1134-5934/© 2019 Elsevier España, S.L.U. y Sociedad Española de Psiquiatría y Sociedad Española de Psiquiatría Biológica. Todos los derechos reservados.

pleto (GWAS), que analizan las asociaciones entre fenotipos y variantes genéticas (polimorfismos de un solo nucleótido o SNP), muestran que el 98% de las variantes genéticas asociadas a la inteligencia corresponden a ADN no codificante en proteínas que probablemente tienen la función de regular la expresión genética en diferentes etapas del desarrollo neural⁵. Sin embargo, el pequeño porcentaje de genes que producen o codifican proteínas funcionales están implicados en diversas funciones neuronales, incluida la función sináptica y la plasticidad, las interacciones celulares y el metabolismo energético⁵⁻⁸.

Estos pequeños efectos genéticos en las etapas críticas del desarrollo pueden tener grandes consecuencias en la función cerebral y el desarrollo y, por lo tanto, en la capacidad cognitiva.

Método

Se utilizaron las bases de datos Scopus, Pubmed y Google Scholar para la búsqueda automatizada de la bibliografía. Las palabras clave empleadas fueron, fundamentalmente, «*gifted*», «*intelligence*», «*brain*» y «*developmental*». Se incluyeron los ensayos clínicos y las revisiones bibliográficas publicados en los últimos 5 años que cumplieran con los objetivos de este trabajo sin restricción de idioma. Una vez revisados exhaustivamente los artículos se realizaron búsquedas indirectas a través de los autores más citados o de aquellos que presentasen datos relevantes o novedosos para la elaboración del trabajo. Los artículos centrados en regiones subcorticales o los que no relacionaran directamente aspectos cognitivos con aspectos neurobiológicos fueron excluidos.

Resultados

Genética e inteligencia

Existen genes y vías biológicas que son principalmente activas durante las distintas etapas del desarrollo cerebral prenatal.

Tabla 1
Genes asociados con el rendimiento académico y la inteligencia

Función durante el desarrollo	Gen	Función específica
Proliferación celular y mitosis ^{3,8}	GNL3 NCAPG DDX27	Proliferación de células madre Estabiliza los cromosomas durante la mitosis Altera la estructura secundaria del ARN y participa en la embriogénesis, el crecimiento celular y la división Actividad de cofactor de transcripción
Neurodesarrollo y regulación de la expresión génica ^{3,7}	ZNF446, MZF1, ZNF1, ZNF638, RNF123 RBFox y CELF4	Producen productos que contienen dominios que interactúan con el ADN y el ARN
Comunicación de célula a célula y de célula a matriz ^{3,4,7,11}	ITIH3 LAMB2 PCDHA1 a PCDHA7, CDHR4 ADAM12 DCC, SEMA3F, <i>CELSR3</i>	Codifica una proteína que estabiliza la matriz extracelular Codifica la laminina, componente importante de las membranas basales Involucrados en la adhesión celular Proteína anclada a la membrana que participa en las interacciones célula-célula y célula-matriz Codifican moléculas de adhesión celular, guiando a los axones durante el desarrollo neuronal
Embriogénesis, proliferación celular, migración y comunicación sináptica ^{1,7}	DMXL2, SPPL2C, RNF43, WNT4	Regulación de diferentes vías de señalización a través de receptores de superficie
Función sináptica, plasticidad y excitabilidad neuronal ^{3,7,10,11}	TSNARE1, GBF1, BSN CREB3L4 CACNA1I MAPT, POU3F2 DAG1 CELSR3 SEMA3F	Organización del citoesqueleto presináptico y liberación y tráfico vesicular Regulación de la plasticidad sináptica, el aprendizaje y la formación de la memoria Regulación del complejo de canales de calcio dependientes de voltaje Morfogénesis y desarrollo dendrítico Señalización GABAérgica en las interneuronas del hipocampo Formación adulta de sinapsis glutamatérgica del hipocampo Regulador negativo del desarrollo de la espina dendrítica en el hipocampo adulto
Regulación mitocondrial, suministro de energía y metabolismo ^{3,7}	BCL11A GPD2, NDUFS3, MTCH2 BTN2A1 y BTN1A1 GPT	Organización de la columna dendrítica Mantenimiento de los disparos de alta frecuencia durante las tareas cognitivas Metabolismo de los lípidos Metabolismo de la glucosa y los aminoácidos
Codificadores de proteínas asociadas a microtúbulos ^{1,7}	MAPT, MAST3, ALMS1, SAXO2, ACTR1A	Mantenimiento de la estructura celular, transporte intracelular, reciclaje de receptores sinápticos y liberación de neurotransmisores

Algunos genes con mutaciones conocidas de gran efecto en la enfermedad mental muestran efectos reguladores más pequeños en la cognición, lo que indica curvas de dosis-respuesta que ocurren naturalmente con respecto a la función del gen⁶. Las funciones principales de los SNP identificados son la neurogénesis, la migración, la diferenciación neuronal, la regulación de la expresión genética y la comunicación sináptica a lo largo del desarrollo, siendo las interacciones de las células con su entorno directo una función fundamental tanto en el desarrollo neurológico como en la función sináptica.

La función cerebral se basa en procesos altamente dinámicos dependientes de la actividad, y muchos de los genes identificados que desempeñan un papel en el desarrollo neurológico podrían contribuir a la función sináptica y a la plasticidad neuronal, activando y desactivando estos procesos. Estos genes pueden conducir a cambios estructurales y funcionales profundos e implican la formación de nuevas sinapsis y la eliminación de otras, cambios en el citoesqueleto, movilidad de receptores y metabolismo energético (tabla 1), por lo que la capacidad cognitiva puede depender de cómo las neuronas eficientes pueden regular estos procesos a lo largo de todo el ciclo vital.

Aunque los loci cerebrales involucrados en la inteligencia están ampliamente distribuidos, se ha encontrado que los genes asociados con el rendimiento académico y la inteligencia se expresan preferentemente juntos en el tejido nervioso^{4,9}. Específicamente las regiones del hipocampo, del cerebro medio, la corteza cerebral en general y el córtex frontal muestran el mayor enriquecimiento de la expresión de estos genes^{5,6}. Con la excepción del cerebro medio, los estudios de imágenes cerebrales han señalado que estas regiones cerebrales están fuertemente implicadas en la inteligencia.

Neuronas piramidales e inteligencia

Las neuronas piramidales son los tipos neuronales más abundantes en el neocórtex y en el hipocampo, estructuras asociadas

con funciones ejecutivas superiores como la toma de decisiones, la resolución de problemas y la memoria. Dado su vasto número en el neocórtex humano, incluso el menor cambio en la eficiencia de la transferencia de información por parte de estas neuronas puede traducirse en grandes diferencias en la capacidad mental. Aunque no se ha probado cómo la actividad y la estructura dendrítica de neuronas individuales afecta a la inteligencia humana, los estudios genéticos indican que la expresión de genes asociados con la inteligencia se acumula en las neuronas piramidales corticales^{5,6}, en concreto en las áreas de asociación de orden superior relacionadas con la inteligencia según estudios de imágenes cerebrales^{1,9}.

Dentro de la corteza humana existe un gradiente de complejidad dendrítica en las áreas corticales. Las áreas de asociación de orden superior que almacenan y procesan información más compleja contienen neuronas con dendritas más grandes y complejas en comparación con las áreas sensoriales primarias. Al mismo tiempo, la densidad del cuerpo celular neuronal es menor en las áreas de asociación cortical en comparación con las áreas sensoriales primarias. Las células piramidales, especialmente en capas superficiales de áreas de integración multimodal, como la corteza temporal o frontal, son integradoras principales y acumuladoras de información sináptica. Las dendritas más grandes pueden contener físicamente más contactos sinápticos y procesar e integrar más información, por lo que las regiones involucradas en el procesamiento cortical de orden superior tienen células piramidales de mayor complejidad. La conectividad corticocortical de todo el cerebro se correlaciona positivamente con el tamaño de las dendritas de células piramidales¹⁰. Estas neuronas y sus conexiones forman los bloques de construcción principales para la codificación, el procesamiento y el almacenamiento de información en el cerebro y dan lugar a la cognición.

Estudios recientes han asociado la densidad dendrítica cortical con la inteligencia; en concreto, se ha encontrado una correlación negativa entre las puntuaciones obtenidas en pruebas cognitivas y la densidad de neuritas en la región parietofrontal¹¹. A medida que disminuye la densidad de las neuritas aumenta la longitud dendrítica, por lo que los circuitos neuronales asociados con una inteligencia superior parecen estar organizados de una manera más dispersa y eficiente debido a un mayor número de neuronas de menor densidad con dendritas de mayor tamaño. Estas dendritas más grandes equiparían a las células con muchas ventajas computacionales, como un aumento en la eficacia y la modulación de la propagación sináptica, necesarias para la integración rápida y eficiente de grandes cantidades de información.

Al parecer, los sujetos con un alto cociente intelectual (CI) también presentan neuronas piramidales de dendritas más grandes y complejas en la corteza temporal¹². Es más, estas neuronas muestran potenciales de acción más rápidos durante la actividad neuronal, una mayor precisión temporal en el procesamiento de las entradas sinápticas y una mayor eficacia y velocidad en la transmisión de la información¹⁰. Las células piramidales de estos individuos están siendo constantemente bombardeadas por una gran carga de señales entrantes durante la actividad cognitiva; sin embargo, el alargamiento de sus terminales dendríticos basales permitiría lograr una mayor resolución de integración sináptica funcionando como subunidades semiindependientes y procesando múltiples entradas por separado y simultáneamente^{10,11}, de tal manera que podrían traducir las entradas sinápticas en señal de salida de una manera mucho más eficiente, permitiendo transferir más información y manteniendo un disparo de potencial de acción más rápido que los sujetos con un CI más bajo¹².

Es importante señalar que las diferencias individuales en el desarrollo dendrítico de las células piramidales están sujetas a control genético, van acompañadas de adaptaciones funcionales en estas células y subyacen a la variabilidad humana en la inteligencia. Los estudios genéticos de la inteligencia han hallado genes

fuertemente implicados en la estructura dendrítica asociada a la capacidad cognitiva humana, la morfología de la corteza cerebral y específicamente las dendritas y la organización de la columna dendrítica¹³.

Desarrollo neuronal e inteligencia

La estructura y la función de los circuitos neuronales cambian y evolucionan constantemente a partir del momento del primer contacto entre las células nerviosas. La interacción de programas genéticos inherentes con una amplia gama de exposiciones y experiencias ambientales determina el nacimiento, la muerte y las características celulares de las neuronas, así como la formación y la reforma de sus axones, dendritas y sinapsis². En la vida posnatal temprana, los factores genéticos innatos, junto con los estímulos ambientales y conductuales, actúan sobre un sustrato cerebral aún inmaduro que estimula el desarrollo adicional de los circuitos neuronales. Con el tiempo, la experiencia tiene una función cada vez más prominente en la configuración de los circuitos neuronales. Las conexiones corticales locales aparecen antes que las más distantes. Posteriormente, las conexiones locales dentro de los circuitos corticales se afinan y las conexiones complejas, de mayor alcance entre los circuitos, forman una red neuronal cada vez más unificada y organizada funcionalmente. El rendimiento cognitivo está asociado con las áreas de asociación multimodal, áreas donde la información de diferentes partes del cerebro converge para el procesamiento de alto nivel¹⁴.

Diferentes estudios^{15,16} han puesto de manifiesto esta expresión dinámica neuroanatómica de la inteligencia, sugiriendo que la trayectoria de cambio en el grosor de la corteza cerebral durante el desarrollo está más estrechamente relacionada con el nivel de inteligencia que con el volumen cortical en sí.

Durante el desarrollo posnatal normal las áreas corticales siguen un patrón similar: las dendritas muestran un crecimiento continuo que se acompaña de un aumento del volumen cortical y una menor densidad neuronal. Además, las áreas corticales frontales, que están más determinadas por la edad y la experiencia, muestran un curso de cambio más lento que otras regiones de la corteza. Este aumento inicial en edades más tempranas es seguido por un adelgazamiento sostenido alrededor de la pubertad. Se cree que este cambio en el desarrollo es el resultado de la sobreproducción de sinapsis en la primera infancia y el aumento de la poda sináptica en la adolescencia y la edad adulta temprana. Los avances recientes en las técnicas de neuroimagen han hecho posible la cuantificación de la conectividad en poblaciones pediátricas, mostrando que esta conectividad se caracteriza por una dinámica única y espacialmente heterogénea desde la infancia hasta la edad adulta, con un patrón de maduración característico en el que la fuerza de las conexiones a corta distancia dentro de las regiones primarias se debilita y la de las conexiones que recorren largas distancias, uniendo áreas de orden superior, tiende a aumentar¹⁶.

Este patrón de maduración cortical se desarrolla de manera diferente en niños con un alto CI¹⁵. Hacia los 8 años la corteza de estos es menos densa que la de sus iguales con un CI medio, lo que indica un circuito neuronal más selectivo y eficiente con un menor número de conexiones poco funcionales y un fortalecimiento de las más utilizadas. A esta edad el grosor cortical de las principales áreas de asociación, como el lóbulo frontal, el temporal y el parietal, se correlaciona negativamente con la especialización funcional y la mejora de las funciones ejecutivas. Mientras que en un niño con inteligencia media el grosor cortical alcanza su máximo a los 5-6 años, en un niño con altas capacidades (AC) la superficie cortical y la mielización de las fibras que conectan regiones distantes aumenta progresivamente y a un mayor ritmo hasta los 12-13 años, especialmente en el lóbulo prefrontal, de tal manera que en la adolescencia temprana estos muestran un mayor grosor cortical junto con un

mayor número de recursos neuronales que aquellos. A partir de este momento el proceso de poda o selección sináptica es más rápido e intenso en estos niños, con lo cual los volúmenes de materia gris cortical comienzan a disminuir espectacularmente, al tiempo que se observa un crecimiento local que se cree que representa un aumento en los volúmenes de materia blanca en gran parte de la corteza prefrontal, la corteza cingulada anterior rostral, la corteza parietal posterior y los polos temporales, así como en los volúmenes de materia gris del lóbulo temporal medial, como la amígdala y el hipocampo¹⁶.

Juntas, tanto la poda como la mielinización refinan la conectividad dentro de las redes locales y distribuidas y mejoran la eficiencia y la fidelidad de la transmisión de la señal. A lo largo del desarrollo la monitorización de conflictos involucra la corteza cingulada anterior, la regulación de la atención involucra la corteza prefrontal dorsolateral y la corteza parietal, la supresión de la interferencia involucra la corteza prefrontal ventrolateral, y la inhibición de la respuesta involucra regiones parietales. En las tareas de control cognitivo la activación parietal continúa aumentando en la adolescencia, mientras que la activación prefrontal continúa aumentando en la edad adulta, por lo que una maduración precoz de estas áreas, y en particular de los lóbulos frontales, implica una mielinización y una complejidad mayor en las redes neuronales que puede estar facilitando la atención selectiva¹⁷, un mayor uso de estrategias cognitivas de orden superior¹⁸, una memoria de trabajo más eficaz¹⁹, una mayor flexibilización, planificación/resolución de las tareas y, en definitiva, un rendimiento ejecutivo mayor y un alto grado de pensamiento abstracto y divergente²⁰.

Materia gris e inteligencia

Aunque el volumen cerebral total representa aproximadamente el 16% de la varianza en las puntuaciones de inteligencia general, los datos de resonancia magnética aportan datos interesantes sobre las asociaciones entre la estructura cortical y la inteligencia. Cuando se estudian las diferencias estructurales y funcionales a lo largo del desarrollo (entre los 6 y los 18 años) se ha hallado que el CI, en todas las edades estudiadas, está asociado con el grosor cortical de las áreas de asociación multimodal: el precuneus (parte del lóbulo parietal medial), el cingulado posterior, la corteza prefrontal dorsomedial, así como los giros linguales y parahipocampales, bilateralmente¹⁴.

En los niños con AC las tasas de cambios en el grosor cortical de las regiones que sustentan las funciones cognitivas de orden superior se correlacionan con la maduración de funciones cognitivas como la atención, la memoria de trabajo, el control cognitivo y la inhibición de la respuesta^{15,21}.

Sin embargo, los estudios de neuroimagen funcional y estructural muestran que la inteligencia general no puede atribuirse a una región específica. Más bien, la inteligencia está respaldada por una red distribuida de regiones cerebrales en las cortezas de asociación de orden superior, también conocida como la red parietofrontal²². Esta red incluye un gran número de regiones: la corteza prefrontal dorsolateral, el lóbulo parietal y el cingulado anterior, múltiples regiones dentro de los lóbulos temporal y occipital y, por último, los tractos principales de la materia blanca. Las regiones cerebrales dentro de esta red comparten un alto grado, fuerza y centralidad de intermediación, y constituyen centros de integración que conectan todos los módulos estructurales principales. Este núcleo estructural contiene regiones cerebrales que forman los componentes posteriores de la red predeterminada, un conjunto de regiones que se activa cuando el sujeto está en reposo y que está relacionado con las «ensoñaciones» o la visualización de sí mismo en el pasado y el futuro. La centralidad espacial y la participación activa de este

núcleo dentro de la corteza sugieren un papel importante en la integración funcional²³.

Materia blanca e inteligencia

Las diferencias en el funcionamiento cognitivo son debidas tanto a las diferencias halladas en el volumen o la densidad de la materia gris como en las encontradas en la materia blanca¹. El cerebro está formado por redes neuronales distribuidas que conectan diferentes regiones y las integran en redes funcionales amplias. Los volúmenes o densidades de materia gris y de materia blanca muestran correlaciones globales y locales con el cociente intelectual^{24,25}.

Se considera que la cantidad de materia gris refleja el número y la densidad de los cuerpos neuronales y la arborización dendrítica, mientras que la cantidad de materia blanca captura el número y el espesor de los axones y su grado de mielinización. La materia gris podría respaldar la capacidad de procesamiento de información, mientras que la materia blanca podría respaldar el flujo eficiente de información en el cerebro, siendo la responsable de la interconexión y la velocidad del procesamiento y participando en características funcionales y estructurales básicas de la inteligencia. Los datos disponibles son consistentes con la afirmación de que los volúmenes de materia gris y blanca están relacionados positivamente con la inteligencia, pero que la última relación es algo mayor¹⁸.

La integridad de la materia blanca es mejor en los niños con AC, por lo que el sustrato neuronal de la alta inteligencia está relacionado con una alta densidad de fibra y unas redes cerebrales distribuidas de manera óptima y homogénea. Este aumento de la densidad axonal en los principales paquetes de fibras, como el cuerpo calloso²⁶, y la mayor conexión intra e interhemisférica están asociados con una menor modularidad y una mayor fluidez y flexibilidad cognitiva²⁷, lo que les permite resolver con mayor éxito situaciones ambiguas y novedosas²⁰.

Se ha sugerido una posible relación entre esta distribución intra e interhemisférica de sustancia blanca y el perfil de inteligencia de los niños con AC²⁶. La lateralización hemisférica izquierda de los niños con un CI heterogéneo es concordante con su índice verbal superior, lo que puede reflejar una mayor actividad independiente y autoconectada. En contraste, la organización hemisférica bilateral y derecha más distribuida de los niños con un CI homogéneo es coherente con sus capacidades globales de exploración, procesamiento y adaptación al entorno²⁶.

La alta sensibilidad de las técnicas de imágenes con tensor de difusión ha permitido identificar esta asociación entre la microestructura de la materia blanca y el cociente intelectual desde la infancia hasta la edad adulta. Además, los factores genéticos parecen mediar esta correlación, lo que sugiere un mecanismo fisiológico común y una determinación genética común²⁸ (tabla 2).

Activación funcional de áreas corticales asociadas con la inteligencia

La mayor parte de los estudios de neuroimagen estructural y funcional han mostrado la relevancia de la red frontoparietal tanto para la inteligencia como para las funciones cognitivas relacionadas con la percepción, con el almacenamiento de memoria a corto plazo y con el lenguaje^{1,22}. Esto ha dado lugar a la propuesta de la teoría de la integración parietofrontal (P-FIT)²². De acuerdo con esta teoría, la información sensorial se procesa primero en áreas temporales y occipitales para su posterior integración y abstracción en áreas parietales. La evaluación del problema se implementa luego en la corteza prefrontal y la selección de la respuesta está mediada a través del cingulado anterior.

La naturaleza distribuida de la red frontoparietal y su participación en una amplia gama de funciones cognitivas encaja bien con la naturaleza integradora de la inteligencia. En conjunto, las

Tabla 2
Correlaciones positivas halladas entre la integridad de sustancia blanca y las funciones cognitivas

Área	Función cognitiva
Cuerpo caloso posterior ³⁶ Fórcex menor y el esplenio ³⁶	CI a partir de la adolescencia Razonamiento fluido, memoria de trabajo visuoespacial y capacidades creativas Transferencia de alto nivel de información semántica Cociente de inteligencia
Genu y esplenio del cuerpo caloso ²⁶ Esplenio del cuerpo caloso, fascículos longitudinales inferiores y arqueados izquierdos, regiones parietales derechas y lóbulos frontales ³⁶ Fórnix ²⁶	Memoria episódica Funciones perceptivas, motoras y otras funciones cognitivas
Fibras de proyección de la cápsula y la corona radiata (fibras ascendentes desde el tálamo y las fibras descendentes desde la corteza frontoparietal hasta los núcleos subcorticales) ²⁶ Tractos que conectan los lóbulos frontales con los ganglios basales y las regiones parietales ³⁶	Habilidades para las matemáticas, habilidades visuoespaciales y pensamiento creativo Habilidades numéricas y matemáticas
El fascículo longitudinal superior, el segmento posterior del cuerpo caloso, el fascículo longitudinal inferior, la corona radiata y el tracto corticoespinal ²⁶ Fascículo uncinado ²⁶ Fascículo uncinado derecho ²² Fascículo longitudinal superior ²⁶	Habilidades semánticas CI y capacidades visuoespaciales Funciones ejecutivas cognitivas de alto orden, como la atención, la inhibición y la memoria y el lenguaje Inteligencia general e inteligencia no verbal
El cíngulo, las radiaciones ópticas, el fascículo frontooccipital superior, la cápsula interna, el istmo del cuerpo caloso y la corona radiata ²⁶ Conectividad entre la corteza orbitofrontal medial y la corteza cingulada anterior rostral ³¹	Cociente intelectual, planificación, autocontrol y regulación de respuesta
Microestructura de la materia blanca (6 a 10 años de edad) ⁹ Integridad de la materia blanca del hemisferio izquierdo (8 a 12 años) ²⁷ Incremento global de conectividad inter e intrahemisférica, modularidad y transitividad media entre la corteza frontal, parietal y temporal (8 a 12 años) ²⁷ Alta integración, densidad, en el lóbulo occipital y redes de núcleos subcorticales ²⁷ Eficiencia del conectoma de la materia blanca ¹⁸ Mayor integridad global de sustancia blanca ¹⁸	Inteligencia no verbal y capacidad visuoespacial Habilidades verbales Inteligencia fluida y habilidades de clasificación y visuoespaciales
Sustancia blanca en áreas temporales, parietales y frontales ²⁴ Integridad de la sustancia blanca del lóbulo frontal izquierdo ²⁴ Integridad de la sustancia blanca bilateral y frontal ²⁴	Inteligencia cristalizada Inteligencia y rendimiento académico Velocidad de procesamiento de información Memoria de trabajo Memoria de trabajo verbal Memoria de trabajo y funciones ejecutivas, como la fluidez, la inhibición y la flexibilidad mental

áreas frontales y parietales están relacionadas con la inteligencia fluida; los lóbulos temporales, con la inteligencia cristalizada, y la integridad de la materia blanca, con la velocidad de procesamiento.

Se pueden distinguir dos tipos de inteligencia: cristalizada y fluida²⁴. La inteligencia cristalizada está formada por vías que codifican el conocimiento previo y la experiencia; este tipo de inteligencia implica conexiones robustas realizadas a lo largo del tiempo y depende en gran parte de la estructura cortical y del grosor cortical en las áreas laterales de los lóbulos temporales y el polo temporal^{11,24}. La inteligencia fluida, por el contrario, hace referencia a las habilidades adaptativas de resolución de problemas y razonamiento, son bastante flexibles e implica vías y conexiones más débiles y transitorias que se forman cuando el cerebro aborda problemas únicos o inusuales. Múltiples estudios señalan que la inteligencia fluida se basa en una función más eficiente de las áreas corticales distribuidas¹¹. En particular, la corteza frontal lateral, con su papel bien establecido en el razonamiento, la atención y la memoria de trabajo, parece apoyar la inteligencia fluida, pero también está implicado el lóbulo parietal. Cuando los sujetos con AC y altas puntuaciones en inteligencia fluida realizan tareas desafiantes, verbales y no verbales, de memoria de trabajo, son más precisos y selectivos y muestran una mayor actividad neuronal relacionada con las demandas de la tarea en las regiones parietales²⁹ y una menor activación frontal que los sujetos sin AC. La activación frontal se relaciona con una actividad cognitiva más controlada (es decir, con mayor esfuerzo y consumo de energía) que se produce principalmente en los límites de la capacidad del sistema, como es en el caso de la memoria de trabajo. La activación posterior está relacionada con un procesamiento perceptivo más automático por debajo de los límites de capacidad, lo que sugiere que las personas con AC hacen un mayor uso de sus recursos neuronales automáticos antes de la activación frontal controlada que los sujetos sin AC, quienes muestran una mayor activación frontal y, por lo tanto, un mayor esfuerzo y consumo metabólico^{17,30}.

Algunos autores¹⁷ han señalado que las medidas de razonamiento fluido y memoria visuoespacial y verbal a corto plazo y de trabajo explican el 40 y el 50% de la varianza en las pruebas cognitivas de inteligencia. Estudios posteriores han mostrado que el volumen de materia gris izquierda de dos áreas frontales (orbitofrontal y corteza del cíngulo anterior rostral) y la conectividad de la materia blanca entre ambas áreas representan hasta el 50% de la varianza en la inteligencia general. Por lo tanto, especialmente en la corteza prefrontal, la estructura, la función y la conectividad se relacionan con la inteligencia general, específicamente con la capacidad de razonamiento y la memoria de trabajo³¹.

Una mayor subdivisión de la inteligencia fluida y cristalizada, por ejemplo, en comprensión verbal, memoria de trabajo, velocidad de procesamiento y organización perceptiva, da como resultado un mapa más definido de regiones corticales en el hemisferio izquierdo y derecho que se relaciona con estos subdominios de inteligencia.

Eficiencia en el dominio verbal

Diferentes estudios han demostrado que la inteligencia está significativamente correlacionada con el volumen cerebral intracraneal del lóbulo temporal, el hipocampo y el cerebelo^{11,24,32}. Un mayor volumen en regiones como las áreas laterales de los lóbulos temporales y del polo temporal podría explicarse, en parte, por unas neuronas piramidales más grandes y complejas que están más dispersas en el espacio cortical y que probablemente favorecen funciones cognitivas como la capacidad verbal. Es importante señalar que las habilidades lingüísticas tempranas predicen la superdotación con mayor fuerza que otros dominios cognitivos ya desde los 12 meses³².

Los giros parahipocámpales se consideran parte del lóbulo temporal medial, región clave para la memoria declarativa, mientras que la región de la corteza parietal inferior izquierda forma parte

de la red predeterminada, clave en la integración de información compleja y semántica y en la simulación mental. Tanto el mayor volumen de los giros parahipocámpales como la mayor conectividad en la región de la corteza parietal inferior izquierda que muestran los sujetos con AC parecen estar implicados en la conexión abstracta entre conceptos, la producción y la comprensión de la metáfora, la generación de ideas creativas, la creación de nuevos usos para los objetos y el pensamiento futuro episódico³³. En este sentido, la mayor capacidad que tienen estos sujetos para el pensamiento creativo puede estar relacionada con la adaptación flexible de la memoria semántica para imaginar y construir nuevas figuras del habla. Además, la corteza prefrontal dorsomedial izquierda podría estar ejerciendo el control ejecutivo para mantener la búsqueda y selección estratégicas, inhibiendo las respuestas o significados dominantes y facilitando así la creatividad del pensamiento³³.

La alta correlación entre la memoria de trabajo verbal y áreas de sustancia blanca del lóbulo frontal, predominantemente izquierdo, ha sido documentada por diversos estudios^{34,35}. Los efectos de esta mayor conectividad en la memoria de trabajo de los sujetos con AC incluyen la atención de lo holístico a las partes y el retraso en el cierre en la evaluación y en la actualización de tareas, así como una mayor velocidad de procesamiento y una mayor capacidad para asociar ideas y evocar recuerdos, conceptualizar, abstraer, comprender, intuir, proyectar el lenguaje y, en general, resolver los problemas de manera diferente y eficiente³³.

Eficiencia en el dominio de las matemáticas

Los adolescentes con AC para las matemáticas también presentan variaciones neurogliales funcionales y estructurales que predicen las diferencias individuales encontradas en tareas de inteligencia y razonamiento. Estos sujetos muestran una corteza más delgada y un área de superficie más grande en regiones clave de la red frontoparietal y modo predeterminado que están involucradas en el procesamiento ejecutivo y el pensamiento creativo, respectivamente³⁶. La combinación de grosor cortical reducido y mayor área de superficie sugiere una maduración neuronal precoz que se caracteriza por habilidades y rasgos excepcionales en el razonamiento lógico, en las imágenes mentales y en el pensamiento divergente, así como por un alto compromiso en las tareas³⁷. Algunos autores han encontrado que en la adolescencia esta diferencia de maduración fisiológica y funcional puede llegar a ser de hasta 5 años con respecto a sus iguales de capacidad promedio³⁸.

Los niños con una habilidad matemática excepcional exhiben signos de un mayor desarrollo del hemisferio derecho, y cuando se involucran en el proceso de pensamiento tienden a confiar más en las imágenes mentales. Además, manifiestan un mayor intercambio interhemisférico de información, lo que refleja un grado inusual de conectividad neural más distribuida que beneficia la memoria de trabajo, el uso de las analogías, el razonamiento fluido y las capacidades creativas³⁶. Es importante señalar que la capacidad de estos sujetos está relacionada con un incremento de la memoria de trabajo y que es alrededor de los 12 años cuando la memoria de trabajo verbal parece estar más fuertemente asociada con su rendimiento en matemáticas^{19,38}. Por último, hay que destacar que estos sujetos muestran una red frontoparietal altamente integrada, con más «puentes de conexión» entre las cortezas frontal y parietal y menos «centros de conexión» en la corteza sensoriomotora, caracterizándose por una mayor y más flexible reconfiguración de la conexión frontoparietal³⁷.

Red de conectividad estructural

Una nueva fase clave de la investigación está comenzando a estudiar cómo las redes funcionales se relacionan con las redes

estructurales, con énfasis en cómo las áreas del cerebro distribuidas se comunican entre sí.

Avances recientes utilizando la teoría de grafos coinciden en que las redes cerebrales con mayor eficiencia global son las que presentan conexiones más cortas entre cualquier par de nodos o regiones cerebrales; estas redes se asocian con puntuaciones más altas de inteligencia general, tanto en niños como en adultos¹⁸. En general, los sujetos con AC muestran una transferencia de información paralela más eficiente al tiempo que tienen una mayor dependencia de las áreas de asociación frontoparietales en dominios específicos³⁸. Según esta visión, la capacidad cognitiva surge de las contribuciones de las regiones cerebrales distribuidas que funcionarían juntas como una red integrada, donde las conexiones de materia blanca de las regiones frontal, parietal y temporal se asocian más fuertemente con la cognición y el logro educativo a lo largo del desarrollo³⁸.

Las regiones frontoparietales, junto con las estructuras subcorticales que incluyen el tálamo, el putamen y el hipocampo, se consideran centros cerebrales altamente interconectados, también denominados «clubes ricos»³⁹. Las conexiones entre estos clubes ricos desempeñan un papel clave en la promoción del flujo eficiente de información en la red del cerebro, a pesar del alto costo del cableado o de fibra de materia blanca. Por lo tanto, las conexiones de clubes ricos deberían optimizar la eficiencia de la comunicación global, mejorando así las funciones cognitivas globales, incluida la inteligencia. Sin embargo, estudios recientes³⁹ han encontrado que los adolescentes con AC muestran una eficiencia baja en los clubes ricos y una mayor eficiencia, con un menor coste de cableado (o fibras), en las conexiones locales, lo que sugiere que el cerebro altamente inteligente puede no seguir por completo este proceso eficiente, pero un tanto estereotipado, de integración de información. Esta red de conectividad con estructuras altamente agrupadas podría conferir una ventaja en la precisión y en la rapidez de convergencia de información diversa derivada de cada área del cerebro. En este sentido, el papel de la topología de red altamente especializada y segregada puede ser más importante de lo que se pensaba. Este hallazgo sería coherente con otros que subrayan que la eficiencia de las conexiones cerebrales débiles, en lugar de las conexiones cerebrales fuertes, es responsable de la función cognitiva general³⁹.

Conclusión

El potencial para las altas capacidades es el resultado de la contribución de muchas variantes genéticas y ambientales, lo que explica, por una parte, las diferencias halladas en cuanto a las trayectorias de su desarrollo y, por otra, la gran variabilidad cuantitativa y cualitativa de su manifestación^{2,40}. Los estudios genéticos indican que los genes asociados con la inteligencia son esenciales para la función sináptica y la plasticidad a lo largo de la vida y, en última instancia, pueden explicar las diferencias estructurales y las funcionales halladas en la trayectoria de desarrollo neuronal de las personas con AC^{13,15,16}. La expresión genética de la inteligencia se acumula en las neuronas piramidales corticales, y la neurociencia celular ha vinculado la función y la estructura de estas células con la inteligencia humana al revelar correlaciones positivas entre el tamaño dendrítico, la velocidad del potencial de acción y el CI^{1,3-5}. Las imágenes cerebrales señalan importantes regiones anatómicas macroscópicas funcionales y estructurales implicadas en la inteligencia: volumen y grosor general de la materia gris, integridad de la materia blanca y función, en las cortezas temporal, frontal y parietal. Una maduración precoz de estas áreas y, en particular, de los lóbulos frontales implica una mielinización y una complejidad mayor en las redes neuronales que puede estar facilitando la atención selectiva, un mayor uso de estrategias cognitivas de orden superior, una memoria de trabajo más eficaz, una mayor flexibilización, planificación/resolución de

las tareas y, en definitiva, un rendimiento ejecutivo mayor y un alto grado de pensamiento abstracto y divergente^{2,15}.

El cerebro necesita actualizar continuamente el conocimiento previo, y esto implica reestructurar la conectividad neuronal en respuesta a las necesidades cambiantes, por lo que la inteligencia requiere tanto la capacidad de activar las conexiones más utilizadas y de fácil acceso para favorecer la inteligencia cristalizada como la capacidad de adaptarse y activar conexiones menos usuales para favorecer la inteligencia fluida. La teoría de grafos muestra que un cerebro altamente inteligente tiene mayor capacidad, mayor plasticidad y un entorno más rico, lo que le permite comunicarse más ampliamente, al tiempo que puede estar más especializado en un dominio concreto^{2,35,39}. En conjunto, los datos refuerzan la teoría de que las características de las redes funcionales y estructurales pueden ser únicas y potencialmente diferentes en las personas con altas capacidades. Dada la estrecha relación entre el desempeño excepcional y la motivación para la práctica, se necesitaría completar esta visión «cortical» con otros estudios que incluyeran la organización vertical o «subcortical» del cerebro y la remodelación de sus conexiones como un modelo integrado del desarrollo.

Financiación

La presente investigación no ha recibido ayudas específicas provenientes de agencias del sector público, sector comercial o entidades sin ánimo de lucro.

Conflicto de intereses

Ninguno.

Anexo. Material adicional

Se puede consultar material adicional a este artículo en su versión electrónica disponible en [doi:10.1016/j.psiq.2019.09.001](https://doi.org/10.1016/j.psiq.2019.09.001).

Bibliografía

- Goriounova NA, Mansvelder HD. Genes, cells and brain areas of intelligence. *Front Hum Neurosci.* 2019;13:44. [http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2019.00044](https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00044).
- Thomas MA. Neurocomputational model of developmental trajectories of gifted children under a polygenic model: When are gifted children held back by poor environments? *Intelligence.* 2018;69:200–12. [http://dx.doi.org/10.1016/j.intell.2018.06.008](https://doi.org/10.1016/j.intell.2018.06.008).
- Genç E, Fraenz C, Schlüter C, Friedrich P, Hossiep R, Voelkle MC, et al. Diffusion markers of dendritic density and arborization in gray matter predict differences in intelligence. *Nat Commun.* 2018;9:1905. [http://dx.doi.org/10.1038/s41467-018-04268-8](https://doi.org/10.1038/s41467-018-04268-8).
- Choi YY, Shamosh NA, Cho SH, DeYoung CG, Lee MJ, Lee JM, et al. Multiple bases of human intelligence revealed by cortical thickness and neural activation. *J Neurosci.* 2008;28:10323–9. [http://dx.doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3259-08.2008](https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3259-08.2008).
- Savage JE, Jansen PR, Stringer S, Watanabe K, Bryois J, de Leeuw CA, et al. Genome-wide association meta-analysis in 269,867 individuals identifies new genetic and functional links to intelligence. *Nat Genet.* 2018;50:912–9. [http://dx.doi.org/10.1038/s41588-018-0152-6](https://doi.org/10.1038/s41588-018-0152-6).
- Coleman JRI, Bryois J, Gaspar HA, Jansen PR, Savage JE, Skene N, et al. Biological annotation of genetic loci associated with intelligence in a meta-analysis of 87,740 individuals. *Mol Psychiatry.* 2019;24:182–97. [http://dx.doi.org/10.1038/s41380-018-0040-6](https://doi.org/10.1038/s41380-018-0040-6).
- NCBI Resource Coordinators. Database resources of the National Center for Biotechnology Information. *Nucleic Acids Res.* 2017;46:D8–13. [http://dx.doi.org/10.1093/nar/gkx1095](https://doi.org/10.1093/nar/gkx1095).
- Zabaneh D, Krapohl E, Gaspar HA, Curtis C, Lee SH, Patel H, et al. A genome-wide association study for extremely high intelligence. *Mol Psychiatry.* 2018;23:1226–32. [http://dx.doi.org/10.1038/mp.2017.121](https://doi.org/10.1038/mp.2017.121).
- Hardingham GE, Pruunsild P, Greenberg ME, Bading H. Lineage divergence of activity-driven transcription and evolution of cognitive ability. *Nat Rev Neurosci.* 2018;19:9–15. [http://dx.doi.org/10.1038/nrn.2017.138](https://doi.org/10.1038/nrn.2017.138).
- Beaulieu-Laroche L, Toloza EHS, van der Goes MS, Lafourcade M, Barnagian D, Williams ZM, et al. Enhanced dendritic compartmentalization in human cortical neurons. *Cell.* 2018;175:643–51.e14. [doi:10.1016/j.cell.2018.08.045](https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.08.045).
- Deitcher Y, Eyal G, Kanari L, Verhoog MB, Atenekeng Kahou GA, Mansvelder HD, et al. Comprehensive morpho-electrotonic analysis shows 2 distinct classes of L2 and L3 pyramidal neurons in human temporal cortex. *Cereb Cortex.* 2017;27:5398–414. [http://dx.doi.org/10.1093/cercor/bhx226](https://doi.org/10.1093/cercor/bhx226).
- Goriounova NA, Heyer DB, Willers R, Verhoog MB, Giugliano M, Verbist C, et al. Large and fast human pyramidal neurons associate with intelligence. *Elife.* 2018;7:e41714. [http://dx.doi.org/10.7554/elife.41714](https://doi.org/10.7554/elife.41714).
- Lam M, Trampush JW, Yu J, Knowles E, Davies G, Liewald DC, et al. Large-scale cognitive GWAS meta-analysis reveals tissue-specific neural expression and potential nootropic drug targets. *Cell Rep.* 2017;21:2597–613. [http://dx.doi.org/10.1016/j.celrep.2017.11.028](https://doi.org/10.1016/j.celrep.2017.11.028).
- Karama S, Ad-dab'bagh Y, Haier RJ, Deary IJ, Lyttelton OC, Lepage C, et al. Positive association between cognitive ability and cortical thickness in a representative US sample of healthy 6 to 18 year-olds. *Intelligence.* 2009;37:145–55. [http://dx.doi.org/10.1016/j.intell.2008.09.006](https://doi.org/10.1016/j.intell.2008.09.006).
- Schnack HG, van Haren NEM, Brouwer RM, Evans A, Durston S, Boomsma DI, et al. Changes in thickness and surface area of the human cortex and their relationship with intelligence. *Cereb Cortex.* 2015;25:1608–17. [http://dx.doi.org/10.1093/cercor/bht357](https://doi.org/10.1093/cercor/bht357).
- Ouyang M, Kang H, Dettre JA, Roberts T, Huang H. Short-range connections in the developmental connectome during typical and atypical brain maturation. *Neurosci Biobehav Rev.* 2017;83:109–22. [http://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.10.007](https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.10.007).
- Benedek M, Jauk E, Beaty RE, Fink A, Koschutnig K, Neubauer AC. Brain mechanisms associated with internally directed attention and self-generated thought. *Sci Rep.* 2016;6:22959. [http://dx.doi.org/10.1038/srep22959](https://doi.org/10.1038/srep22959).
- Bathelt J, Scerif G, Nobre A, Astle D. Whole-brain white matter organization, intelligence, and educational attainment. *Trends Neurosci Educ.* 2019;15:38–47. [http://dx.doi.org/10.1016/j.tine.2019.02.004](https://doi.org/10.1016/j.tine.2019.02.004).
- Shen IH, Liu PY, Chen CL. Neural correlates underlying spatial and verbal working memory in children with different mathematics achievement levels: An event-related potential study. *Int J Psychophysiol.* 2018;133:149–58. [http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2018.07.006](https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2018.07.006).
- Shi L, Sun J, Xia Y, Ren Z, Chen Q, Wei D, et al. Large-scale brain network connectivity underlying creativity in resting-state and task fMRI: Cooperation between default network and frontal-parietal network. *Biol Psychol.* 2018;135:102–11. [http://dx.doi.org/10.1016/j.biopsycho.2018.03.005](https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2018.03.005).
- Liu Z, Zhang J, Xie X, Rolls ET, Sun J, Zhang K, et al. Neural and genetic determinants of creativity. *Neuroimage.* 2018;174:164–76. [http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.02.067](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.02.067).
- Jung RE, Haier RJ. The Parieto-Frontal Integration Theory (P-FIT) of intelligence: Converging neuroimaging evidence. *Behav Brain Sci.* 2007;30:135–54. [http://dx.doi.org/10.1017/S0140525X07001185](https://doi.org/10.1017/S0140525X07001185).
- Hagmann P, Cammoun L, Gigandet X, Meuli R, Honey CJ, Wedeen VJ, et al. Mapping the structural core of human cerebral cortex. *PLoS Biol.* 2008;6:e159. [http://dx.doi.org/10.1371/journal.pbio.0060159](https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060159).
- Colom R, Karama S, Jung RE, Haier RJ. Human intelligence and brain networks. *Dialogues Clin Neurosci.* 2010;12:489–501.
- Desco M, Navas-Sanchez FJ, Sanchez-González J, Reig S, Robles O, Franco C, et al. Mathematically gifted adolescents use more extensive and more bilateral areas of the fronto-parietal network than controls during executive functioning and fluid reasoning tasks. *Neuroimage.* 2011;57:281–92. [http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.03.063](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.03.063).
- Nusbaum F, Hannoun S, Kocivar G, Stamile C, Fournieret P, Revol O, et al. Hemispheric differences in white matter microstructure between two profiles of children with high intelligence quotient vs controls: A tract-based spatial statistics study. *Front Neurosci.* 2017;11:173. [http://dx.doi.org/10.3389/fnins.2017.00173](https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00173).
- Kocivar G, Suprano I, Stamile C, Hannoun S, Fournieret P, Revol O, et al. Brain structural connectivity correlates with fluid intelligence in children: A DTI graph analysis. *Intelligence.* 2019;72C:67–75. [http://dx.doi.org/10.1016/j.intell.2018.12.003](https://doi.org/10.1016/j.intell.2018.12.003).
- Chiang MC, Barysheva M, Shattuck DW, Lee AD, Madsen SK, Avedissian C, et al. Genetics of brain fiber architecture and intellectual performance. *J Neurosci.* 2009;29:2212–24. [http://dx.doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4184-08.2009](https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4184-08.2009).
- Lee KH, Choi YY, Gray JR, Cho SH, Chae JH, Lee S, et al. Neural correlates of superior intelligence: Stronger recruitment of posterior parietal cortex. *Neuroimage.* 2006;29:578–86. [http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.07.036](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.07.036).
- Dunst B, Benedek M, Jauk E, Bergner S, Koschutnig K, Sommer M, et al. Neural efficiency as a function of task demands. *Intelligence.* 2014;42:22–30. [http://dx.doi.org/10.1016/j.intell.2013.09.005](https://doi.org/10.1016/j.intell.2013.09.005).
- Ohtani T, Nestor PG, Bouix S, Saito Y, Hosokawa T, Kubicki M. Medial frontal white and gray matter contributions to general intelligence. *PLoS One.* 2014;9:e112691. [http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0112691](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112691).
- Peyre H, Charkaluk ML, Forhan A, Heude B, Ramus F. Do developmental milestones at 4, 8, 12 and 24 months predict IQ at 5–6 years old? Results of the EDEN mother-child cohort. *Eur J Paediatr Neurol.* 2017;21:272–9. [http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpn.2016.11.001](https://doi.org/10.1016/j.ejpn.2016.11.001).
- Khalil R, Godde B, Karim AA. The link between creativity cognition, and creative drives and underlying neural mechanisms. *Front Neural Circuits.* 2019;13:18. [http://dx.doi.org/10.3389/fncir.2019.00018](https://doi.org/10.3389/fncir.2019.00018).
- Haier RJ, Jung RE, Yeo RA, Head K, Alkire MT. Structural brain variation and general intelligence. *Neuroimage.* 2004;23:425–33. [http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.04.025](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.04.025).
- Lo CY, He Y, Lin CP. Graph theoretical analysis of human brain structural networks. *Rev Neurosci.* 2011;22:551–63. [http://dx.doi.org/10.1515/RNS.2011.039](https://doi.org/10.1515/RNS.2011.039).

36. Navas-Sánchez FJ, Alemán-Gómez Y, Sánchez-Gonzalez J, Guzmán-de-Villoria JA, Franco C, Robles O, et al. Cortical morphometry in frontoparietal and default mode networks in math-gifted adolescents. *Hum Brain Mapp.* 2016;37:1893–902, <http://dx.doi.org/10.1002/hbm.23143>.
37. Zhang L, Gan JQ, Wang H. Optimized gamma synchronization enhances functional binding of fronto-parietal cortices in mathematically gifted adolescents during deductive reasoning. *Front Human Neurosci.* 2014;8:430, <http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2014.00430>.
38. O'Boyle MW. Mathematically gifted children: Developmental brain characteristics and their prognosis for well-being. *Roeper Review.* 2008;30:181–6, <http://dx.doi.org/10.1080/02783190802199594>.
39. Ma J, Kang HJ, Kim JY, Jeong HS, Im JJ, Namgung E, et al. Network attributes underlying intellectual giftedness in the brain. *Sci Rep.* 2017;7:11321.
40. Wraw C, Der G, Gale CR, Deary IJ. Intelligence in youth and health behaviours in middle age. *Intelligence.* 2018;69:71–86, <http://dx.doi.org/10.1016/j.intell.2018.04.005>.