



Artículo de revisión

Funciones cognitivas del cerebelo: implicación en las funciones ejecutivas

Cognitive function of cerebellum: implications in executive functions

Carlos Dorado^{1*}

1 Facultad de Psicología, Universidad San Buenaventura Sede Bogotá. Bogotá, Colombia.

Resumen

Las funciones ejecutivas han sido tradicionalmente relacionadas con estructuras cerebrales corticales, específicamente con la corteza prefrontal y de manera secundaria se han relacionado a otras estructuras corticales debido a la vasta conectividad que establece la corteza prefrontal a lo largo de la corteza cerebral, por otro lado la implicación de estructuras subcorticales en las funciones cognitivas es un campo en estudio, el cual apenas se está desarrollando. Recientes investigaciones con neuroimagen funcional y los estudios Neuropsicológicos de pacientes con alteraciones en el cerebelo han mostrado la posible participación activa de esta estructura. El objetivo general de este trabajo fue realizar una revisión y posterior análisis de la evidencia empírica y teórica (clínica, neuroimágenesológica y experimental) que pusiera en evidencia las implicaciones funcionales del cerebelo en las funciones ejecutivas. Se discutieron las aportaciones funcionales del cerebelo a las funciones ejecutivas a través de sus correlatos y circuitos neuroanatómicos, y se analizaron las descripciones de casos clínicos de pacientes con afectación de algún tipo de función ejecutiva como consecuencia de una alteración del cerebelo. Frente a los hallazgos se encuentran resultados divergentes, por un lado frente a la evidencia neuroanatómica entre las dos estructuras (CPF-Cerebelo) se genera una conectividad indudable. Frente a la evidencia neuropsicológica, no hay un consenso, aunque mucha de la evidencia afirma una indudable participación del cerebelo a las funciones ejecutivas.

Palabras clave: cerebelo, lóbulo frontal, corteza prefrontal, funciones ejecutivas, interacciones cerebelo-corticales

Abstract

Executive functions have been traditionally associated with cortical brain structures, specifically the prefrontal cortex and secondarily other structure have been implicated because of the extensive cortical connectivity that establishes the prefrontal cortex throughout the cerebral cortex, on the other hand the involvement of subcortical structures in cognitive functions is a field study, which is only just developing. Recent research with functional neuroimaging and neuropsychological studies of patients with alterations in the cerebellum have shown the possible involvement of this structure. The overall objective of this study was to review and subsequent analysis of empirical and theoretical evidence (clinical, neuroimaging and experimental) to put in evidence the functional implications of the cerebellum in executive functions. Discussed the functional input of the cerebellum to executive functions through their circuits and neuroanatomical correlates, and analyzed the descriptions of clinical cases of patients with involvement of some kind of executive function as a result of an alteration of the cerebellum. Against the findings are divergent results, first neuroanatomical evidence against the two structures (CPF-Cerebellum) is generated undoubtedly connectivity. Faced with the neuropsychological evidence, there is no consensus, although much of the evidence says a definite involvement of the cerebellum to executive functions.

Keywords: cerebellum, frontal lobe, prefrontal cortex, executive function, cerebellum-cortical interactions

* Correspondencia: cdorado@usbog.edu.co. Facultad de Psicología, Edificio Pedro Simón, 4º piso, Universidad San Buenaventura. Carrera 8H #172-20, Bogotá. Teléfono: +0057 (1) 30 04 36 98 46.

Recibido: 10-11-11. Revisión desde: 22-12-11. Aceptado: 22-05-12

DOI: 10.5839/rcnp.2012.0702.02

Introducción

La "función ejecutiva" pareciera estar más cerca de ser una apropiada, aunque compleja, construcción conceptual insertada en el modelo teórico de la neurociencia cognitiva contemporánea. Se puede comprender como una verdadera función o grupo de funciones psicológicas que responden a un correlato neural específico con propiedades cognitivas y motoras claramente definidas y taxativamente comprensibles. De hecho, algunos autores utilizan el término "paraguas conceptual" para referirse a la vaguedad y difusa amplitud del concepto como tal y a su carácter semántico inespecífico (Happé, 1994; Hughes, Russell & Robbins, 1994; Ozonoff & Strayer, 1997). Las funciones ejecutivas pueden ser entendidas como aquellos procesos cognitivos que permiten el control y la regulación de diversos comportamientos los cuales están dirigidos a un fin específico (Ardila, 2008; Martín et al., 2008; Bellebaum & Daum, 2007; Burgess, 2000).

Lezak (1982) define las funciones ejecutivas como los procesos que asocian movimientos, ideas y acciones simples, y los orientan a la resolución de conductas complejas. Y los trastornos producidos en estas son en la iniciativa, la motivación, la formulación de metas y los planes de acción y el autocontrol de la conducta, asociados a lesiones frontales. Por otro lado, Sholberg y Mateer (1989) consideran que las funciones ejecutivas son procedimientos cognitivos, entre los que se destacan la anticipación, la elección de objetivos, la planificación, la selección de la conducta, la autorregulación, el autocontrol y el uso de la retroalimentación.

La Función ejecutiva, o mejor, las funciones ejecutivas presentan una condición particular que les define, en principio como un conjunto de propiedades y características funcionales, pero que no especifica los dominios propios de cada una de ellas, ni dice nada sobre la existencia de otras funciones o procesos aún desconocidos o no teorizados que conformen este grupo especial de funciones cerebrales. Esta condición es la referida a la ubicación anatómica que se supone ocupan en la topografía del encéfalo. Dichas funciones son atribuidas a través de la evidencia clínica, a la corteza frontal y específicamente la corteza prefrontal la cual es la encargada de regular los procesos relacionados con las mismas (Damasio, 1996; Della & Gray, 1998). Sobre esto ya hay cierto grado de consenso. Pero aún falta mucho camino por recorrer en lo concerniente al número definitivo de funciones, al tipo específico de ellas, a la manera como se interrelacionan y al modo como debe entenderse su funcionamiento en la dinámica global de los procesos cerebrales.

Diversos y recientes estudios han demostrado la implicación activa del cerebelo en diferentes funciones cognitivas y específicamente en las funciones ejecutivas (Andreasen & Pierson, 2008; Baillieux, De Smeta, Paquier, De Deyn, & Marien, 2008; Lagarde, Hantkie, Hajjioui, & Yelnik, 2009). Orientado en la evidencia empírica por medio de estudios con pacientes con lesión cerebelosa, con estudios de imageneología funcional y estudios experimentales, este trabajo pretende entonces enfatizar la relevancia de las aportaciones del cerebelo en las funciones ejecutivas, indagando en la conectividad que se establece entre el cerebelo y la corteza prefrontal (CPF) y a la luz de los hallazgos neuropsicológicos.

Método

Materiales

El presente trabajo se basa en una revisión bibliográfica sobre el tema de las contribuciones funcionales del cerebelo en las funciones ejecutivas. Para ello se han seleccionado un total de 31 artículos de investigación y 15 artículos de revisión publicados en revistas con índice de impacto indexadas en Neuroscience Citation Index, PROQUEST DATABASE, PubMed, Elsevier BIOBASE, Current Awareness in Biological Sciences (CABS). Asimismo se han revisado un total de 4 capítulos de libros con información relevante para el trabajo.

Procedimiento

Para realizar la búsqueda bibliográfica, se recurrió a fuentes primarias de información, así como bases de datos, incluyendo: CSIC, PSYCHINFO, ERIC, MEDLINE, PsyCritiques, Social Services Abstracts, Sociological Abstracts, PsyBooks, PsycArticles, Psycodoc, Academic Search, Emerald, Periodicals Archive, OVID y EBSCO.

Se han realizado tres búsquedas bibliográficas en tres momentos diferentes discriminadas así:

- Primera revisión: Búsqueda general de artículos sobre la relación entre el cerebelo y las funciones ejecutivas.
- Segunda revisión: Búsqueda focalizada en artículos sobre las contribuciones del cerebelo a las funciones ejecutivas.
- Tercera revisión: Búsqueda focalizada en artículos sobre las afectaciones de las funciones ejecutivas como consecuencia de alteración del cerebelo.

Se han utilizado los siguientes criterios de inclusión de los artículos:

- Palabras clave de forma prioritaria para establecer la selección de trabajos (palabras en el título o en el abstract de los artículos o en las palabras clave): Cerebellum, cerebellar, executive function, prefrontal, disexecutive function. Se realizaron cruces entre cada una de estas palabras para limitar la búsqueda.
- No se estableció límite cronológico para la búsqueda de artículos.
- Idioma de las publicaciones: inglés y castellano.

Contenido de los artículos incluidos:

- Trabajos que abordan el tema desde un perfil neuropsicológico.
- Trabajos que abordan el tema desde un perfil experimental.
- Trabajos que abordan el tema desde un perfil clínico.

Implicaciones Neuroanatómicas

El cerebelo se localiza en la fosa posterior, bajo el tectum y detrás del tronco encefálico. Deriva de la parte dorsal del metencéfalo y está situado dorsalmente al bulbo y al puente, contribuyendo a la formación del techo del IV ventrículo. Establece la mayor parte de sus conexiones a través de los pedúnculos cerebelosos (superior, medio e inferior). La conformación del cerebelo a nivel estructural se establece en laminas o folios plegados entre sí, formando 10 lóbulos en disposición transversal. Estos lóbulos se enumeran de I a X en dirección rostrocaudal.

dal. La constitución de estos lóbulos corresponden a un origen filogenético diferente, así el más antiguo es el arquicerebelo que corresponde con el lóbulo X y su función está relacionada con el aparato vestibular (mantenimiento de la postura corporal). El paleocerebelo está conformado por los lóbulos I-V y VIII-IX, sus aferencias son de origen espinal y trigeminal y su función está relacionada con el control y la regulación de la musculatura axial. El neocerebelo está formado por los lóbulos VI y VII, los cuales forman gran parte de los hemisferios cerebelosos. Reciben aferencias principalmente del neocortex a través del haz córtico-ponto-cerebeloso (Delgado-García, 2001; Glickstein, Sultan & Voogd, 2009; Voogd & Glickstein, 1998).

En las interacciones cerebelo-corticales para el procesamiento de la información, muchos investigadores se han centrado particularmente en el control motor. Recientes estudios han sugerido que el cerebelo puede ejercer un papel equiparable en diferentes contextos del comportamiento y que los mecanismos de procesamiento también se aplican al funcionamiento motor y de las funciones cognitivas (Ito, 1993; Ramnani, 2006). Esto se apoya en la organización celular del cerebelo, Bloedel (1992, Citado en Bellebaum & Daum, 2007) refiere que esta organización celular es heterogénea en toda la corteza cerebelosa. Según esto el procesamiento realizado por una región particular del cerebelo es definido principalmente por sus conexiones con otras partes del cerebro (Bellebaum & Daum, 2007).

Modelos actuales (Ramnani, 2006) sugieren para el dominio motor del funcionamiento cerebeloso, que el cerebelo recibe una copia de las aferencias de los comandos neuronales motores de la corteza cerebral. Con la ayuda de un "Modelo interno de anticipación" el cerebelo puede predecir las consecuencias perceptuales del movimiento (Balkemore, 2003 citado en Bellebaum & Daum, 2007). Esta información es retransmitida de regreso a la corteza vía el tálamo y después comparada con la consecuencia sensorial actual. Las diferencias entre las predicciones y la información entrante acerca de las consecuencias sensoriales, pueden ser usadas para la actualización del modelo interno (Wolpert, Miall, & Kawato, 1998; Wolpert & Ghahramani, 2000). Para Bellebaum y Daum (2007) este modelo presenta grandes ventajas ya que para influir en el comportamiento, la retroalimentación de los sistemas sensoriales y los propioceptivos llegan demasiado tarde, así, un modelo interno como el propuesto puede llenar este vacío temporal, a la vez que permite una comparación directa de los previstos y el estado deseado del sistema motor.

Para Ramnani (2006) estos mismos principios se pueden aplicar al procesamiento de la información abstracta y al funcionamiento no motor. Un modelo interno de anticipación simula el procesamiento de información que se produce en todas las áreas corticales con las que el cerebelo está conectado; así cómo el cerebelo utiliza copia de las eferencias para la predicción de las consecuencias sensoriales, copias de las eferencias del área premotora para la codificación de los planes del movimiento se usan para predecir el procesamiento de la corteza motora primaria. Tras volverse la información más abstracta, bucles originados en la CPF pueden estar involucrados en la predicción de los planes del movimiento desde un plan de acción más general. Bellebaum y Daum (2007) sugieren entonces que la CPF al estar conectada con muchas y diversas zonas del cerebro, los circuitos CPF-cerebelo pueden estar involucrados en la generación de modelos internos para todo tipo de proce-

so, incluyendo los dominios cognitivos como la memoria o la percepción espacial.

Estudios neuroanatómicos han demostrado una fuerte conectividad entre el cerebelo y los lóbulos frontales, estos proponen que esta conectividad consiste en un bucle cortico-cerebeloso cerrado en donde la parte lateral (dorsal) del cortex prefrontal conecta al cerebelo por medio de la vía del núcleo pontino, mientras el cerebelo envía proyecciones de regreso a la corteza prefrontal por vía del núcleo dentado y el tálamo (Baillieux, De Smeta, Paquier, De Deyn, & Marien, 2008; Matthews, 2006; Ramnani, Behrens, Johansen-Berg, Richter, Pinski, Andersson, Rudebeck, Ciccarelli, Richter, Thompson, Gross, Robson, Kastner, & Matthews, 2006). Según Brodal y Bjaalie (1992), el núcleo pontino es especial ya que su fuente de aferencias está fuertemente dominada por la neocorteza y todas sus eferencias son enviadas a un solo objetivo el cual es el cerebelo. Se ha hipotetizado que las zonas de la CPF de este circuito son idénticas a las regiones prefrontales que participan en la memoria de trabajo, esto se soporta en las similitudes en el patrón de los déficit ejecutivos Neuropsicológicos que se presentan en pacientes con lesiones de la CPF Dorsolateral y en pacientes con lesión cerebelosa (Heyder, Suchan, & Daum, 2004).

Bellebaum y Daum (2007) refieren que las vías de conexión que se originan en el cortex se proyectan al cerebelo por medio de la protuberancia y a su vez, desde el cerebelo las proyecciones retornan a la corteza por vía del tálamo. En primates no humanos las proyecciones que se originan en la corteza frontal a la protuberancia muestran un origen principalmente en la corteza premotora, mientras que una proporción muy pequeña se origina en la corteza prefrontal (Schmahmanns & Pandya, 1995; Schmahmann & Pandya, 1997; Schmahmann, Rosene, & Pandya, 2004). El circuito motor y el prefrontal permanecen anatómicamente separados en su vía al cerebelo. A través de la protuberancia y la corteza cerebelosa la corteza motora se conecta con la parte dorsal y la corteza prefrontal se conecta con la parte ventral del núcleo dentado del cerebelo (Kelly & Strick, 2003; Salih, Breuer, Harnack, Hoffmann, & Plover, 2010).

En comparación con las proyecciones cerebelo-prefrontales, en primates las proyecciones desde el cortex motor y premotor son mucho más fuertes (Bellebaum & Daum, 2007). En los humanos esta situación es diferente, Ramnani et al. (2006) mostraron que las proyecciones desde la corteza prefrontal son desproporcionadamente más fuertes comparadas con los primates no humanos, sugiriendo que estas conexiones se han desarrollado muy rápidamente en el curso de la evolución, al igual que la corteza prefrontal. En concordancia con la porción prefrontal más prominente en humanos, el dentado ventral es mucho mayor en los humanos en comparación con los grandes simios (Matano, 2001 citado en Bellebaum & Daum, 2007).

En el apartado siguiente se mostrará la relación que se establece entre el cerebelo y las funciones ejecutivas a la luz de la evidencia empírica por medio pacientes con alteración cerebelosa, estudios experimentales y estudios de neuroimagenología.

Implicaciones Neuropsicológicas

El cerebelo es una estructura que ha sido típicamente relacionada en la literatura científica en general con funciones tales como la planeación y el control motor (Allen & Courchesne; Andreasen & Pierson, 2008; Booth, Wood, Lu, Houk & Bitan, 2007; Escobar & Pimienta, 1994).

Esta relación se ha reafirmado a causa de los déficit motores asociados a las lesiones del mismo (Doya, 2000; Tsuchiyaa et al., 1998). Sin embargo, aunque hay numerosos reportes que indican la importancia que ejerce el cerebelo en la destreza motriz, evidencia actual vincula al cerebelo con funciones corticales como las funciones cognitivas (Baillieux, De Smeta, Paquier, De Deyn & Marien, 2008; Balsters & Ramnani, 2008; Grafman, Litvan, Massaquoi, Stewart, Sirigu & Hallett, 1992; Goldberg, 2001; Lalonde & Botez-Marquard, 2000; Neau, Arroyo-Anllo, Bonnaud, Ingrand & Gil R, 2000, Schmahmann, Macmorea & Vangelb, 2009; Stoodley & Schmahmann, 2010; Thach, 1998).

Los mecanismos que implican al cerebelo con el procesamiento de las funciones cognitivas en general y en particular con las funciones ejecutivas están lejos de ser completamente entendidas. Es muy probable que el procesamiento efectuado por el cerebelo concerniente a las funciones ejecutivas de alguna manera defiera a los procesamientos de la Corteza Prefrontal (Bellebaum & Daum, 2007). Estudios de lesiones específicas son adecuados para evidenciar las diferencias sutiles en la naturaleza de las diferentes regiones que participan en los circuitos fronto-cerebelosos. Las diferencias en la severidad de los déficit observados en pacientes con daño cerebeloso y de la CPF aportan algunos datos para diferenciar los roles de ambas estructuras. La memoria de trabajo verbal, por ejemplo, está severamente lesionada en pacientes con lesión del lóbulo frontal, mientras que mínimamente en pacientes con lesión cerebelosa (Ravizza et al., 2006).

Vielhaber, Ebert, Feistner y Herrmann (2000) realizaron un estudio donde encontraron que los pacientes con atrofia cerebelosa presentan alteraciones cognitivas, mostrando específicamente déficit atencionales, trastornos en las funciones ejecutivas (patrones de conducta desinhibida e incapacidad de control ante el error) y resultados significativamente bajos en memoria de trabajo. Otros estudios (Largade, Hantkie, Hajjioui & Yelnik, 2009; Daum, Snitz & Ackermann, 2001; Owen, Roberts, Hodges, Summers, Polkey & Robbins, 1993) muestran que pacientes con daño cerebeloso presentan alteraciones específicas de la función ejecutiva, tales como pobre rendimiento en la flexibilidad mental (Perseveración de gesto o durante tareas de dibujo y dificultades de inhibición), los autores también reportan deterioro en la planeación y detrimento en las habilidades atencionales, lo cual se evidencia por la dificultad del aprendizaje de secuencias gestuales, mientras que gestos simples se realizan correctamente. Por otro lado Heyder, Suchan y Daum (2004) reportan que pacientes con lesiones cerebelosas presentan déficit ejecutivos, concretamente déficit en planeación, resolución de problemas y razonamiento, fluencia verbal y otras habilidades para la generación de palabras, la formación de conceptos y la organización estratégica de la codificación y la recuperación. Así mismo los autores afirman que hay evidencia neuroimagenológica donde se presenta activación del cerebelo en tareas donde hay a su vez activación prefrontal. En esta línea, Lie, Specht, Marshall y Fink (2006)

detectaron activación de zonas del cerebelo en sujetos sanos durante la ejecución del Wisconsin Card Sorting Test (WCST), el cual es un instrumento altamente utilizado en el ámbito clínico para evaluar funciones ejecutivas y es sensible a la disfunción del lóbulo frontal. En otro estudio (Ravnkilde, Videbeck, Rosenberg, Gjedde, & Gade, 2002) por medio de PET los autores encontraron activación del cerebelo durante la parte de interferencia (Parte III) del Stroop Color Word Test, este es un instrumento generalmente usado para evaluar atención frontal y procesos de inhibición.

Justus y Ivry (2001) realizaron un estudio de revisión sobre evidencia neuropsicológica, donde refieren la implicación del cerebelo en funciones cognitivas, pero específicamente en cuatro funciones: (1) Habla y Lenguaje, (2) Procesamiento Temporal, (3) Aprendizaje Implícito y Memoria y (4) Procesamiento Visuoespacial y atención. Los autores argumentan que las contribuciones al conocimiento del cerebelo son computacionalmente plausibles, dada su conexión recíproca con la corteza cerebral, y sugieren que esta función del cerebelo puede ser un ejemplo de un proceso evolutivo por el cual los mecanismos evolucionaron originalmente para una función (en este caso, el control motor) y se adaptaron a otras funciones (cognición).

Por otro lado, desde el campo empírico un estudio experimental realizado por De Bartolo et al. (2009) para los cuales el cerebelo ejerce un control sobre muchas funciones cognitivas, resaltan la habilidad de conectar un contexto con una respuesta apropiada como una especificidad particular. Para evidenciarlo realizaron un estudio con animales, a los cuales se les realizó una hemisectomía derecha, contrastándolo con animales sanos. Los autores encontraron en los animales hemisectomizados una incapacidad en cuanto a flexibilidad cognitiva se refiere. Los animales presentaban una imposibilidad para adaptarse a los cambios de secuencia. Resaltan los autores que esta incapacidad no se asocia con los déficits motores provocados por la lesión.

Bellebaum y Daum (2007) analizan un estudio realizado por Schmahmann y Sherman (1998) en el cual se examinaron 20 pacientes con daño cerebeloso de diferentes etiologías. En este estudio los autores reportan déficit en las funciones ejecutivas relacionadas con la planificación, ajuste al cambio (Set Shifting), razonamiento abstracto, memoria de trabajo y la fluidez verbal. Schmahmann y Sherman (citados en Bellebaum & Daum, 2007) hacen referencia al patrón complejo del déficit, el cual incluyó otros deterioros cognitivos además de cambios en la personalidad cómo lo es el síndrome cerebeloso cognitivo afectivo. Igual los autores reportan que los pacientes con afectación del lóbulo posterior del cerebelo resultaron ser más gravemente afectados. En este punto, Bellebaum y Daum (2007) sugieren que aunque otros estudios corroboran los hallazgos obtenidos, estos deben ser interpretados con cautela ya que tanto la localización de la lesión cómo la lesión misma, variaban considerablemente en los intervalos de prueba. Los autores refieren que muchos de los pacientes fueron evaluados en la fase aguda después de la lesión cerebelosa y su mejor desempeño, cuando fueron reevaluados de 1 a 9 meses después. Schmahmann y Sherman relacionan los déficit observados con los trastornos de las interacciones cortico-cerebelosa en el procesamiento de la información y argumentan que el cerebelo está relacionado con casi todas las regiones del cerebro y que por lo tanto, muchos trastornos diferentes, tanto cognitivos cómo afectivos, pueden acompañar daño en el cerebelo. Frente a esto Bellebaum y

Daum (2007) argumentan que en la base de los datos, sin embargo, no fue posible relacionar ciertas regiones del cerebelo a los déficits específicos.

En otros estudios similares (Gottwald, Wilde, Mihajlovic & Mehdorn, 2004; Heyder, Suchan & Daum, 2004; Neau, Arroyo-Anllo, Bonnaud, Ingrand & Gil, 2000; Smith & Jonides, 1999) en los cuales se realizó evaluación en la fase aguda de la lesión cerebelosa y otra evaluación tiempo después, se hallaron inconsistencias en comparación con los pacientes y los sujetos control. En periodo agudo de la lesión los pacientes presentaban fallos relativos en la ejecución del stroop test, mostrando problemas de inhibición, pero un año después los resultados en la misma prueba apenas difieren de los resultados de los grupos control.

Para Bellebaum y Daum (2007) la evidencia de un papel del cerebelo en los subcomponentes de las funciones ejecutivas es inconsistente. Aunque refieren que el apoyo más consistente para una participación del cerebelo proviene de la memoria de trabajo y de los datos de fluidez verbal. Resaltan también que muchos de los estudios de lesión realizados no realizan un análisis detallado sobre la relación entre la localización de la lesión y el patrón exacto de los déficits ejecutivos, en cuanto a la gravedad de los déficits, las alteraciones observadas debidas a una disfunción del cerebelo parecen generalmente ser menos pronunciadas que los problemas que se observan después de los daños de la CPF.

Discusión

Los resultados obtenidos por medio de los estudios empíricos, ya sea con pacientes con alteración cerebelosa, estudios experimentales y estudios con neuroimagenología, parecen apoyar la participación activa cerebelo en las funciones ejecutivas. Se observa la correlación entre lesión cerebelosa y disfunción ejecutiva, pudiéndose añadir que la alteración en la función ejecutiva varía dependiendo de la ubicación de la lesión y de su severidad (Gottwald, Wilde, Mihajlovic & Mehdorn, 2004; Daum, Snitz, & Ackermann, 2001; Grafman, Litvan, Massaquoi, Stewart, Sirigu, & Hallett, 1992).

Sin embargo no es clara aún la participación específica de cerebelo, es decir, se pudo observar en este texto que los autores no llegan a un consenso, en cuáles son las alteraciones específicas según el tipo de lesión, además, que diferentes autores han encontrado diferentes manifestaciones en estudios similares, lo cual abre una brecha grande en la especificidad del mismo.

Por otro lado, existen estudios donde pacientes con lesión cerebelosa no manifiestan alteración en las funciones ejecutivas lo cual genera diferentes interrogantes, a saber:

En qué medida las alteraciones motoras provocadas por la lesión cerebelosa afectan en la ejecución de las tareas y los test neuropsicológicos propuestos en las investigaciones revisadas.

Muchos de los pacientes no presentaban alteración específica del cerebelo, entonces, hasta qué punto las otras lesiones corticales o subcorticales eran al igual estructuras importantes para el desarrollo de las funciones ejecutivas.

Los estudios experimentales con animales a los cuales se les manipulaba la lesión específicamente en el cerebelo mostraban claras alteraciones en cuanto a funciones concretas, pero en igual medida hasta qué punto los dos apartados anteriores influyen en esto.

Los estudios imageneológicos evidencian activación cerebelosa durante tareas de función ejecutiva con sujetos sanos, esto podría ser una evidencia clara de la participación activa del mismo en las funciones ejecutivas, pero al igual, el cerebelo al estar tan estrechamente relacionado con el funcionamiento motor, cómo saber hasta qué punto esta activación no es sólo un producto de los movimientos ejecutados por los sujetos durante las tareas propuestas.

Otro aspecto importante e interesante de análisis es lo que respecta a la conectividad anatómica que establecen el cerebelo y la corteza prefrontal (Baillieux et al., 2008; Heyder, Suchan, & Daum, 2004), aquí se pudo observar que muchos de los autores llegan a un posible consenso, es decir hay unas estructuras claras y definidas de cómo se distribuye la información entre ambas estructuras y su retroalimentación, así a grandes rasgos podría decirse que esta conectividad consiste en un bucle cerrado donde participan el cerebelo, la CPF, el núcleo pontino, el núcleo dentado y el tálamo. Estos circuitos neuroanatómicos del cerebelo están lo suficientemente relacionados con las regiones de la CPF como para pensar que la alteración de estas vías o de algunos de estos núcleos podría generar una alteración de las funciones ejecutivas (Heyder, Suchan, & Daum, 2004). Así bajo la evidencia neuroanatómica cabe pensar en una posible e importante implicación del cerebelo a las funciones ejecutivas.

Por último es interesante también pensar sobre de qué forma el cerebelo influye sobre las funciones ejecutivas, podría decirse que posiblemente el cerebelo contribuye a las mismas, más no aseverar que las funciones ejecutivas son parte del funcionamiento del cerebelo, ya que no es lo mismo contribución que función.

El estudio del cerebelo cómo estructura que participa en funciones superiores es un estudio reciente, del cual han surgido diferentes hipótesis obtenidas de diferentes resultados, lo que hace que sea aún un estudio complejo y que se encuentre en fases incipientes. Hace falta muchos más estudios empíricos para demostrar a cabalidad toda la potencialidad que el cerebelo ejerce en los procesos cerebrales de las personas.

Referencias

- Allen, G. & Courchesne, E. (2003). Differential Effects of Developmental Cerebellar Abnormality on Cognitive and Motor Functions in the Cerebellum: An fMRI Study of Autism. *The American Journal of Psychiatry*, 160(10), 262–273.
- Andreasen, N. & Pierson, R. (2008). The Role of the Cerebellum in Schizophrenia. *Biological Psychiatry*, 64(2), 81–88.
- Ardila, A. (2008). On the evolutionary origins of executive functions. *Brain and Cognition*, 68(1), 92–99.
- Baillieux, H., De Smet, H. J., Paquier, P. F., De Deyn, P. P., & Marien, P. (2008). Cerebellar neurocognition: Insights into the bottom of the brain. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, 110(8), 763–773.
- Balsters, J. H. & Ramnani, N. (2008). Symbolic representations of action in the human cerebellum. *NeuroImage*, 43(2), 388–398.
- Bellebaum, C. & Daum, I. (2007). Cerebellar involvement in executive control. *Cerebellum*, 6(3), pp. 184–92.
- Booth, J. R., Wood, L., Lu, D., Houk, J. C., Bitan, T. (2007). The role of the basal ganglia and cerebellum in language processing. *Brain research*, 1133, 136 – 144.
- Brodal, P. & Bjaalie, J. G. (1992). Organization of the pontine nuclei. *Neuroscience Research*, 13(2), 83–118.
- Burgess, P. (2000). Strategy application disorder: The role of the frontal lobes in human multitasking. *Psychology Research*, 63(3-4), 279–88.
- Daum, I., Snitz, B. E., Ackermann, H. (2001). Neuropsychological deficits in cerebellar syndromes. *International Review of Psychiatry*, 13(4), 268–75.
- Damasio, A. (1996). *Descartes' Error: Emotion, reason, and the human brain*. New York, NY: Harper Collins.

- De Bartolo, P., Mandolesi, L., Federico, F., Foti, F., Cutuli, D., Gelfo, F., & Petrosini, L. (2009). Cerebellar involvement in cognitive flexibility. *Neurobiology of Learning and Memory*, 92(3), 310–317.
- Delgado-García, J. M. (2001). Estructura y función del cerebelo. *Revista de Neurología*, 33(7), 635-642.
- Della, S. & Gray, C. (1998). Frontal Lobe Functioning in Man: The Riddle Revisited. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 13(8), 663–682.
- Doya, K. (2000). Complementary roles of basal ganglia and cerebellum in learning and motor control. *Current Opinion in Neurobiology*, 10(6), 732–739.
- Escobar, J. P. & Pimienta, I. E. (1994). *Sistema Nervioso: anatomía, histología y clínica*. Santiago de Cali: Centro editorial Universidad del Valle.
- Glickstein, M., Sultan, F., & Voogd, J. (2009). Functional localization in the cerebellum. *Cortex*, 47(1), 59-80.
- Gottwald, B., Wilde, B., Mihajlovic, Z., & Mehdorn, H. (2004). Evidence for distinct cognitive deficits after focal cerebellar lesions. *Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 75, 1524–31.
- Goldberg, E. (2001). *El Cerebro Ejecutivo*. Barcelona, España: Crítica.
- Grafman, J., Litvan, I., Massaquoi, S., Stewart, M., Sirigu, A., & Hallett, M., (1992). Cognitive planning deficit in patients with cerebellar atrophy. *Neurology*, 42(8), 1493-1496.
- Happé, F. (1994). *Autism: an introduction to psychological theory*. London: University College London.
- Heyder, K., Suchan, B., & Daum, I. (2004). Cortico-subcortical contributions to executive control. *Acta Psychologica*, 115(2-3), 271–289.
- Hughes, C., Russell, J., & Robbins, W. (1994). Evidence for executive dysfunction in autism. *Neuropsychologia*, 32(4), 477-492.
- Ito, M. (1993). Movement and thought: identical control mechanisms by the cerebellum. *Trends in Neuroscience*, 16(11), 448–50.
- Justus, T. & Ivry, R. (2001). The cognitive neuropsychology of the cerebellum. *International Review of Psychiatry*, 13(4), 276–282.
- Kelly, R. & Strick, P. (2009). Cerebellar loops with motor cortex and prefrontal cortex of a nonhuman primate. *Journal of Neuroscience*, 23(23), 8432–44.
- Lagarde, J., Hantkiewicz, O., Hajjioui, A., & Yelnik, A. (2009). Neuropsychological disorders induced by cerebellar damage. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 52(4), 360–370.
- Lalonde, R. & Botez-Marquard, T. (2000). Neuropsychological deficits of patients with chronic or acute cerebellar lesions. *Journal of Neurolinguistics*, 13(2-3), 117-128.
- Lezak, M. (1982). The problem of assessing executive functions. *International Journal of Psychology*, 17(1-4), 281-97.
- Lie, C., Specht, K., Marshall, J., & Fink G. (2006). Using fMRI to decompose the neural processes underlying the Wisconsin Card Sorting Test. *NeuroImage*, 30(3), 1038–1049.
- Martin, R., González, P., Izquierdo, M., Hernández S., Alonso M., Quintero, I. & Rubio B. (2008). Evaluación neuropsicológica de la memoria en el trastorno por déficit de atención/hiperactividad: papel de las funciones ejecutivas. *Revista de neurología*, 47(5), 225-230.
- Neau, J., Arroyo-Anllo, E., Bonnaud, V., Ingrand, P., & Gil R. (2000). Neuropsychological disturbances in cerebellar infarcts. *Acta Neurológica Scandinava*, 102(6), 363–70.
- Ozonoff, S. & Strayer, D. (1997). Inhibitory function in nonretarded children with autism. *Journal of autism and developmental disorders*, 27(1), pp. 59-77.
- Owen, A., Roberts, A., Hodges, J., Summers, B., Polkey, C., & Robbins T. W. (1993). Contrasting mechanisms of impaired attentional set-shifting in patients with frontal lobe damage or Parkinson's disease. *Brain*, 116(5), 1159–1175.
- Rammani, N. (2006). The primate cortico-cerebellar system: Anatomy and function. *Nature Reviews Neuroscience*, 7, 511–522.
- Rammani, N., Behrens, T., Johansen-Berg, H., Richter, M., Pinski, M., Andersson, J., Rudebeck, P., Ciccirelli, O., Richter, W., Thompson, A., Gross, C., Robson, M., Kastner, S., & Matthews, P. (2006). The evolution of prefrontal inputs to the cortico-pontine system: Diffusion imaging evidence from Macaque monkeys and humans. *Cerebellar Cortex*, 16(8), 811.
- Ravizza, S., McCormick, C., Schlerf, J., Justus, T., Ivry, R., & Fiez, J. (2006). Cerebellar damage produces selective deficits in verbal working memory. *Brain*, 129(2), 306–20.
- Ravnikilde, B., Videbech, P., Rosenberg, R., Gjedde, A., & Gade, A. (2002). Putative Tests of Frontal Lobe Function: A PET-Study of Brain Activation During Stroop's Test and Verbal Fluency. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 24(4), 534 – 547.
- Salih, F., Breuer, E., Harnack, D., Hoffmann, K., & Ploner C. (2010). A syndrome of the dentate nucleus mimicking psychogenic ataxia. *Journal of the Neurological Sciences*, 290(1-2), 183–185.
- Schmahmanns, J. & Pandya, D. (1995). Prefrontal cortex projections to the basilar pons in rhesus monkey: implications for the cerebellar contribution to higher function. *Neuroscience Letters*, 199(3), 175-178.
- Schmahmann, J. & Pandya D. (1997). Anatomic organization of the basilar pontine projections from prefrontal cortices in rhesus monkey. *Journal of Neuroscience*, 17(1), 438–458.
- Schmahmann, J., Rosene, D., & Pandya D. (2004). Motor projections to the basis pontis in rhesus monkey. *The Journal of Comparative Neurology*, 478(3), 248–68.
- Schmahmann, J., Macmorea, J., & Vangelb, M. (2009). Cerebellar stroke without motor deficit: clinical evidence for motor and non-motor domains within the human cerebellum. *Neuroscience*, 162(3), 852–861.
- Sholberg, M. & Mateer, C. (1989). *Cognitive Rehabilitation: Introduction to Theory and Practice*. New York: Guilford Press.
- Smith, E. & Jonides J. (1999). Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science*, 283(5408), 1657–1661.
- Stoodley, C. & Schmahmann, J. (2010). Evidence for topographic organization in the cerebellum of motor control versus cognitive and affective processing. *Cortex*, 46(7), 831-844.
- Thach, W. (1998). What is the role of the cerebellum in motor learning and cognition? *Trends in Cognitive Sciences*, 2(9), 331-337.
- Tsuchiyaa, K., Watabikic, S., Sanod, M., Iobeb, H., Shiotsue, H., Taki, K., & Hashimoto K. (1998). Distribution of cerebellar cortical lesions in multiple system atrophy: a topographic neuropathological study of three autopsy cases in Japan. *Journal of Neurological Sciences*, 155(1), 80–85.
- Vielhaber, S., Ebert, A., Feistner, H., & Herrmann, M. (2000). Case report: Frontal-executive dysfunction in early onset cerebellar ataxia of Holmes' type. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, 102(2), 102–105
- Voogd, J. & Glickstein, M. (1998). The anatomy of the cerebellum. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(9), 307-313.
- Wolpert, D., Miall, R., & Kawato, M. (1998). Internal models in the cerebellum. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(9), 338-347.
- Wolpert, D. & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature Neuroscience*, 3, 1212–1217.