

Correlación del funcionamiento ejecutivo y la potencia absoluta del EEG en niños

Marlene Galicia-Alvarado,¹ Blanca Flores-Ávalos,² Ana Sánchez-Quezada,² Óscar Yáñez-Suárez,³ Héctor Brust-Carmona¹

Artículo original

ABSTRACT

Introduction

The resting EEG power is considered as a robust marker of brain function; however, a few studies have associated it to a specific function.

Objective

To analyze the relationship between EEG absolute power (AP) with performance on tasks of executive functioning in children.

Method

Correlational cross-sectional study of 30 children (8.6 ± 1 year). EEG was performed with eyes closed and bipolar leads. With the Fourier transform AP was calculated in the spectrum of 1.6, 30 Hz. NEUROPSI Attention and Memory was applied and the Index of Attention and Executive functions (IAFE) was calculated. Based on this, the AP was compared with Kruskal-Wallis and the Z value, Spearman coefficient for correlation with the subtests.

Results

Children with severe impairment ($\bar{x} = 63 \pm 8$ CI 95% [57.2, 68.5]) had higher delta AP ($\alpha \leq .05$) in F1F7, P301 and P402, and Z values near 2 SD in F7T3, F3C3 and F8T4 at slow frequencies. Correlations were significant between the IAFE and delta AP P301 (-.57), P402 (-.43) and T5O1 (-.37); with AP alpha mainly on left fronto-temporo-parietal-occipital areas. The score in Visual Detection and Semantic Fluency inversely related to AP alpha frequency.

Discussion and conclusion

Performance on tasks of executive functioning is different in relation to the frontal and parietal AP delta. There is an inverse relationship between AP delta and alpha at rest with attention and verbal fluency.

Key words: qEEG, absolute power, schoolchildren, executive function.

RESUMEN

Introducción

La potencia espectral en reposo a menudo se considera como un marcador robusto de la función cerebral; sin embargo, pocos estudios la han asociado con una función específica.

Objetivo

Analizar la relación entre la potencia absoluta (PA) del EEG con el desempeño en las tareas de funcionamiento ejecutivo en niños.

Método

Investigación transversal correlacional en 30 niños (8.6 ± 1 años). Se realizó el EEG con ojos cerrados y análisis de derivaciones bipolares. Con la transformada de Fourier se calculó la PA en el espectro de 1.6-30 Hz. Se aplicó la batería NEUROPSI Atención y Memoria y se calculó el Índice de Atención y Funciones Ejecutivas (IAFE). En función de éste, se comparó la PA con Kruskal-Wallis y valor Z, coeficiente de Spearman para la correlación con las subpruebas.

Resultados

Los niños con alteraciones severas ($\bar{x} = 63 \pm 8$ IC 95% [57.2, 68.5]) tuvieron mayor PA delta en F1F7, P301 y P402, así como valores Z cercanos a 2 DE en F7T3, F3C3 y F8T4 en frecuencias lentas. Las correlaciones fueron significativas ($\rho, p \leq .05$) entre el IAFE con la PA delta en P301 (-.57), P402 (-.43) y T5O1 (-.37); con PA alfa principalmente en zonas fronto-temporo-parieto-occipitales izquierdas. La puntuación en Detección Visual y Fluidez Semántica se relacionó con la PA alfa.

Discusión y conclusión

El rendimiento en actividades de FE es diferente en relación con la PA delta frontal y parietal. Existe una relación inversa entre la PA delta y alfa en reposo con la atención y fluidez (245/250).

Palabras clave: EEGc, potencia absoluta, niños, funciones ejecutivas.

¹ Laboratorio de Electroencefalografía, Instituto Nacional de Rehabilitación.

² Servicio de Electrodiagnóstico, Instituto Nacional de Rehabilitación.

³ Laboratorio de Imagenología, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

Correspondencia: Mtra. Marlene Galicia-Alvarado. Laboratorio de Electroencefalografía, Instituto Nacional de Rehabilitación. Calz. México-Xochimilco 289, Arenal Guadalupe, Tlalpan, 14389, Ciudad de México. E-mail: magalicia@inr.gob.mx, marlenegalicia@gmail.com

Recibido primera versión: 8 de junio de 2015. Segunda versión: 8 de junio de 2016. Aceptado: 26 de agosto de 2016.

INTRODUCCIÓN

Funciones ejecutivas (FE)

En términos generales, las FE abarcan los procesos cognoscitivos que subyacen al comportamiento dirigido a metas y participan en el control, la regulación y la planeación eficiente de la conducta humana. Entre estas funciones destacan la atención selectiva y concentración, la memoria de trabajo, control inhibitorio, planeación, flexibilidad, así como procesos de metacognición que se han atribuido a la actividad de la corteza prefrontal.^{1,2} Aun cuando existe controversia acerca de si las FE son un constructo unitario, o bien, un conjunto de componentes independientes, la evidencia apoya la idea de múltiples componentes relacionados y dissociables entre sí, a partir de los cuales es posible examinar el desarrollo del funcionamiento ejecutivo.³⁻⁵ En cuanto a la génesis del funcionamiento ejecutivo, el planteamiento de un desarrollo no lineal, secuencial y jerárquico, en el que algunas FE básicas como la atención, el control inhibitorio y la memoria de trabajo, preceden y soportan el desarrollo de otras más complejas (categorización y fluidez verbal) es cada vez es más aceptado.⁶⁻⁸

En las neurociencias del desarrollo, es sabida la relevancia y pertinencia de determinar la posible relación entre la actividad funcional de ciertas estructuras cerebrales con el desempeño en tareas o paradigmas cognoscitivos específicos;⁹ sin embargo, la mayoría de las investigaciones de FE se ha centrado en niños en edad preescolar o con una patología específica dejando a un lado el desarrollo del funcionamiento ejecutivo en edades escolares.

EEG en reposo

Tradicionalmente, el estado de vigilia en reposo ha sido una de las condiciones basales ampliamente utilizadas para las investigaciones del electroencefalograma (EEG). Desde los primeros registros electrofisiológicos, se ha observado que las neuronas no sólo responden (potenciales postsinápticos) a eventos sensoriales o conductuales, sino también de forma variable y aparentemente impredecible en un estado de reposo. En este contexto experimental clásico, tal actividad se ha considerado estática (fondo o "ruido") y sin aparente correlato funcional. Evidencias actuales sugieren que la actividad espontánea se expresa coherentemente en extensas poblaciones neuronales y funcionalmente significativas desde edades tempranas en el desarrollo.¹⁰⁻¹⁶ En este sentido, diversos autores han relacionado de manera inversa la actividad espontánea con diferentes procesos cognoscitivos.¹⁷⁻²⁴ Sin embargo, aun cuando se ha sugerido una estrecha relación entre el rendimiento cognoscitivo y la actividad oscilatoria intrínseca, poco se sabe acerca de la participación del espectro de potencia EEG en procesos del funcionamiento ejecutivo en la población escolar. Las medidas cuantitativas

del EEG, como la potencia absoluta, ofrecen la posibilidad de medir de manera exacta la amplitud y frecuencia de las oscilaciones de un conjunto neural dado en tiempo real y con ello identificar cambios sutiles en los tipos y patrones de actividad eléctrica que pueden ser contrastados para fines de diagnóstico, tratamiento y rehabilitación/corrección de FE en población infantil.

Por tanto, el objetivo del presente trabajo fue comparar la potencia absoluta (PA) en las cuatro bandas clásicas del EEG,^{25,26} en función del rendimiento en el funcionamiento ejecutivo, así como analizar su posible relación en una muestra de niños escolares.

MÉTODO

Diseño

Investigación transversal descriptiva-correlacional.

Participantes

La selección de la muestra fue no probabilista de tipo intencional de niños de siete a 10 años de edad, provenientes de escuelas primarias públicas y de población general, con participación voluntaria, consentimiento y asentimiento informado. La inclusión en el estudio se basó en una entrevista estructurada con los padres de los menores, considerando los siguientes criterios: 1) antecedentes prenatales, perinatales y neonatales sin incidentes y 2) ausencia de alteraciones neurológicas (traumatismo craneoencefálico, enfermedades del Sistema Nervioso Central, epilepsia, convulsiones, cefaleas paroxísticas, enuresis o encopresis después de los cuatro años de edad, tics, tartamudeos, trastorno generalizado del desarrollo, trastorno por déficit de atención, lenguaje o aprendizaje). Los criterios de exclusión fueron: 1) signos de depresión, ansiedad, oposicionista desafiante u otro trastorno de inicio en la infancia acorde a los criterios del DSM-IV-TR vigente al momento del estudio y 2) presencia de electromorfogramas anormales en el EEG (trenes de ondas delta o theta de voltaje cuatro veces superior a la actividad de fondo y ondas agudas). Ninguno de los menores estuvo bajo medicación durante el curso del estudio. El protocolo fue aprobado por los Comités de Ética e Investigación del INR con apego a los criterios de la declaración de Helsinki.

Instrumentos

Por medio del Cuestionario para Padres y la Historia Clínica de la Evaluación Neuropsicológica Infantil (ENI),²⁷ se realizó la recopilación de la historia de desarrollo y aprendizaje de los niños. Se empleó la batería neuropsicológica NEUROPSI Atención y Memoria²⁸ para medir el funcionamiento cognoscitivo general de los participantes en proce-

sos de atención, memoria, lenguaje y funciones ejecutivas. Conforme al objetivo del presente trabajo, se presentan los resultados obtenidos en el Índice de Atención y Funciones Ejecutivas (IAFE) y dos subpruebas de memoria de trabajo (dígitos y cubos en regresión).

El IAFE engloba el rendimiento en 12 subpruebas que valoran el nivel de alerta (orientación), atención y concentración (dígitos y cubos en progresión, detección de dígitos, series sucesivas, detección visual), formación de conceptos (formación de categorías), fluidez verbal (semántica y fonológica), fluidez no verbal (diseños), inhibición (*stroop*) y funciones motoras (movimientos oculares conjugados, instrucciones conflictivas, paradigma *go/no go*, secuencias motoras de Luria y dibujos secuenciales). Los parámetros de normalización en población mexicana permiten clasificar la ejecución de una persona en un rango normal alto (116 en adelante), normal (85 a 115), alteración leve a moderada (70 a 84) o alteración severa (69 o menos). Las puntuaciones normalizadas tienen una media de 100 y una *DE* de 15.^{29,30}

Procedimiento

Con cada uno de los padres o tutores de los niños candidatos a participar en el presente estudio se realizó la recopilación de la historia de desarrollo y aprendizaje. Los menores sin antecedentes de trastornos psiquiátricos o trastornos en el desarrollo fueron seleccionados para la valoración electroencefalográfica y neuropsicológica. El EEG se realizó dentro de una cámara de Faraday, con baja iluminación y temperatura semi-controlada, mediante un electroencefalógrafo digital (Nicolet One de 31 canales) de acuerdo con el sistema internacional 10/20, con impedancia menor a 10 kΩ. Durante el registro, los niños estuvieron en posición de decúbito dorsal en reposo, con los párpados cerrados; se les indicó que debían mantener dicha postura sin movimientos corporales ni faciales por un intervalo de 5 minutos. Se empleó un montaje bipolar para derivaciones laterales (F1F7, F7T3, T3T5, T5O1 y F2F8, F8T4, T4T6, T6O2) y parasagitales (F1F3, F3C3, C3P3, P3O1 y F2F4, F4C4, C4P4, P4O2), adicionalmente se registró el electrooculograma, colocando un electrodo en el borde paraocular de cada ojo, y el electrocardiograma. El registro EEG se realizó con filtros pasabanda de 0.5 a 70 Hz, con filtro de rechazo de 60 Hz, y para el análisis cuantitativo se empleó un ancho de banda de 1.6 a 30 Hz. Todas las señales fueron digitalizadas (256 Hz) y almacenadas para su posterior análisis analógico y cuantitativo.

Fuera de línea, un especialista en neurofisiología del desarrollo observó todo el registro para su evaluación y reporte clínico. A partir de dicha valoración, se seleccionaron aquellos registros con ausencia de hallazgos electroencefalográficos anormales (patología cerebral o grafoelementos anormales) y para cada participante, en la condición de OC, se eligieron tres segmentos de 12 segundos cada uno libres de artefactos. Las muestras del EEG fueron analizadas apli-

cando la transformada de Fourier (TF) para obtener la potencia absoluta de las bandas de frecuencia delta (1.6 - 4), theta (4.5 - 8), alfa (8.5 - 13.0) y beta (13.5 - 30 Hz). Los valores de la PA en cada banda de frecuencia se convirtieron en puntuaciones estándar ($Z \text{ PA delta} = (\text{PA delta paciente} - \text{PA delta población}) / [\sigma \text{ de la PA delta}]$). Los valores Z por arriba o por debajo de 2.0 desviaciones estándar (*DE*) se consideraron fuera de la norma.³¹

Al terminar el registro EEG, se aplicó a cada uno de ellos la batería neuropsicológica NEUROPSI Atención y Memoria. La valoración en todos los casos fue a la misma hora en un cubículo con adecuada iluminación y ventilación. El proceso de evaluación fue lo más exhaustivo posible y se evitó llegar al límite de fatiga cognoscitiva. Una vez obtenidas las puntuaciones naturales de las 30 subpruebas, se procedió a calcular la puntuación total del área de IAFE y a realizar la conversión en la puntuación normalizada equivalente de acuerdo con la edad de cada participante. A partir de dicho puntaje, se clasificó el desempeño de los niños en tres grupos: normal (85 a 115), alteración leve a moderada (70 a 84) y alteración severa (69 o menos), realizando pares por género. Cabe mencionar que todas las valoraciones fueron conducidas por el mismo personal y sin previo conocimiento sobre los antecedentes neurobiológicos o los resultados de las valoraciones practicadas para evitar la subjetividad en la evaluación de los participantes.

Análisis estadístico

Se utilizaron estadísticos de tendencia central para la descripción de datos sociodemográficos, rendimiento cognoscitivo y potencia de las frecuencias mencionadas. Posteriormente, se realizaron pruebas de normalidad (Kolmogórov-Smirnov) y se calculó el valor Z para comparar la PA entre los grupos. En función del IAFE se empleó la prueba de Kruskal-Wallis para comparar la PA en las cuatro bandas de frecuencia. Para el análisis de la relación entre las variables se empleó el coeficiente de correlación por rangos de Spearman y se calcularon los valores estimados de los coeficientes de correlación en un IC 95% para cada una de las subpruebas administradas. El análisis se llevó a cabo por medio del programa SPSS, versión 19 (SPSS Inc, Chicago, IL).

RESULTADOS

Se reclutaron un total de 50 participantes, de los cuales se excluyeron a 16 por la presencia de antecedentes neurológicos en el desarrollo y/o la presencia de electromiogramas anormales; cuatro niños más se eliminaron por no concluir con las valoraciones neuropsicológicas o electrofisiológicas. La muestra final del estudio se conformó por 15 niños y 15 niñas (8.6 ± 1 años), sin antecedentes de alteraciones psiquiátricas o trastornos del desarrollo y adecuado des-

Tabla 1. Características de los participantes

	Alteraciones severas	Alteraciones moderadas	Normal
Masculino	5	5	5
Femenino	5	5	5
Edad	8.1 ± 0.3	8.3 ± 0.2	9.4 ± 0.3
Escolaridad	6.1 ± 0.3	6.3 ± 0.2	7.4 ± 0.3

empeño escolar (promedio escolar mayor o igual a 8 de un máximo de 10) (tabla 1).

El puntaje promedio del IAFE fue de 80.0 ± 17.5 IC 95% [73.4, 86.5] con una distribución normal ($K - S = .13$, $p = .17$); no se encontraron diferencias en función del género ($\chi^2 = 0.00$, $p = 1.0$), edad ($\chi^2 = 4.7$, $p = .09$) ni escolaridad ($\chi^2 = 6.3$, $p = .08$). La distribución de la PA de las cuatro frecuencias en las distintas derivaciones no siguió una curva normal. Para igualar la variabilidad de los valores de potencia se realizó la tipificación de los valores en puntuaciones Z (tablas 2 y 3).

Se encontraron diferencias significativas ($\chi^2 = 25.87$, $\alpha \leq .000$) en el IAFE del grupo con alteraciones severas IC 95% 57.2, 68.5 puntos), alteraciones moderadas IC 95%

Tabla 2. Potencia absoluta (μV^2) del espectro de frecuencia delta y theta en función del Índice de Atención y Funciones Ejecutivas*

	DELTA M (DE) [Z]			THETA M (DE) [Z]		
	Alteraciones severas	Alteraciones moderadas	Normal	Alteraciones severas	Alteraciones moderadas	Normal
	n = 10	n = 10	n = 10	n = 10	n = 10	n = 10
F1F7	16.6 (7.9) [1.2]	10.4 (4.8) [-0.1]	11.0 (4.7)	4.4 (1.8) [-0.1]	5.5 (3.9) [0.5]	4.6 (1.5)
F7T3	7.4 (4.2) [1.8]	7.2 (2.3) [1.7]	5.0 (1.3)	3.9 (1.4) [0.2]	5.7 (3.7) [1.3]	3.5 (1.6)
T3T5	8.0 (3.2) [0.5]	8.0 (3.7) [0.5]	5.9 (3.8)	5.6 (2.3) [0.3]	6.6 (3.7) [0.6]	4.7 (2.9)
T5O1	9.4 (5.1) [1.0]	9.2 (4.6) [0.9]	6.3 (3.1)	7.9 (4.3) [0.2]	8.9 (5.0) [0.4]	7.1 (3.6)
F2F8	14.2 (7.5) [1.1]	11.4 (6.2) [0.3]	10.2 (3.6)	4.2 (1.5) [0.0]	4.7 (2.6) [0.3]	4.2 (1.4)
F8T4	6.7 (2.6) [1.3]	7.1 (2.4) [1.6]	5.1 (1.2)	3.2 (1.1) [-0.2]	6.0 (4.5) [1.5]	3.5 (1.5)
T4T6	6.6 (3.2) [-0.0]	8.1 (3.2) [0.3]	7.0 (4.1)	5.7 (4.3) [-0.0]	6.9 (2.8) [0.1]	6.3 (4.7)
T6O2	13.0 (7.1) [0.1]	11.3 (6.1) [0.0]	11.4 (14.9)	11.6 (5.9) [0.3]	13.7 (8.3) [0.6]	8.6 (7.6)
F1F3	13.7 (8.0) [0.7]	9.7 (3.9) [-0.1]	10.4 (4.8)	4.8 (2.4) [-0.4]	6.8 (4.0) [0.6]	5.6 (1.8)
F3C3	8.4 (2.7) [0.9]	9.7 (4.0) [1.5]	6.3 (2.2)	6.4 (2.5) [0.0]	9.5 (6.1) [1.4]	6.2 (2.3)
C3P3	6.2 (3.2) [0.3]	7.7 (3.0) [0.9]	5.5 (2.5)	5.7 (3.2) [0.1]	8.9 (5.1) [1.5]	5.3 (2.3)
P3O1	13.0 (5.0) [1.8]	9.5 (4.0) [0.6]	7.8 (3.0)	11.1 (5.2) [0.4]	11.3 (5.2) [0.4]	9.1 (4.4)
F2F4	12.5 (6.0) [0.4]	11.6 (6.4) [0.2]	10.3 (6.0)	4.6 (2.2) [-0.1]	6.5 (3.1) [1.4]	4.8 (1.2)
F4C4	7.6 (1.9) [0.2]	8.7 (3.2) [0.8]	7.2 (1.9)	6.1 (1.9) [-0.2]	9.4 (6.0) [0.6]	7.0 (4.0)
C4P4	5.9 (2.1) [-0.3]	7.4 (4.0) [0.2]	6.9 (3.5)	0.4 (3.4) [-0.4]	8.2 (4.6) [0.2]	7.7 (6.2)
P4O2	14.6 (5.8) [0.3]	11.5 (7.1) [0.0]	11.1 (10.9)	13.0 (6.0) [0.3]	14.3 (7.5) [0.5]	10.4 (7.4)

*IAFE: Alteraciones severas (63 ± 8 puntos), alteraciones moderadas (77 ± 3 puntos) y rendimiento normal (97 ± 10).

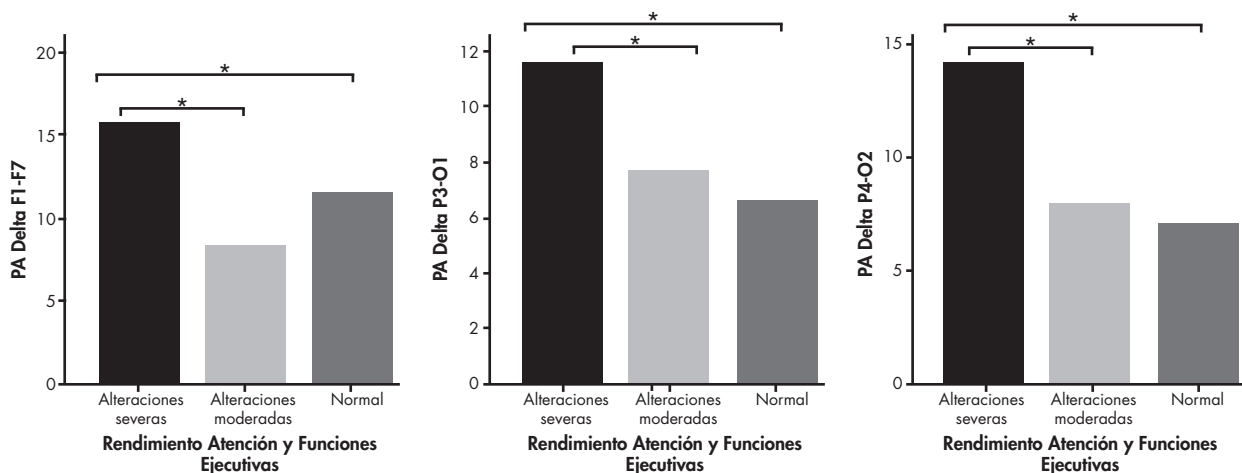
**Figura 1.** Diferencias en la potencia absoluta de la frecuencia delta entre los tres grupos.

Tabla 3. Potencia absoluta (μV^2) del espectro de frecuencia alfa y beta en función del Índice de Atención y Funciones Ejecutivas*

	«ALFA»			«BETA»		
	Alteraciones severas	Alteraciones moderadas	Normal	Alteraciones severas	Alteraciones moderadas	Normal
F1F7	3.0 (1.3) [0.5]	2.2 (1.2) [-0.1]	2.4 (2.4)	4.3 (4.2) [0.7]	2.0 (0.9) [-0.7]	3.2 (1.4)
F7T3	4.1 (1.7) [1.0]	3.8 (2.3) [0.8]	2.8 (1.2)	3.1 (1.6) [-0.0]	2.7 (2.1) [-0.3]	3.2 (1.3)
T3T5	10.9 (6.4) [0.6]	8.2 (5.8) [0.2]	6.6 (6.8)	3.6 (2.5) [0.7]	2.8 (1.9) [0.1]	2.7 (1.1)
T5O1	20.7 (13.8) [0.4]	16.4 (11.0) [0.1]	14.9 (13.7)	3.4 (1.4) [0.6]	3.4 (1.3) [0.6]	2.7 (1.0)
F2F8	3.0 (1.2) [1.0]	2.5 (2.0) [0.4]	2.2 (0.87)	4.2 (3.6) [1.3]	2.1 (1.1) [-0.5]	2.7 (1.1)
F8T4	4.1 (2.1) [1.0]	4.5 (2.6) [1.3]	2.9 (1.2)	2.8 (1.2) [1.2]	3.0 (2.2) [1.4]	2.0 (0.6)
T4T6	9.3 (7.8) [0.1]	14.7 (13.1) [1.0]	8.4 (6.5)	3.2 (1.5) [0.9]	3.0 (1.7) [0.6]	2.5 (0.7)
T6O2	33.6 (27.7) [0.4]	21.4 (16.4) [0.0]	22.5 (28.2)	4.6 (2.9) [0.6]	3.9 (2.2) [0.3]	3.2 (2.2)
F1F3	3.9 (3.8) [1.9]	2.4 (1.1) [-0.3]	2.6 (0.7)	4.0 (3.3) [0.6]	2.1 (0.9) [-0.8]	3.1 (1.2)
F3C3	7.3 (3.9) [1.4]	5.7 (2.3) [0.6]	4.4 (2.1)	3.0 (0.9) [0.5]	2.1 (1.1) [-0.3]	2.5 (0.9)
C3P3	11.0 (5.5) [0.7]	14.7 (14.8) [1.4]	7.3 (5.2)	2.3 (1.0) [-0.2]	2.6 (1.5) [-0.0]	2.6 (1.2)
P3O1	38.1 (31.2) [0.8]	24.0 (17.4) [0.1]	22.6 (18.8)	4.3 (1.7) [0.1]	4.5 (1.7) [0.2]	3.8 (2.6)
F2F4	3.0 (1.4) [0.3]	2.6 (1.2) [0.1]	2.3 (0.7)	4.6 (4.5) [1.1]	2.2 (0.9) [-0.5]	3.0 (1.3)
F4C4	7.9 (5.8) [0.1]	8.3 (5.6) [0.1]	7.4 (5.8)	2.9 (0.5) [0.1]	2.5 (1.3) [-0.3]	2.8 (1.0)
C4P4	13.1 (9.9) [0.8]	17.6 (21.0) [1.6]	8.2 (7.4)	2.0 (0.6) [-0.7]	2.3 (1.3) [-0.5]	3.4 (1.8)
P4O2	41.8 (38.0) [0.5]	32.9 (29.0) [0.2]	28.1 (26.7)	4.5 (2.4) [0.1]	5.5 (2.3) [0.4]	4.1 (3.0)

*IAFE: Alteraciones severas (63 ± 8 puntos), alteraciones moderadas (77 ± 3 puntos) y rendimiento normal (97 ± 10).« μV^2 ($\pm DE$) [Z]

[74.4, 79.1 puntos] y rendimiento normal IC 95% [89.4, 103.5]. El rendimiento de los participantes en las subpruebas aplicadas se encontró acorde a lo esperado a su edad, a excepción de las subpruebas de Dígitos en progresión y Detección de dígitos, en los cuales el puntaje se encontró con alteraciones moderadas (tabla 4).

Por otra parte, se encontraron diferencias en la PA de la frecuencia delta entre los tres grupos. El grupo con alte-

raciones severas mostró mayor PA delta ($\alpha \leq .05$; IC 95%) en las derivaciones F1-F7 [16.68, 16.52], P3-O1 [12.87, 13.03] y P4-O2 [14.59, 14.75] con respecto al grupo con alteraciones moderadas F1F7 [10.27, 10.43]; P3O1 [9.39, 9.55]; P4O2 [11.41, 11.57] y rendimiento normal F1F7 [10.87, 11.03]; P3O1 [7.73, 7.89]; P4O2 [11.01, 11.17] (tabla 2, figura 1). No se encontraron diferencias en la PA en función del género ni en el resto de frecuencias.

Acorde al valor Z, la potencia absoluta delta en las derivaciones F7T3, P3O1, F3C3 y F8T4, fue mayor en aproximadamente 2 unidades DE en el grupo con alteraciones moderadas o severas en el IAFE. De igual forma, todos los niños con alteraciones moderadas mostraron mayor PA theta ($Z \approx +1.5$ DE) particularmente en F7T3, F3C3, C3P3, F8T4 y F2F4. En el grupo con rendimiento normal, se observó menor PA alfa en las derivaciones F1F3 y F3C3 (con respecto al grupo con alteraciones severas) así como C3P3 y C4P4 (con respecto al grupo con alteraciones moderadas). Por último, la PA beta en las derivaciones F2F8 y F8T4 fue ligeramente mayor ($Z \approx 1.3$ DE) en los niños con alteraciones en el IAFE (tabla 3).

En cuanto al grado de asociación lineal entre la potencia absoluta y el rendimiento ejecutivo, se encontraron correlaciones significativas (ρ ; IC 95%) entre el IAFE y la PA delta en T5O1 [-0.3, -0.5], P3O1 [-0.5, -0.7] y P4O2 [-0.3, -0.5] así como con la PA de alfa en T3T5 [-0.4, -0.6], T5O1, F8T4, F3C3, C3P3, P3O1 y C4P4 [-0.3, -0.5]. En las frecuencias theta y beta no se encontraron correlaciones con el índice IAFE.

Las subpruebas que se relacionaron ($p \leq 0.05$) con mayor frecuencia con la frecuencia alfa fueron la fluidez verbal semántica (F8T4, F7T3, T3T5, T6O2, T5O1, F3C3, C3P3,

Tabla 4. Puntuaciones naturales de las subpruebas de funcionamiento ejecutivo en la muestra de niños ($n = 30$)

	M (DE)	IC 95%
IAFE	80.0 (17.5)	73.4 – 86.5
Orientación (7)*	6.0 (1.5)	5.4 – 6.5
Dígitos progresión (9)	4.5 (0.8)	4.2 – 4.8
Cubos progresión (9)	5.1 (1.1)	4.7 – 5.5
Dígitos regresión (8)	3.3 (0.8)	3.0 – 3.6
Cubos regresión (9)	4.5 (1.1)	4.0 – 4.9
Detección visual (24)	10.4 (4.2)	8.8 – 12.0
Detección dígitos (10)	5.3 (2.7)	4.3 – 6.4
Serie sucesivas (3)	1.3 (1.2)	0.8 – 1.8
Categorías (25)	10.9 (4.6)	9.1 – 12.6
Fluidez semántica (28)	16.6 (4.4)	14.9 – 18.2
Fluidez fonológica (28)	8.3 (3.7)	6.9 – 9.6
Fluidez no verbal (35)	9.0 (3.1)	7.9 – 10.2
Funciones motoras (20)	16.9 (2.2)	16.1 – 17.8
Stroop tiempo	64.8 (20.2)	57.3 – 72.4
Stroop aciertos (36)	31.7 (3.7)	30.3 – 33.1

IAFE: Índice de atención y funciones ejecutivas.

M (DE): Media (desviación estándar).

*Puntuación máxima.

C4P4, P3O1 y P4O2), Detección Visual (F2F8, F8T4, T3T5, T5O1, F1F3, F3C3, C4P4 y P3O1) y la Formación de Categorías (F8T4, T4T6, T3T5) con coeficientes de correlación en el intervalo comprendido IC 95% [-0.3, -0.5]. Cabe destacar que en esta última subprueba, se encontraron coeficientes de -0.5, -0.7 en T5O1, P3O1 y P4O2. La PA de beta se relacionó frecuentemente con la Fluidez Verbal fonológica en F2F8, T6O2, F4C4 y P4O2 ($\rho = -0.3, -0.5$) y con la Fluidez no Verbal en F8T4 y T4T6 ($\rho = -0.5, -0.7$); esta última también se relacionó de manera inversa con la PA de delta y theta en F7T3 ($\rho = -0.6, -0.7$).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

En el registro EEG en condiciones de reposo, identificamos que la potencia absoluta en la frecuencia delta fue mayor en casi todas las derivaciones del grupo con alteraciones severas en FE. Específicamente, mostraron mayor PA en regiones frontales izquierdas y parieto-occipitales bilaterales al compararlos con los otros dos grupos. Asimismo, aun cuando no se encontró una diferencia estadísticamente significativa en las derivaciones fronto-temporales entre los grupos, es preciso señalar que los niños con alteraciones moderadas o severas presentaron mayor PA (cercano a 2 *DE*) en la frecuencia delta en comparación con el grupo con rendimiento normal. De igual forma, los niños con alteraciones moderadas también mostraron un incremento en la potencia theta (≈ 1.5 *DE*) en derivaciones fronto-temporales y centro-parietales del hemisferio izquierdo.

En este sentido, algunos autores han reportado un incremento significativo en la potencia, tanto absoluta como relativa, en condiciones de reposo en bandas de frecuencia lentas en niños con dificultades de aprendizaje,^{32,33} trastornos en lecto-escritura^{20,34,35} y TDAH³⁶⁻³⁹ que se ha interpretado como un indicador de retraso en la maduración del Sistema Nervioso Central con respecto a sus pares.

Por otra parte, al igual que otros trabajos que vinculan anormalidades conductuales y/o cognitivas (especialmente atencionales) con "exceso de alfa" en regiones fronto-centrales⁴⁰⁻⁴² y centro-parietales,⁴² en nuestra muestra de niños con alteraciones en atención y funcionamiento ejecutivo, también observamos mayor potencia absoluta en la frecuencia alfa en regiones frontales (F1F3, $Z = 1.9$), fronto-centrales (F3C3, $Z = 1.4$) y centro-parietales (C3P3, $Z = 1.4$; C4P4, $Z = 1.6$). Cabe destacar que en el estudio de Clarke,⁴² los autores reportaron un incremento significativo en la potencia de alfa frontal y central en un subtipo de niños con TDAH y la diferencia en puntaje *Z* con respecto al grupo control sólo fue cercana a +1 *DE*. Asimismo, Chabot & Serfontein,⁴⁰ describieron que los niños con un coeficiente intelectual (CI) bajo tenían mayor PA en la frecuencia alfa en las regiones frontales con respecto a los niños con un CI normal.

Al igual que otras investigaciones con adultos,^{43,44} en este estudio encontramos correlaciones entre el rendimiento ejecutivo y la actividad cerebral espontánea. En relación con la frecuencia delta, las regiones significativas fueron principalmente posteriores (T5O1, P3O1 y P4O2); mientras que para la frecuencia alfa, lo fueron en zonas fronto-temporo-parieto-occipitales, especialmente del hemisferio izquierdo. Específicamente con la frecuencia alfa encontramos correlaciones negativas fuertes con procesos de atención selectiva en las regiones descritas del hemisferio izquierdo y fronto-parietales del derecho, tal como otros estudios han señalado topográficamente y eléctricamente.^{20,45} De igual forma, con la frecuencia alfa también encontramos una fuerte relación inversa con la velocidad y facilidad de producción verbal semántica en ambos hemisferios, pero con mayor frecuencia e intensidad en el hemisferio izquierdo. En este sentido, se ha sugerido que la supresión de la frecuencia alfa en la región prefrontal izquierda de los adultos⁴⁶ puede ser un indicador de la velocidad de procesamiento y del acceso al almacén semántico,^{20,22} de ser así, es posible que también lo sea en población infantil y sirva como un parámetro de referencia del procesamiento léxico-semántico en niños.

Başar⁴⁷ ha señalado que la actividad oscilatoria intrínseca que conforma el EEG regula la mayoría de las funciones generales en el cerebro y la amplitud funciona como un parámetro de control de la capacidad de respuesta del cerebro, de manera que éste responde a los estímulos externos o internos con los ritmos o componentes de frecuencia preferentes que se encuentran en la actividad intrínseca.⁴⁸⁻⁵² Es posible que, particularmente, el hemisferio izquierdo (regiones fronto-témporo-parietales) de los niños con un pobre desempeño ejecutivo sea más proclive a responder "en exceso" con componentes del espectro de frecuencia delta y alfa con respecto a sus pares. Una incapacidad para suprimir de manera suficiente la actividad oscilatoria intrínseca en estas frecuencias en regiones corticales determinadas puede ser uno de los factores que determinen la presencia de la disfunción ejecutiva, tal como se ha señalado con las técnicas neurofisiológicas y de neuroimagen funcional.^{12,53-55}

Es posible que algunas de las diferencias en la PA observadas mediante valores tipificados (*Z*), entre los subgrupos, no fueran estadísticamente significativas por defecto en la potencia estadística derivado del reducido tamaño de la muestra. De ser así, no sabemos si el patrón que se observa, es realmente un verdadero retraso en el desarrollo con la posibilidad de que en edades ulteriores se recupere o madure, o bien sea el reflejo de una trayectoria aberrante desde el inicio del desarrollo del funcionamiento ejecutivo al ser estudiado de manera longitudinal. Estas interrogantes podrán dilucidarse aumentando el tamaño de la muestra y, por ende, reduciendo la probabilidad de ocurrencia del error beta.

Los autores son conscientes que el reducido número de participantes no permite generalizar los hallazgos a

toda la población escolar; sin embargo, los resultados de este estudio sugieren que durante la vigilia el cerebro no se encuentra realmente en reposo ni que la actividad EEG de fondo pueda ser concebida simplemente como un fenómeno de ruido u ocio como clásicamente se le ha descrito. Por el contrario, es muy posible que la actividad espontánea posea relevancia clínica durante la exploración neurológica y pueda vincularse preferentemente con procesos atencionales, léxico-semánticos y del funcionamiento ejecutivo específicos que condicionen el desarrollo de otros subsistemas o procesos cognoscitivos.

Los resultados de este estudio sugieren que las medidas espectrales derivadas del análisis del EEG en condiciones de reposo se encuentran correlacionadas con las capacidades cognoscitivas de los niños, por lo menos en lo que respecta a algunos componentes del funcionamiento ejecutivo. Es muy probable que la actividad delta y alfa puedan ser empleadas, en un futuro, como biomarcadores clínicos en alteraciones cognoscitivas en la infancia que involucren procesos sensoriales, mnésicos, atencionales y ejecutivos que complementen o mejoren el diagnóstico clínico. En población infantil, las técnicas y herramientas diagnósticas para la exploración y evaluación del Sistema Nervioso como la tomografía computarizada y la resonancia magnética tienen un alcance limitado, o bien, son de difícil adquisición. Por tanto, el paradigma de vigilia con ojos cerrados en relación con la valoración de procesos ejecutivos puede ser un indicador de fácil instrumentación concurrente en la evaluación neuropsicológica.

Financiamiento

Financiamiento por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) dentro del proyecto SALUD- 11-161587.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

Los autores agradecen las facilidades del doctor Teodoro Flores por su colaboración en los análisis analógicos del EEG y a la psicóloga Soledad Rosa Espinosa Ortiz por su participación en el reclutamiento de participantes.

REFERENCIAS

- Goldman-Rakic P. Cellular basis of WM. *Neuron* 1995;14:477-485.
- Goldberg E. The executive brain: Frontal lobes and the civilized mind. Oxford: University Press; 2001.
- Miyake A et al. The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cogn Psychol* 2000;41:49-100.
- Anderson V et al. Development of executive functions through late childhood and adolescence in an Australian sample. *Dev Neuropsychol* 2001;20:385-406.
- Huizinga M et al. Age-related change in executive function: Developmental trends and a latent variable analysis. *Neuropsychologia* 2006;44:2017-2036.
- Lores-Lázaro J et al. Desarrollo de funciones ejecutivas, de la niñez a juventud. *Anales Psicología* 2014;30:463-473.
- Best J, Miller P. A developmental perspective on executive function. *Child Dev* 2010;81:1641-1660.
- Romine C, Reynolds C. A model of the development of frontal lobe functioning: findings from a meta-analysis. *Appl Neuropsychol* 2005;12:190-201.
- Best J, Miller P, Jones L. Executive functions after age 5: Changes and correlates. *Dev Rev* 2009;29:180-200.
- Michels L et al. Developmental changes of functional and directed resting-state connectivities associated with neuronal oscillations in EEG. *Neuroimage* 2013;81:231-242.
- Lüchinger R et al. Brain state regulation during normal development: Intrinsic activity fluctuations in simultaneous EEG-fMRI. *Neuroimage* 2012;60:1426-1439.
- Fair D et al. Atypical default network connectivity in youth with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Biol Psychiatry* 2010;68:1084-1091.
- Fair D et al. The maturing architecture of the brain's default network. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2008;105:4028-4032.
- Buckner R, Vincent J. Unrest at rest: default activity and spontaneous network correlations. *NeuroImage* 2007;37:1091-1096.
- Laufs H et al. Electroencephalographic signatures of attentional and cognitive default. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2003;100:11053-11058.
- Raichle M et al. A default mode of brain function. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2001;98:676-682.
- Harmony T et al. EEG delta activity: An indicator of attention to internal processing during performance of mental tasks. *Int J Psychophysiol* 1996;24:161-171.
- Fernández T et al. Relationship of specific EEG frequencies at specific brain areas with performance. *Neuroreport* 1998;9: 3681-3687.
- Knyazev G. EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes. *Neurosci Biobehav Rev* 2012;36:677-695.
- Klimesch W. Alpha and beta band power changes in normal and dyslexic children. *Clin Neurophysiol* 2001;112:1186-1195.
- Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Res Rev* 1999;29:169-195.
- Klimesch W, Sauseng P, Hanslmayr S. EEG alpha oscillations: The inhibition - timing hypothesis. *Brain Res Rev* 2007;53:63-88.
- Buzsáki G, Kaila K, Raichle M. Inhibition and brain work. *Neuron* 2007;56:771-783.
- Knyazev G. Motivation, emotion, and their inhibitory control mirrored in brain oscillations. *Neurosci Biobehav Rev* 2007;31:377-395.
- Szava S et al. High resolution quantitative EEG analysis. *Brain Topogr* 1994;6:211-219.
- Buzsáki G. Rhythms of the brain. Oxford: Oxford University; 2006.
- Matute E, Rosselli M, Ardila A, Ostrosky-Solís F. Evaluación neuropsicológica infantil. México: Manual Moderno; 2007.
- Ostrosky-Solís F et al. Neuropsi atención y memoria 6 a 85 años. México: American Book Store; 2003.
- Ostrosky-Solís F et al. Neuropsi atención and memory: A neuropsychological test battery in Spanish with norms by age and educational level. *Appl Neuropsychol Adult* 2007;14:156-170.
- Gómez-Pérez E, Ostrosky-Solís F. Attention and memory evaluation across the life span: Heterogeneous effects of age and education. *J Clin Exp Neuropsychol* 2006;58:477-494.
- Harmony T, Fernandez-Bouzas A. Mapeo del EEG en el estudio de los pacientes con lesiones expansivas intracraneales. *Archivos Clínica Neurológica Querétaro* 1995;4:20-24.
- Gonzalez Garrido A et al. Comparison of EEG abnormal activities in learning disabled, behavioral disordered and normal children. *Arch Inst Nac Neurol Neurocir Mex* 1993;8:67-72.

33. Massar S, Kenemans J, Schutter D. Resting-state EEG theta activity and risk learning: sensitivity to reward or punishment? *Int J Psychophysiol* 2014;91:172-177.
34. Harmony T et al. Correlation between EEG spectral parameters and an educational evaluation. *Int J Neurosci* 1990;54:147-155.
35. Harmony T et al. Longitudinal quantitative EEG study of children with different performances on a reading-writing test. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1995;95:426-433.
36. Matousek M, Rasmussen P, Gilberg C. EEG frequency analysis in children with so called minimal brain dysfunction and related disorders. *Adv Biol Psychiatry* 1984;15:102-108.
37. Clarke A et al. EEG analysis in attention-deficit/hyperactivity disorder: A comparative study of two subtypes. *Psychiatry Res* 1998;81:19-29.
38. Clarke A et al. Age and sex effects in the EEG: Differences in two subtypes of attention-deficit/hyperactivity disorder. *Clin Neurophysiol* 2001;112:815-826.
39. Snyder S, Hall J. A meta-analysis of quantitative EEG power associated with attention deficit hyperactivity disorder *J Clin Neurophysiol* 2006;23:440-455.
40. Chabot R, Serfontein G. Quantitative Electroencephalographic Profiles of Children with Attention Deficit Disorder. *Biol Psychiatry* 1996;15:951-963.
41. Chabot R et al. Behavioural and electrophysiological predictors of treatment response to stimulants in children with attention disorders. *J Child Neurol* 1999;14:343-351.
42. Clarke A et al. Behavioural differences between EEG-defined subgroups of children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Clin Neurophysiol* 2011;122:1333-1341.
43. Seeley W et al. Dissociable intrinsic connectivity networks for salience processing and executive control. *J Neurosci* 2007;27:2349-2356.
44. Hampson M et al. Brain Connectivity related to working memory performance. *J Neurosci* 2006;26:13338-13343.
45. Laufs H et al. Electroencephalographic signatures of attentional and cognitive default modes in spontaneous brain activity fluctuations at rest. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2003;100:11053-11058.
46. Sutton S et al. Resting cortical brain activity and social behavior in higher functioning children with autism. *J Child Psychol Psychiatry* 2005;46:211-222.
47. Başar E et al. Brain's alpha, beta, gamma, delta, and theta oscillations in neuropsychiatric diseases: Proposal for biomarker strategies. *Suppl Clin Neurophysiol* 2013;62:19-54.
48. Başar E. EEG-brain dynamics: Relation between EEG and brain evoked potentials. Amsterdam: Elsevier; 1980.
49. Brandt M, Jansen B. The relationship between prestimulus alpha amplitude and visual evoked potential amplitude. *Int J Neurosci* 1991;61:261-268.
50. Başar E et al. Spontaneous EEG theta activity controls frontal visual evoked potential amplitudes. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1998;108:101-109.
51. Barry R, Kirkaikul S, Hodder D. EEG alpha activity and the ERP to target stimuli in an auditory oddball paradigm. *Int J Psychophysiol* 2000;39:39-50.
52. Barry R et al. Preferred EEG brain states at stimulus onset in a fixed interstimulus interval equiprobable auditory Go/NoGo task: A definitive study. *Int J Psychophysiol* 2014;94: 42-58.
53. Fassbender C et al. A lack of default network suppression is linked to increased distractibility in ADHD. *Brain Res* 2009;1273:114-128.
54. Proal E et al. Actividad funcional cerebral en estado de reposo: redes en conexión. *Rev Neurol* 2011;52(Supl 1):S3-10.
55. Weissman D et al. The neural bases of momentary lapses in attention. *Nat Neurosci* 2006;9:971-978.