

Estabilidad de la actividad eléctrica no lineal durante condiciones basales con los ojos cerrados

Nonlinear electrical activity stability in basal, eyes closed conditions

Fernando Maureira Cid^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-7607-7416>

Elizabeth Flores Ferro² <https://orcid.org/0000-0002-6826-9247>

¹Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación, Departamento de Educación Física, Deportes y Recreación. Santiago de Chile.

²Universidad Bernardo O'Higgins, Escuela de Educación Física, Deportes y Recreación. Santiago de Chile.

Autor para la correspondencia: maureirafernando@yahoo.es

RESUMEN

Introducción: El electroencefalograma permite registrar la actividad eléctrica cerebral en estado de reposo y durante la ejecución de tareas cognitivas.

Objetivo: Evaluar si la actividad cerebral, analizada como dinámica no lineal, se mantiene estable durante diferentes ventanas temporales en una condición basal con ojos cerrados.

Métodos: Se realizaron registros con electroencefalograma durante dos minutos a 14 estudiantes universitarios varones. Posteriormente, se compararon las medias de índices de Hurst (H) en ventanas temporales de 60, 30 y 10 segundos.

Resultados: Las medias de los índices H son estables a través de diferentes ventanas temporales en las regiones prefrontales, temporales y occipitales.

Conclusiones: Los registros de electroencefalograma en condiciones basales con los ojos cerrados son válidos para comparar protocolos experimentales de resolución de problemas

cognitivos utilizando el exponente de Hurst en los sujetos de la muestra y en otros con características similares.

Palabras clave: electroencefalografía; matemática no lineal; índice de Hurst; estado de reposo; ojos cerrados.

ABSTRACT

Introduction: Electroencephalography makes it possible to record brain electrical activity at rest and during the performance of cognitive tasks.

Objective: Determine whether brain activity analyzed as nonlinear dynamics remains stable during various time windows in basal, eyes closed conditions.

Methods: Electroencephalographic records of 14 male university students were taken during two minutes. Hurst's index means (H) were then compared in time windows of 60, 30 and 10 seconds.

Results: H index means are stable throughout the various time windows in the prefrontal, temporal and occipital regions.

Conclusions: Electroencephalographic records in basal, eyes closed conditions are valid to compare experimental protocols for cognitive problem solving using the Hurst exponent in subjects from the sample as well as others of similar characteristics.

Keywords: electroencephalography; nonlinear mathematics; Hurst's index; at rest; eyes closed.

Recibido: 03/02/2020

Aceptado: 21/03/2020

Introducción

El electroencefalograma (EEG) permite medir la actividad eléctrica cerebral a través de electrodos ubicados en el cuero cabelludo,⁽¹⁾ permitiendo el registro de cinco tipos de ondas: a) delta, con una oscilación de onda de 1-3 Hz, que se asocia con los estados de sueño profundo; b) theta, con 3,5-7 Hz, asociada con las etapas de sueño ligero; c) alfa, con 8-12 Hz, que predominan cuando un sujeto esta despierto, relajado y con los ojos cerrados; d) beta, con 13-30

Hz, predominante en sujetos despiertos, durante la percepción de estímulos y la resolución de problemas cognitivos; e) gamma, con oscilaciones superiores a 30 Hz, asociado a estados de meditación y altos niveles de concentración.⁽²⁾

Un registro de la condición basal con ojos cerrados es una herramienta para comparar protocolos experimentales, que permite estudiar la variación cerebral entre un estado de descanso y una situación activa.⁽³⁾ Durante una condición basal el cerebro progresaría hacia un estado de mayor sincronización y durante la resolución de problemas cognitivos, aumentaría el consumo de energía y se produciría una desincronización de las redes cerebrales locales, asignando diferentes recursos a regiones específicas que se asocian a la resolución de diversos fragmentos del problema.⁽⁴⁾ Un estudio de la señal del EEG, basado en matemáticas de sistemas dinámicos o matemática del caos,⁽⁵⁾ permite entender que en estado basal surge un atractor global, lo que provoca un alto nivel de correlaciones, y durante la resolución de problemas cognitivos surgen diversos atractores, y esta aparición ocasiona la pérdida de la sincronía.⁽⁶⁾

Dentro de las herramientas de matemáticas no lineales, el índice de Hurst (H) sirve para estudiar series temporales (como las del EEG) altamente dependientes de las condiciones iniciales.⁽⁷⁾ El índice H varía entre 0 y 1, y los posibles valores están sujetos a las condiciones siguientes: $H = 0,5$ es indicador de un sistema caótico en el que es imposible predecir el comportamiento futuro del sistema; $H \leq 0,5$ indica un sistema antipersistente, sin memoria de largo plazo, en el que el sistema tendrá un comportamiento futuro opuesto a la actividad presente; $H \geq 0,5$ sería índice de un sistema persistente, con memoria de largo plazo, en el cual el sistema mantendría un comportamiento futuro similar al presente.^(8,9)

Diversos estudios describen la actividad eléctrica cerebral desde una mirada no lineal, por ejemplo, en pacientes con trastorno de déficit atencional con hiperactividad (TDAH) antes y después de una terapia de *neurofeedback*.⁽¹⁰⁾ También se han comparado los exponentes de Hurst en registros de pacientes con epilepsia y controles, con valores $H = 0,19$, para los primeros, y $H = 0,29$, para los sujetos sanos, lo cual indica una antipersistencia en ambos casos, pero muestra una anticorrelación mayor en epilépticos.⁽¹¹⁾ Otro estudio ha registrado señales más estocásticas en cerebros normales, lo que constituye el índice de Hurst como una herramienta útil de análisis en casos de epilepsia.⁽¹²⁾

Así mismo, se han utilizado los análisis no lineales en señales de EEG en varias etapas del sueño,⁽¹³⁾ en ondas beta durante estados de meditación,⁽¹⁴⁾ contrastando los exponentes de Hurst en estados de reposo con estímulos sonoros o reflexológico, con una disminución de procesos funcionales paralelos en el cerebro⁽¹⁵⁾ y comparando parámetros no lineales de señales del EEG en sujetos con estrés postraumático y controles sanos, siendo los valores H menores en la región prefrontal izquierda en el primer grupo.⁽¹⁶⁾

En condición basal con ojos cerrados, se ha descrito que la onda beta de 26 adultos obtiene valores $H < 0,5$ en todos los registros del EEG y porcentajes de correlaciones entre electrodos de 20 % a 100 % intra e interhemisféricas.⁽⁴⁾ También se ha estudiado el efecto de 30 minutos de ejercicio físico aeróbico (65 % -75 % de la frecuencia cardíaca máxima) sobre los registros del EEG en las bandas delta, theta, alfa, beta y gamma, durante una condición basal, relajado, despierto con los ojos cerrados. Los resultados mostraron valores $H > 0,5$ en todos los registros de las ondas delta y theta, y valor $H < 0,5$ en las ondas alfa, beta y gamma. El ejercicio físico no muestra un efecto determinado sobre la actividad cerebral, ya que tanto sujetos experimentales como controles, presentaron variaciones en los índices H entre la primera y segunda medición, sin existir un patrón característico en aquellos que fueron sometidos a la intervención con ejercicio físico.⁽¹⁷⁾

El estudio de la actividad cerebral registrada con el EEG bajo el paradigma de las matemáticas no lineales es relativamente reciente, lo que da cuenta de la necesidad de ahondar en este tipo de estudio, ya que como muchos fenómenos biológicos, esta actividad corresponde a sistemas dinámicos complejos⁽¹⁸⁾ y, por ende, debe ser estudiada como tal. En este contexto se ha observado que durante la imaginación de una ejecución motriz la relación orden/caos de la actividad cerebral varía según las ventanas temporales en las cuales son analizados los registros de EEG, revelando índices $H > 0,5$ cuando se estudian ventanas de 1 segundo hasta $H < 0,5$ cuando la ventana temporal alcanza 120 segundos,⁽⁷⁾ lo que revela una diferencia en la actividad funcional cerebral según la escala temporal analizada durante la resolución de una actividad mental.

Tomando en cuenta lo anterior, se propuso como objetivo de la investigación: evaluar si la actividad cerebral, analizada como dinámica no lineal, se mantiene estable durante diferentes ventanas temporales en una condición basal con ojos cerrados. De esta forma será posible

constatar si las dinámicas cerebrales en estado basal se diferencian de la actividad cerebral cuando resuelve alguna tarea cognitiva, y si las primeras tienden a ser más estables a través del tiempo y en diferentes ventanas temporales.

Métodos

Tipo de investigación

Estudio observacional, analítico, transversal. Observacional debido a que el objetivo es observar y registrar la actividad cerebral de los sujetos; analítico porque permite comparar grupos de sujetos sin la necesidad de que exista un proceso de asignación de la muestra; y, por último, corresponde a una investigación de corte transversal, ya que las mediciones se realizaron en un solo momento.

Muestra

La muestra fue de tipo no probabilística voluntaria. Se evaluaron a 14 estudiantes varones de educación física de la Universidad Católica Silva Henríquez de Santiago de Chile, con edad promedio de $19,4 \pm 1,72$ años. Se seleccionaron solo sujetos de sexo masculino y de edad comprendida en el rango entre 17 y 21 años, debido a que la actividad eléctrica cerebral es diferente según sexo y grupos etarios.⁽¹⁹⁾ Fueron excluidos los sujetos que, al menos un año antes de las evaluaciones, hubiesen presentado alteraciones cognitivas, consumido medicamentos y/o que hubiesen estado en tratamiento psicológico.

Instrumentos

Para el registro EEG se utilizó el dispositivo de interfaz cerebro-computadora Emotiv EPOC® con frecuencia de muestreo de 128 Hz. El EEG registra 14 canales a través de electrodos posicionados según el sistema 10/20 (Fig. 1) usando como referencia los electrodos del hueso mastoides. Los datos del EEG fueron procesados con el programa EEGLAB y ADJUST ejecutados en la plataforma MATLAB 2008. Se utilizaron los registros del lóbulo frontal (AF3 y AF4), temporal (T7 y T8) y occipital (O1 y O2).

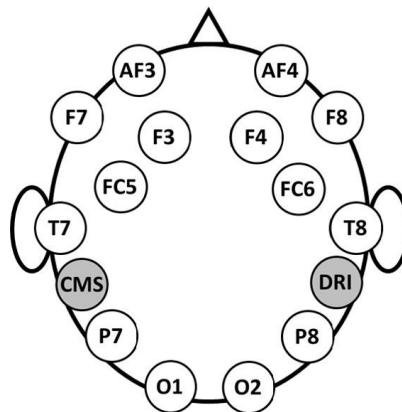


Fig. 1 - Localización de los electrodos del Emotiv EPOC® durante el estudio.

Procedimiento

Para cada participante se registró su frecuencia cardíaca basal durante cinco minutos sentado relajadamente en una silla. Posterior a ello se realizó un registro basal de la actividad cerebral con dos minutos con los ojos cerrados y se analizó el rango de frecuencia delta (1-3 Hz), theta (3,5-7 Hz), alfa (8-12 Hz), beta (13-30 Hz) y gamma (> 30 Hz). Todas las mediciones se realizaron durante la mañana (entre 10:00 y 12:00 horas). A cada participante se le entregaron indicaciones sobre sueño, consumo de alcohol y bebidas energizantes, para el día previo a la evaluación. Todos los participantes declararon no consumir habitualmente drogas.

Análisis de datos

Para el registro y análisis de datos del electroencefalograma se utilizó el programa MATLAB con la herramienta EEGLAB. Posteriormente, se calcularon los índices de Hurst cada un segundo de registro y se obtuvieron 120 índices H (el periodo de ojos cerrados dura 120 segundos), luego se promediaron los valores del primer y segundo minuto. Se continuó con el promedio de los segundos 1-30, 31-60, 61-90 y 91-120 y finalmente, con los promedios cada 10 segundos. Esto se realizó para cada uno de los seis electrodos (AF3, AF4, T7, T8, O1 y O2) de cada sujeto evaluado. Una vez determinadas las medias de los índices H se utilizó el programa estadístico SPSS 25.0 para Windows. La prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS) entregó una distribución normal para cada conjunto de datos analizados ($p > 0,05$) razón por la cual se procedió a utilizar

estadística paramétrica. Para comparar los índices H entre el primer y segundo minuto se utilizó pruebas *t* para muestras relacionadas, para comparar los índices H entre los cuatro periodos de 30 segundos y entre los 12 periodos de 10 segundos se utilizó ANOVA de medidas repetidas. Se consideraron significativos valores $p < 0,05$.

Aspectos éticos

La presente investigación fue aprobada por el comité de ética de la Universidad Católica Silva Henríquez. Todos los participantes firmaron un consentimiento informado.

Resultados

En la figura 2 se describe el caso de uno de los estudiantes evaluados, mostrando las medias de los índices de Hurst calculados cada 60 segundos en los seis electrodos estudiados. Los valores de H oscilan entre 0,940 y 0,977 para la onda delta, entre 0,512 y 0,573 para la onda theta, entre 0,345 y 0,372 para la onda alfa, entre 0,258 y 0,281 para la onda beta y entre 0,208 y 0,262 para la onda gamma. Además, es posible apreciar que no existen diferencias significativas entre los índices H del primer y segundo minuto en ninguno electrodo en la onda delta ni en las ondas alfa, beta y gamma. En la onda theta solo hubo diferencias en el electrodo occipital derecho ($X_1 = 0,529 \pm 0,043$; $X_2 = 0,512 \pm 0,038$; $t = 2,219$; $gl = 59$; $p = 0,030$; $d = 0,45$).

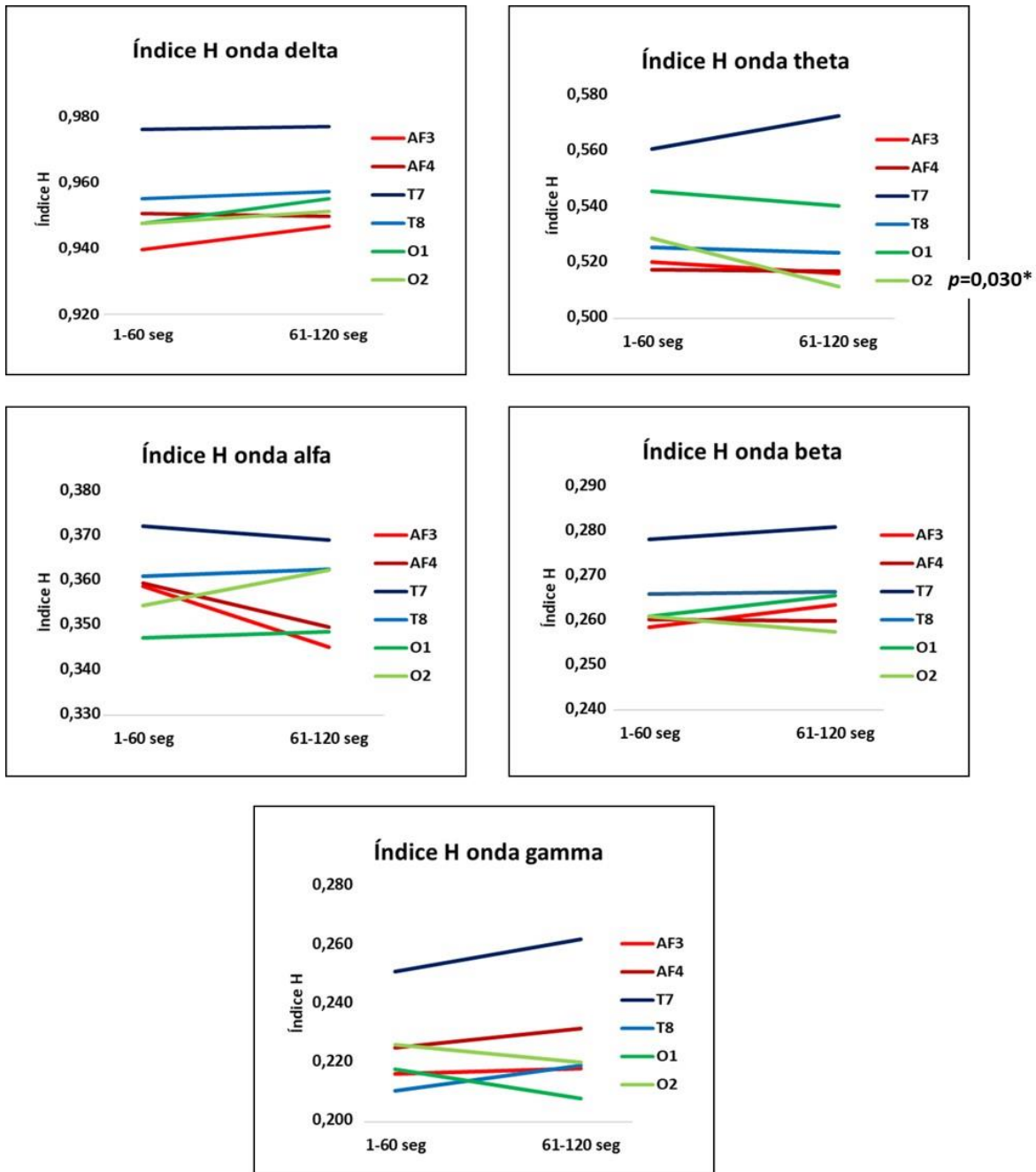


Fig. 2 - Comparación de los índices de Hurst calculados cada 60 segundos en los dos electrodos prefrontales (AF3 y AF4), los dos temporales (T7 y T8) y los dos occipitales (O1 y O2) en uno de los sujetos de la muestra.

En la figura 3 se recogen las medias de los índices de Hurst calculados cada 30 segundos en los seis electrodos estudiados. Los valores H oscilan entre 0,934 y 0,982 para la onda delta, entre

0,503 y 0,584 para la onda theta, entre 0,342 y 0,378 para la onda alfa, entre 0,256 y 0,284 para la onda beta y entre 0,205 y 0,272 para la onda gamma. Tampoco se observaron diferencias significativas entre los cuatro periodos de tiempo (1-30 segundos; 31-60 segundos; 61-90 segundos; 91-120 segundos) en las ondas delta, theta, alfa y beta. En la onda gamma solo hubo diferencias en el electrodo temporal izquierdo donde el valor H de 61-90 segundos es mayor a los otros tres periodos de tiempo ($F = 3,369$; $gl = 3$; $p = 0,033$; $d = 0,27$).

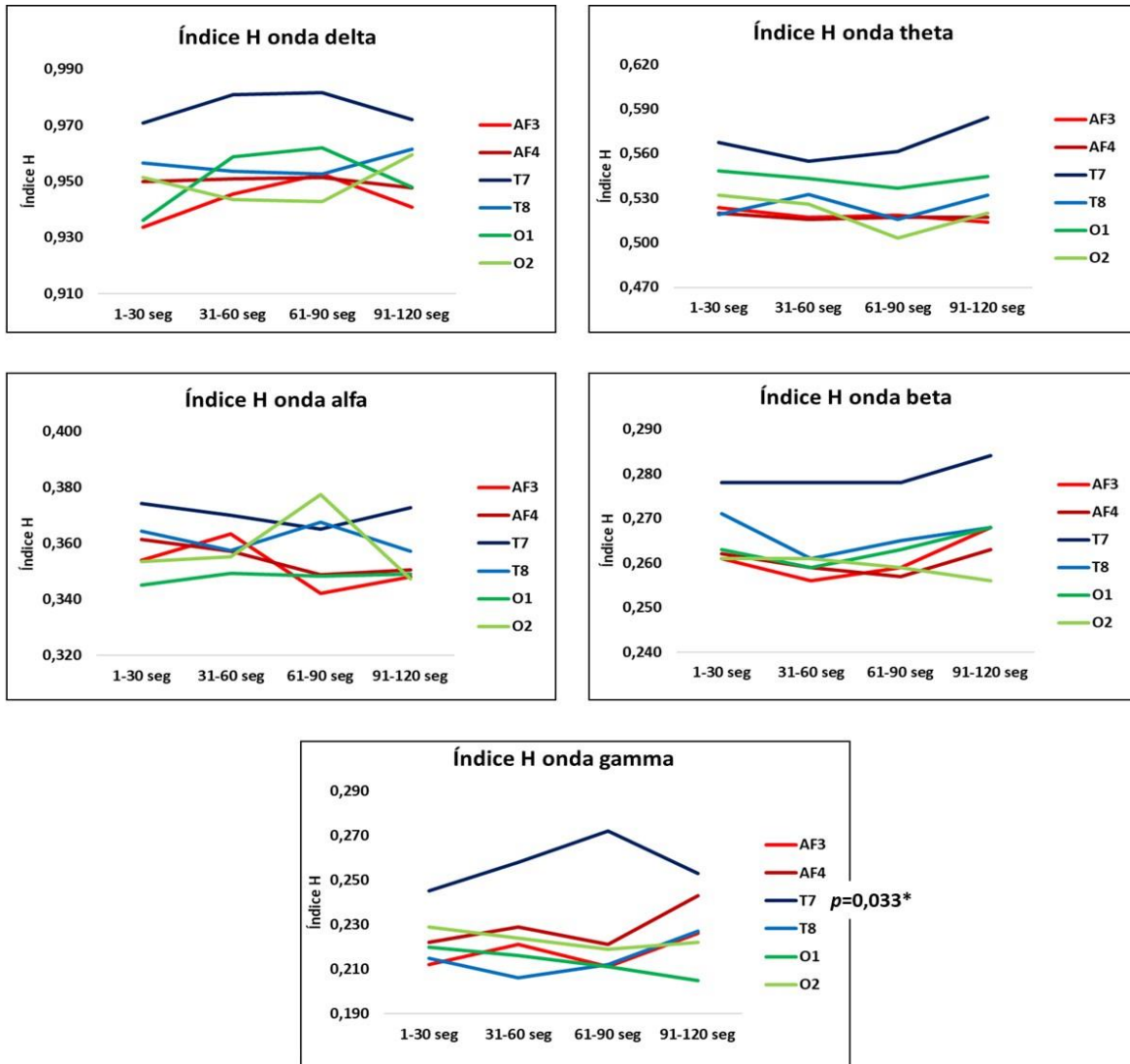


Fig. 3 - Comparación de los índices de Hurst calculados cada 30 segundos en los dos electrodos prefrontales (AF3 y AF4), los dos temporales (T7 y T8) y los dos occipitales (O1 y O2) en uno de los sujetos de la muestra.

En la figura 4 aparecen las medias de los índices de Hurst calculados cada 10 segundos en los seis electrodos estudiados. Los valores H oscilan entre 0,908 y 0,996 para la onda delta, entre 0,495 y 0,598 para la onda theta, entre 0,327 y 0,396 para la onda alfa, entre 0,240 y 0,293 para la onda beta y entre 0,195 y 0,298 para la onda gamma. No se encontraron diferencias significativas entre los doce periodos de tiempo en las ondas theta, alfa y beta. En la onda delta solo se detectó diferencias en el electrodo occipital derecho, donde el valor H de 11-20 segundos, 81-90 segundos, 91-100 segundos y 101-110 segundos es mayor a los otros ocho periodos de tiempo ($F = 1,972$; $gl = 11$; $p = 0,039$; $d = 0,18$) y en la onda gamma solo hubo diferencias en el electrodo temporal izquierdo, donde el valor H de 41-40 segundos, 81-90 segundos y 91-100 segundos fueron mayores que los otros 9 periodos de tiempo ($F = 2,421$; $gl = 11$; $p = 0,011$; $d = 0,21$).

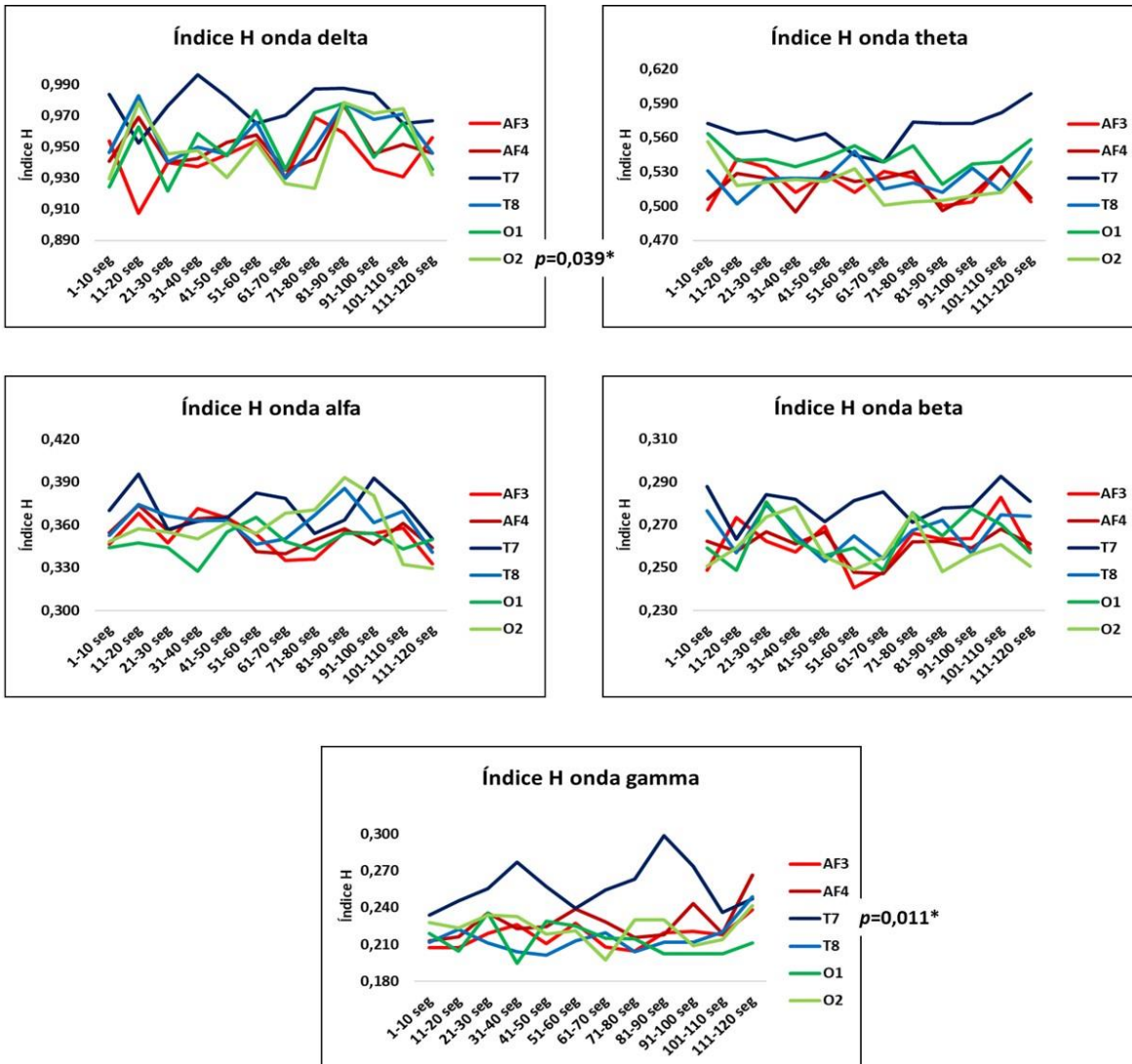


Fig. 4 - Comparación de los índices de Hurst calculados cada 10 segundos en los dos electrodos frontales (AF3 y AF4), los dos temporales (T7 y T8) y los dos occipitales (O1 y O2) en uno de los sujetos de la muestra.

Comparaciones índices de Hurst cada 60 segundos

En la tabla 1 se presentan los análisis que relevaron diferencias significativas al comparar los índices H entre el primer y segundo minuto de registro de onda delta, theta y alfa. Del total de comparaciones realizadas para $n = 84$, en la onda delta hubo diferencias en el 6,0 %; en la onda theta, en el 8,3 %; y en las ondas alfa, en el 11,9 %.

Tabla 1 - Diferencia de índices H comparando el primer y segundo minuto de registro de ondas delta, theta y alfa del EEG

Onda cerebral	Sujeto	Regiones	Valor <i>p</i>	Tamaño del efecto
Delta	n.º 7	Temporal izquierda	0,017	0,58
	N.º 8	Temporal derecha	0,029	0,49
		Occipital izquierda	0,022	0,53
	n.º 9	Temporal izquierda	0,039	0,32
	n.º 13	Occipital derecha	0,026	0,47
Theta	n.º 1	Occipital derecha	0,030	0,45
	n.º 3	Occipital izquierda	0,001	0,53
	n.º 9	Prefrontal derecha	0,018	0,51
		Temporal izquierda	0,030	0,41
	n.º 11	Temporal derecha	0,009	0,57
	n.º 14	Prefrontal derecha	0,022	0,54
		Occipital derecha	0,037	0,59
Alfa	n.º 2	Prefrontal izquierda	0,025	0,36
	n.º 4	Occipital derecha	0,039	0,39
	n.º 5	Prefrontal izquierda	0,028	0,37
	n.º 6	Occipital izquierda	0,018	0,62
	n.º 7	Temporal derecha	0,031	0,45
	n.º 9	Occipital izquierda	0,024	0,49
	n.º 12	Temporal izquierda	0,012	0,44
	n.º 14	Temporal izquierda	0,042	0,39
		Temporal derecha	0,021	0,44
Occipital izquierda		0,042	0,36	

En la tabla 2 se presentan los análisis que relevaron diferencias significativas al comparar los índices H entre el primer y segundo minuto de registro de onda beta y gamma. Del total de comparaciones realizadas en la onda beta (n = 84) hubo diferencias en el 6,0 % de ellas. En tanto, las comparaciones realizadas en la onda gamma (n = 84) mostraron diferencias en el 9,5 % de ellas.

Tabla 2 – Diferencia de índices H comparando el primer y segundo minuto de registro de ondas beta y gamma del EEG

Onda cerebral	Sujeto	Regiones	Valor <i>p</i>	Tamaño del efecto
Beta	n.º 7	Occipital izquierda	0,008	0,38
		Occipital derecha	0,014	0,40
	n.º 9	Occipital izquierda	0,028	0,41
	n.º 14	Temporal izquierda	0,032	0,55
		Temporal derecha	0,017	0,66
Gamma	n.º 3	Temporal izquierda	0,001	0,64
	n.º 4	Occipital izquierda	0,035	0,33
	n.º 5	Occipital izquierda	0,025	0,45
	n.º 6	Occipital izquierda	0,030	0,42
	n.º 8	Prefrontal izquierda	0,031	0,38
	n.º 9	Temporal izquierda	0,010	0,54
	n.º 14	Prefrontal derecha	0,034	1,11
		Occipital izquierda	0,009	0,87

Comparaciones índices de Hurst cada 30 segundos

En la tabla 3 se presentan los análisis que relevaron diferencias significativas al comparar los índices H entre los segundos 1-30, 31-60, 61-90 y 91-120 de registro de onda delta, theta y alfa. Del total de comparaciones realizadas para cada onda, siempre con $n = 84$, en la delta hubo diferencias en el 8,3 %, en la theta se apreciaron diferencias en el 14,3 % y en las ondas alfa hubo diferencias en el 15,5 %.

Tabla 3 - Diferencia de índices H comparando las series temporales de 30 segundos de registro de ondas delta, theta y alfa del EEG

Onda cerebral	Sujeto	Regiones	Valor p	Tamaño del efecto
Delta	n.º 5	Occipital izquierda	0,004	0,39
	n.º 8	Temporal derecha	0,028	0,36
	n.º 10	Prefrontal izquierda	0,008	0,37
		Prefrontal derecha	0,002	0,45
	n.º 11	Temporal izquierda	0,032	0,22
		Occipital derecha	0,037	0,21
n.º 12	Occipital izquierda	0,018	0,21	
Theta	n.º 3	Prefrontal izquierda	0,039	0,26
		Prefrontal derecha	0,016	0,31
		Occipital izquierda	0,001	0,46
	n.º 6	Temporal izquierda	0,001	0,21
	n.º 10	Temporal izquierda	0,003	0,40
		Occipital izquierda	0,025	0,29
	n.º 11	Temporal derecha	0,023	0,24
		Occipital izquierda	0,020	0,24
		Occipital derecha	0,003	0,34
	n.º 12	Temporal derecha	0,038	0,26
n.º 13	Prefrontal derecha	0,038	0,22	
n.º 14	Occipital derecha	0,002	0,41	
Alfa	n.º 2	Prefrontal izquierda	0,032	0,27
		Occipital izquierda	0,031	0,28
		Occipital derecha	0,039	0,39
	n.º 3	Temporal izquierda	0,049	0,25
		Occipital derecha	0,030	0,28
	n.º 4	Temporal derecha	0,019	0,31
		Occipital derecha	0,019	0,21
	n.º 5	Prefrontal izquierda	0,033	0,27
		Temporal izquierda	0,036	0,27
	n.º 6	Occipital izquierda	0,009	0,34
	n.º 7	Temporal derecha	0,008	0,35
	n.º 9	Occipital izquierda	0,009	0,34
Occipital derecha		0,028	0,28	

En la tabla 4 se presentan los análisis que relevaron diferencias significativas al comparar los índices H entre los segundos 1-30, 31-60, 61-90 y 91-120 de registro de onda beta y gamma. Del total de comparaciones realizadas en la onda beta (n = 84) hubo diferencias en el 6,0 % de ellas. En tanto, las comparaciones realizadas en la onda gamma (n = 84) mostraron diferencias en el 14,3 %.

Tabla 4 - Diferencia de índices H comparando las series temporales de 30 segundos de registro de ondas beta y gamma del EEG

Onda cerebral	Sujeto	Regiones	Valor p	Tamaño del efecto
Beta	n.º 3	Occipital izquierda	0,005	0,38
	n.º 7	Occipital izquierda	0,032	0,28
		Occipital derecha	0,033	0,28
	n.º 8	Occipital derecha	0,043	0,27
	n.º 12	Temporal izquierda	0,000	0,50
Gamma	n.º 1	Temporal izquierda	0,033	0,41
	n.º 2	Temporal izquierda	0,000	0,51
	n.º 3	Temporal izquierda	0,006	0,37
	n.º 5	Occipital izquierda	0,038	0,26
	n.º 6	Prefrontal izquierda	0,031	0,28
	n.º 7	Occipital derecha	0,041	0,30
	n.º 8	Temporal derecha	0,018	0,34
		Occipital derecha	0,023	0,32
	n.º 11	Occipital izquierda	0,042	0,30
	n.º 12	Prefrontal derecha	0,006	0,36
	n.º 13	Prefrontal derecha	0,042	0,30
		Occipital izquierda	0,032	0,32

Comparaciones índices de Hurst cada 10 segundos

En la tabla 5 se presentan los análisis que relevaron diferencias significativas al comparar los índices H cada 10 segundos de registro de onda delta, theta y alfa. Del total de comparaciones realizadas en la onda delta (n = 84) hubo diferencias en el 9,5 %, en el caso de la onda theta (n = 84) se aprecian diferencias en el 19,0 % y en las ondas alfa (n = 84) hubo diferencias en el 10,7 %.

Tabla 5 - Diferencia de índices H comparando las series temporales de 10 segundos de registro de ondas delta, theta y alfa del EEG

Onda cerebral	Sujeto	Regiones	Valor p	Tamaño del efecto
Delta	n.º 1	Occipital izquierda	0,039	0,26
	n.º 2	Prefrontal derecha	0,001	0,26
		Temporal izquierda	0,041	0,48
	n.º 8	Temporal derecha	0,013	0,21
	n.º 10	Prefrontal izquierda	0,015	0,25
		Prefrontal derecha	0,045	0,22
		Temporal derecha	0,034	0,23
n.º 14	Temporal izquierda	0,003	0,24	
Theta	n.º 2	Temporal izquierda	0,000	0,34
	n.º 3	Occipital izquierda	0,031	0,19
	n.º 5	Temporal derecha	0,028	0,19
	n.º 6	Prefrontal izquierda	0,007	0,22
		Prefrontal derecha	0,005	0,23
		Temporal izquierda	0,001	0,26
	n.º 7	Temporal izquierda	0,015	0,21
		Temporal derecha	0,028	0,19
	n.º 8	Prefrontal derecha	0,017	0,20
		Temporal derecha	0,029	0,19
	n.º 10	Temporal izquierda	0,002	0,25
		Occipital derecha	0,013	0,21
	n.º 11	Occipital izquierda	0,022	1,00
	n.º 12	Temporal derecha	0,032	0,19
	n.º 13	Prefrontal derecha	0,047	1,00
Occipital izquierda		0,014	0,82	
Alfa	n.º 2	Prefrontal izquierda	0,000	0,28
	n.º 3	Occipital izquierda	0,004	0,23
	n.º 4	Occipital derecha	0,002	0,25
	n.º 5	Occipital derecha	0,047	0,18
	n.º 6	Occipital izquierda	0,003	0,24
	n.º 7	Temporal derecha	0,005	0,23
	n.º 9	Temporal derecha	0,033	0,18
		Occipital derecha	0,035	0,18
	n.º 14	Occipital izquierda	0,004	0,23

En la tabla 6 se presentan los análisis que relevaron diferencias significativas al comparar los índices H cada 10 segundos de registro de onda beta y gamma. Del total de comparaciones realizadas en la onda beta (n = 84) hubo diferencias en el 4,7 % de ellas. En tanto, las comparaciones realizadas en la onda gamma (n = 84) mostraron diferencias en el 8,3 %.

Tabla 6 - Diferencia de índices H comparando las series temporales de 10 segundos de registro de ondas beta y gamma del EEG

Onda cerebral	Sujeto	Regiones	Valor <i>p</i>	Tamaño del efecto
Beta	n.º 3	Occipital izquierda	0,029	0,19
	n.º 7	Prefrontal izquierda	0,009	0,24
	n.º 12	Temporal izquierda	0,002	0,24
	n.º 13	Occipital izquierda	0,046	0,99
Gamma	n.º 1	Temporal izquierda	0,010	0,27
	n.º 2	Temporal izquierda	0,002	0,25
	n.º 3	Temporal izquierda	0,038	0,18
	n.º 5	Occipital derecha	0,027	0,19
	n.º 9	Occipital derecha	0,017	0,20
	n.º 7	Occipital derecha	0,041	0,30
	n.º 12	Occipital izquierda	0,009	0,22
	n.º 14	Temporal derecha	0,006	0,22

Discusión

La investigación evaluó si la actividad cerebral, analizada como dinámica no lineal, se mantenía estable durante diferentes ventanas temporales en una condición basal con ojos cerrados. Los 120 segundos de registro se dividieron en dos series de 60 segundos y luego se compararon las medias de los índices H de ambas ventanas temporales, con la finalidad de determinar si la actividad eléctrica no lineal del primer minuto era similar a la del segundo. Los resultados mostraron que en la onda delta solo existieron variaciones en el 6 % de los registros, en la onda theta en el 8,3 %, en la onda alfa en el 11,9 %, en la onda beta en el 6 % y en la onda gamma en el 9,5 %. Situaciones similares ocurrieron cuando los 120 segundos de registro del EEG se dividieron en cuatro ventanas temporales de 30 segundos y en 12 ventanas temporales de 10 segundos.

Estos resultados son indicativos de estabilidad de la relación orden/caos en la actividad eléctrica cerebral a través de diversas ventanas temporales a lo largo de dos minutos de registro, lo cual es fundamental para utilizar los registros de EEG en condiciones basales con los ojos cerrados como una herramienta de comparación en protocolos experimentales durante la resolución de problemas cognitivos. Si bien se sabe que esta situación es válida para análisis con matemáticas lineales,⁽³⁾ esta investigación demuestra que dicha situación también es válida para análisis con

matemáticas no lineales como el exponente de Hurst. Registros del EEG en condiciones basales debiesen usarse como elementos de control, sustrayendo dichas señales a los registros de actividad cerebral durante la resolución de problemas mentales, de manera de conseguir un registro de índices H correspondientes exclusivamente al proceso cognitivo. Este protocolo es el mismo utilizado para la obtención de imágenes en resonancia magnética funcional.⁽²⁰⁾

La literatura muestra que la actividad cerebral durante procesos cognitivos (resolución de problemas o imaginación de diferentes situaciones) presenta valores H diferentes según sean las ventanas temporales estudiadas, con índices mayores en series de tiempo más pequeñas. Esto es diferente a lo reportado en este estudio, donde no existen diferencias significativas de los valores H en las diversas series de tiempo cuando el sujeto se encuentra en estado de reposo con los ojos cerrados. Esto puede ser explicado porque la actividad registrada en el EEG se modifica constantemente cuando es necesario resolver un problema, con una desincronización de las diferentes regiones del cerebro, situación que no ocurre en estado de reposo, donde la actividad eléctrica se mantiene constante, ya que no existen grandes estímulos que procesar o problemas mentales que resolver.

En general, las ondas delta y theta presentan valores $H > 0,5$ en todas las ventanas temporales, lo que indica una persistencia y un proceso cíclico de largo plazo en la señal del EEG, es decir, si en el tiempo t_1 la serie ha estado sobre su media de largo plazo, en el tiempo t_2 lo más probable es que continúe arriba o viceversa. En tanto, las ondas alfa, beta y gamma presentan valores $H < 0,5$ dando cuenta de series de tiempo antipersistentes o anticorrelacionadas, con un comportamiento de reversión a la media, es decir, si en el tiempo t_1 la serie ha estado bajo el nivel de la media, en el tiempo t_2 es más probable que la serie esté sobre la media o viceversa.⁽²¹⁾ Desde un punto de vista fisiológico, los valores H de todas las ondas cerebrales revelan su naturaleza caótica, con ondas delta y theta indicativas de estados aperiódicos de actividad cerebral (relacionadas con diversas etapas de sueño) que parecen regular desde el fondo la actividad cerebral en vigilia.⁽⁸⁾ En tanto las ondas alfa, beta y gamma poseen valores H menores, antipersistentes pero igualmente aperiódicas, con extrema sensibilidad que permite dar cuenta de la capacidad de discriminación sensorial que se produce aún en estado de reposo, ya que el sistema aún en estado de vigilia, debe responder frente a fenómenos del entorno. El caos disipativo provoca ordenamientos locales con desequilibrio global,⁽²²⁾ lo que confiere una alta complejidad a la señal del EEG, y es indicativo

de actividad mental que genera atractores en valores $H < 0,5$ donde se realizan diferentes secuencias de interpretación de sensaciones e imaginación de eventos aún en estado de reposo.

Por tanto, la investigación ofrece datos sobre la factibilidad de la utilización de registros de EEG basales, entendidos como dinámicos no lineales, como controles de la actividad cerebral. Finalmente, la limitación de esta investigación radica en el número de sujetos y, además, que son personas de una población en particular, en cuanto a sexo y tipo de actividad (estudiantes de educación física), por lo que los resultados y/o conclusiones no son atribuibles a la población. Como proyección, son necesarios estudios con ventanas temporales más amplias, que abarquen diversos grupos etarios y que incluyan a sujetos de ambos sexos.

La actividad cerebral registrada con el EEG en condición basal con ojos cerrados y analizada con matemática no lineal se mantiene estable durante ventanas temporales de 10, 30 y 60 segundos, lo cual da cuenta de estos registros como una herramienta válida para comparar protocolos experimentales analizados con el índice de Hurst.

Es necesario continuar investigando sobre los tiempos de estabilidad de las señales del EEG entendida como sistemas dinámicos, para conocer la fenomenología subyacente en ventanas temporales de mayor duración (como 5, 10, 20 o 30 minutos).

Referencias bibliográficas

1. Maureira F. ¿Qué es la inteligencia? Madrid: Bubok Publishing; 2017.
2. Maureira F, Flores E. Principios de neuropsicobiología para estudiantes de educación. Valencia: Obrapropia; 2016.
3. Buzsaki G. Rhythms of the brain. London: Oxford University Press; 2006.
4. Díaz H, Maureira F, Otárola J, Rojas R, Alarcón O, Cañete L. EEG Beta band frequency domain evaluation for assessing stress and anxiety in resting, eyes closed, basal conditions. *Procedia Computer Science* 2019;162:974-81.
5. Pikovsky A, Rosenblum M, Kurths J. Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences. Cambridge: Cambridge University Press; 2001.
6. Kumar J, Bhuvaneshwari P. Analysis of electroencephalography (EEG) signals and its categorization-a study. *Procedia Engineering* 2012;38:2525-36.

7. Díaz H, Maureira F, Córdova F. Temporal scaling and inter-individual hemispheric asymmetry of chaos estimation from EEG time series. *Procedia Computer Science* 2017;122: 339-45.
8. Díaz H, Maureira F, Cohen E, Córdova F, Palominos F, Otárola J, *et al.* Individual differences in the orden/chaos balance of the brain self-organization. *Annals of Data Science* 2015;2(4):421-38.
9. Díaz H, Maureira F, Córdova F, Palominos F. Long-range linear correlation and nonlinear chaos estimation differentially characterizes functional conectivity and organization of the brain EEG. *Procedia Computer Science* 2017;122:857-64.
10. Cerquera A, Arns M, Buitrago E, Gutiérrez R, Freund J. Nonlinear dynamics measures applied to EEG recordings of patients with attention deficit/hyperactivity disorder: quantifying the effects of a neurofeedback treatment. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2012;2012:1057-60.
11. Geng S, Zhou W, Yuan Q, Cai D, Zeng Y. EEG non-linear feature extraction using correlation dimension and Hurst exponent. *Neurol Res.* 2011;33(9):908-12.
12. Nurujjaman M, Narayanan R, Iyengar AS. Comparative study of nonlinear properties of EEG signals of normal persons and epileptic patients. *Nonlinear Biomed Phys.* 2009;3(1):6.
13. Acharya U, Faust O, Kannathal N, Chua T, Laxminarayan S. Non-linear analysis of EEG signals at various sleep stages. *Comput Methods Programs Biomed.* 2005;80(1):37-45.
14. Chang K, Lo P. Hurst exponents and linear regression with an application to low-power beta characterization in meditation EEG. *Am J Electroneurodiagnostic Technol.* 2005;45(2):130-8.
15. Natarajan K, Acharya U, Alias F, Tiboleng T, Puthusserypady S. Nonlinear analysis of EEG signals at different mental states. *BioMedical Engineering Online* 2004 [acceso: 20/12/2019]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC400247/>
16. Rahmani B, Wong C, Norouzzadeh P, Bodurka J, McKinney B. Dynamical Hurst analysis identifies EEG channel differences between PTSD and healthy controls. *Plos One.* 2018 [acceso: 15/12//2019]. Disponible en: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0199144>
17. Maureira F, Flores E, Díaz H, Barroso H, Rueff C, Bravo P, *et al.* Efectos de una sesión de ejercicio físico sobre la actividad no lineal de las ondas cerebrales en estado basal. *Retos* 2020;38:180-7.

18. Montero F, Moran F. Biofísica: procesos de autoorganización en biología. Madrid: EUDEMA; 1992.
19. Portnova G, Atanov M. Age-dependent changes of the EEG data: comparative study of correlation dimension D2, spectral analysis, peak alpha frequency and stability of rhythms. International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology 2016;4(2):5661.
20. Rosales M. Resonancia magnética funcional: una nueva herramienta para explorar la actividad cerebral y obtener un mapa de su corteza. Revista Chilena de Radiología 2003;9(2):86-91.
21. Rivera J. Análisis de series temporales diarias de aperturas, máximos, mínimos y cierres de activos financieros a través del exponente de Hurst [tesis doctoral]. Cataluña: Universidad Central de Cataluña; 2016.
22. Contreras-Troya T, Morales-Matamoros O, Trueba-Ríos B, Tejeida-Padilla R, Balankin A. Análisis fractal de la epilepsia. Científica 2009;13(2):85-94.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Fernando Maureira Cid: Concepción de la idea, formulación de la metodología, análisis estadístico, redacción del artículo y aprobación del manuscrito final.

Elizabeth Flores Ferro: Búsqueda de la literatura, realización de las mediciones, apoyo en la redacción del artículo y aprobación del manuscrito final.