



*Revista Digital de Educación Física*

ISSN: 1989-8304 D.L.: J 864-2009

## **ELECTROENCEFALOGRAFÍA (EEG) Y DIVERSAS MANIFESTACIONES DEL MOVIMIENTO: UNA REVISIÓN DEL 2000 AL 2017**

**Fernando Maureira Cid**

PhD. en Educación, especialista en Neurociencia. Docente Escuela de Educación en Ciencias del Movimiento y Deportes, Universidad Católica Silva Henríquez. Santiago de Chile. Email: [maureirafernando@yahoo.es](mailto:maureirafernando@yahoo.es)

**Elizabeth Flores Ferro**

Mg. en Docencia e Investigación Universitaria. Estudiante Doctorado en Educación, Universidad SEK. Santiago de Chile. Email: [prof.elizabeth.flores@gmail.com](mailto:prof.elizabeth.flores@gmail.com)

### **RESUMEN**

El siguiente trabajo es una revisión de las investigaciones donde se utilizó el electroencefalograma (EEG) para estudiar diversas manifestaciones del movimiento humano, como los efectos del ejercicio físico sobre las cortezas cerebrales, cambios de la actividad cerebral durante la realización de un movimiento, comparaciones de la actividad cerebral entre deportistas y no deportistas, etc. La búsqueda se realizó en las bases de datos Dialnet, Redalyc, Scielo, Medline/pubmed y Scopus, del total 28 artículos cumplían con los criterios de inclusión (publicados entre el 1° de enero del 2000 y 20 de diciembre del 2017, idioma español, inglés o portugués, artículos de investigación, estudios realizados con seres humanos y muestras con sujetos sanos). Todos los estudios dan cuenta de las diferencias cerebrales entre deportistas y no deportistas, asimetrías cerebrales durante la planificación y ejecución de movimientos, y cambios en las ondas cerebrales tras la realización del ejercicio físico.

### **PALABRAS CLAVE:**

Electroencefalografía; movimiento; ejercicio físico; asimetría cerebral; deportistas, sedentarios.

## 1. INTRODUCCIÓN

La electroencefalografía (EEG) corresponde a una técnica de estudio de la actividad eléctrica de la corteza cerebral, la cual se basa en la actividad excitatoria o inhibitoria de las neuronas piramidales ubicadas en dicha región (Bear, Connors y Paradiso, 2016). Berger (1929) publicó los primeros trabajos con este tipo de registros en humanos. Esta técnica suele ser no invasiva, ya que generalmente los electrodos se ubican sobre el cuero cabelludo (aunque en ocasiones es posible ubicarlos en la corteza cerebral o intracerebralmente) y registra la actividad neuronal en tiempo real (Ramos, Morales, Egozcue, Pabón y Alonso, 2009).

Cada electrodo registra la actividad de un conjunto de neuronas, siendo esta actividad el resultado de la existencia de dipolos eléctricos generados por la suma de potenciales post-sinápticos excitatorios (PPSE) o potenciales post-sinápticos inhibitorios (PPSI) que se generan en el soma y las dendritas de las neuronas piramidales (González, 2014). Además, cada electrodo mide la diferencia de potencial con otro electrodo de referencia (Niedermeyer y Da Silva, 2005). Actualmente existe un sistema internacional de ubicación de los electrodos llamado sistema 10/20, lo cual permite comparar registros de diferentes estudios.

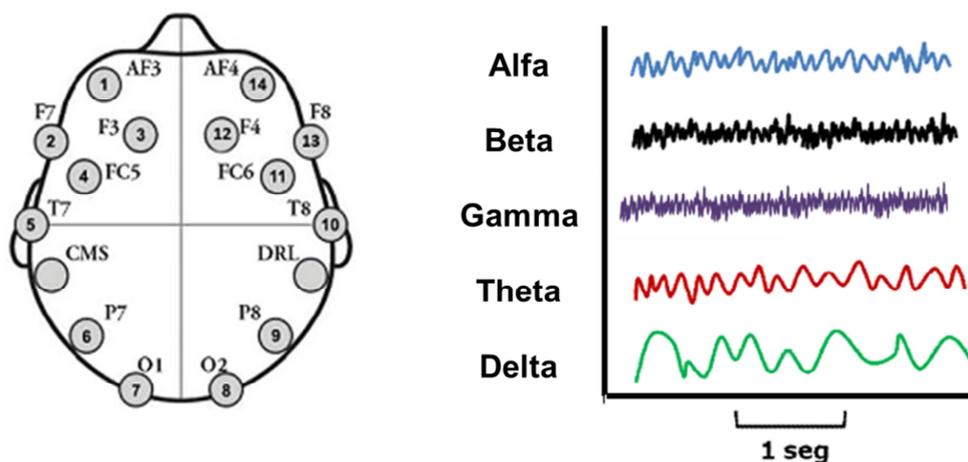


Figura 1. A la izquierda ubicación de 14 electrodos según el sistema internacional 10-20. A la derecha esquema de diversas frecuencias de ondas cerebrales (Modificado de Díaz, Maureira y Córdova, 2017; Maureira y Flores, 2016).

En relación con el registro de actividad eléctrica, el EEG entrega cinco tipos de ondas, las cuales se diferencian por: a) su frecuencia (cantidad de veces que la onda se repite) que se mide en Hercios (Hz), por lo tanto, 3 Hz significa que la onda se repite 3 veces en un segundo; b) su amplitud, que corresponde a la diferencia entre el voltaje máximo y mínimo de la onda, lo cual se mide en microvoltios  $\mu\text{V}$  (Talamillo, 2011). Las ondas cerebrales se clasifican en (Maureira, 2017; Maureira y Flores, 2016):

- Alfa que poseen un rango de 8-12 Hz que son características de un sujeto despierto, pero relajado y con los ojos cerrados.

- Beta que poseen un rango de 13-30 Hz, que son características de un sujeto cuando esta despierto y llevando a cabo alguna actividad intelectual.
- Gamma que poseen un rango  $>30$  Hz, que se cree tiene que ver con la percepción consciente.
- Theta que poseen un rango de 3,5-7,5 Hz, que son características de un sujeto durante el sueño liviano.
- Delta que poseen un rango de 1-3 Hz, que son características de un sujeto durante el sueño profundo.

Las ondas Mu corresponde a un subtipo de onda alfa, que se presenta en las áreas motoras centrales del cerebro, en la región rolándica, la cual ha sido estudiada en relación con la planificación y ejecución motriz. Los estudios de la actividad eléctrica de la corteza cerebral se constituyen como una valiosa herramienta para conocer los efectos del ejercicio físico y como este contribuye a modificar la actividad neurofisiológica, lo cual podría ser responsable de las mejoras cognitivas como la atención (De Bruin, van del Zwan y Bögels, 2016; Leong, Moghadam y Hashim, 2015; Tine, 2014), memoria (Hawkes, Manselle y Woollacott, 2014; Maureira, Carvajal, Henríquez, Vega y Acuña, 2015), funciones ejecutivas (Browne, Costa, Sales, Fonteles, Moraes y Barros, 2016; Chang Ku, Tomporowski, Chen y Huang, 2012; Liu-Ambrose, Nagamatsu, Graf, Beattie, Ashe y Handy, 2010), rendimiento académico (Dwyer, Sallis, Blizzard, Lazarus y Dean, 2001; Maureira, Díaz, Foos, Ibañez, Molina, Aravena, et al., 2014), etc.

Debido a lo anterior, es que se realiza la presente revisión con el objetivo de dar cuenta de los resultados de investigaciones que utilizan el EEG para estudiar la planificación y ejecución de movimiento, imaginación de una acción motriz, efectos de diversas sesiones de ejercicios sobre la actividad cerebral y la comparación entre actividad cortical de deportistas y no deportistas. Para ello se analizaron documentos publicados en las bases de datos Dialnet, Redalyc, Scielo, Medline/Pubmed y Scopus, debido a su importancia en el contexto investigativo. Las palabras claves utilizadas en la búsqueda fueron: electroencefalografía y ejercicio físico, EEG y ejercicio físico, electroencephalography and physical exercise, EEG and physical exercise.

La búsqueda entregó un total de 1.211 artículos (Dialnet=93; Redalyc=36; Scielo=58; Medline/Pubmed=925; Scopus=99) de los cuales 28 cumplían con los siguientes criterios de inclusión: a) publicados entre el 1° de enero del año 2000 y el 20 de diciembre del 2017; b) idioma español, inglés o portugués; c) artículos de investigación originales, de corte transversal y longitudinal; d) estudios realizados en seres humanos; e) muestras con sujetos sanos.

## 2. RESULTADOS

En la tabla 1 se muestran las 28 publicaciones donde se utilizó el EEG para estudiar el movimiento desde diversas perspectivas entre los años 2000 y 2017. Es posible notar que el año 2010 es el que presenta más estudios con 7, luego el 2016 con 5 y el 2014 con 4. El primer estudio data tardíamente del año 2007, no encontrándose en la revisión de la literatura trabajos que cumplieren los criterios de inclusión entre el año 2000 y 2006.

Tabla 1. Estudio de EEG en diversas manifestaciones del movimiento.

<b>Autores</b>	<b>Año</b>	<b>Muestra</b>	<b>Procedimiento</b>	<b>Resultados</b>
Díaz et al.	2017	8 bailarines profesionales	Registro EEG durante 2 minutos de imaginación de una coreografía	Asimetría hemisférica a favor de la región izquierda y mayor puntaje H en área temporal
Díaz et al.	2017	10 bailarines profesionales	Registro EEG durante 2 minutos de imaginación de una coreografía	Disminución en la correlación de electrodos en ondas beta y gamma durante proceso cognitivo
Darocha et al.	2016	7 bailarinas y 7 voleibolistas	Registro EEG durante la observación de un video deportivo y luego imaginarlo	Diferencias en regiones cerebrales de planificación y control motor entre ambos grupos
Machado et al.	2016	4 hombres y 11 mujeres diestras	Registro EEG durante la realización de un trabajo motor antes y después de 48 horas de inmovilización	Aumento de la potencia absoluta de ondas beta de la corteza motora contralateral
Machado et al.	2016	4 hombres y 11 mujeres diestras	Registro EEG durante la realización de un trabajo motor antes y después de 48 horas de inmovilización	Aumento de la potencia absoluta de las ondas gamma fronto-centrales
Filippi et al.	2016	36 bebés de 7 meses	Registro EEG durante la imitación de una acción	La desincronización de Mu predice el comportamiento imitativo del bebé
Ludyga et al.	2016	36 ciclistas	Registro EEG para conocer los efectos de entrenamientos a diversas cadencias	Reducción de potencia alfa y beta tras el entrenamiento
Cantillo et al.	2014	30 estudiantes universitarios	Registro EEG al mover e imaginar movimientos de la mano derecha e izquierda	Diferencias entre géneros y frecuencias alfas y betas entre la ejecución e imaginación del movimiento
Almanza et al.	2014	12 adultos jugadores de video juegos y 12 no jugadores	Registro EEG durante la observación del video de un juego	El grupo experto mostro más correlación de la onda gamma en región prefrontal-parietal derecho
Kiefer et al.	2014	30 personas de 18 a 30 años	Registro EEG durante una prueba de trazado de estrella frente al espejo	Mayor actividad alfa y beta en el hemisferio izquierdo y en la corteza occipital
Fry et al.	2014	15 hombres	Registro EEG durante la extensión isométrica de rodilla	Incremento de banda gamma durante las contracciones

Jain et al.	2013	10 voluntarios	Registro EEG durante pedaleo con y sin carga	La onda beta en el área motora presenta una mayor desincronización durante el pedaleo activo
Babiloni et al.	2011	12 golfistas expertos	Registro EEG mientras realizaban un gesto técnico del Golf	Coherencia intrahemisférica de la banda alfa en la región parietal bilateral y parietal central con mayor amplitud en los lanzamientos exitosos
Infarinato et al.	2011	18 karatecas y 28 sujetos no deportistas	Registro EEG con los ojos cerrados y abiertos en reposo	Ondas alfa menores en deportistas en la región frontal, central y occipital
Babiloni et al.	2010	16 karatecas de elite, 15 karatecas aficionados y 17 no deportistas	Registro EEG durante la observación de videos de karate	Los deportistas de elite presentan una onda alfa reducida, asociada a una mayor eficiencia neural
Babiloni et al.	2010	16 karatecas de élite, 20 karatecas amateur y 25 no deportistas	Registro EEG con los ojos cerrados	Mayor amplitud de la onda alfa, delta y theta en deportistas de élite
Hall et al.	2010	30 participantes	Registro EEG en reposo antes y después de trabajo aeróbico	La asimetría frontal predice respuestas afectivas post-ejercicio
Ftaiti et al.	2010	Grupo de mujeres sedentarias	Registro EEG tras ejercicio aeróbico extenuante con temperatura neutra y calor	El trabajo extenuante con calor aumenta la relación ondas alfa/beta que influye en la fatiga
Fumoto et al.	2010	10 sujetos con edad media 32±2,2 años	Registro de EEG y serotonina durante y tras ejercicio aeróbico	Aumento de la onda alfa durante y después del ejercicio. Aumento de la serotonina después del ejercicio
Del Percio et al.	2010	10 karatecas de élite y 12 no deportistas	Registro EEG durante la extensión de muñeca derecha e izquierda	Durante la ejecución del movimiento la onda alfa es menor en deportistas
Vogt et al.	2010	18 adultos mayores de 54 a 72 años	Registro EEG tras 45-60 minutos de caminata	Aumento onda alfa frontal derecha en relación con la izquierda
Stroh et al.	2009	35 adolescentes	Registro EEG durante la resolución de 2 test antes y después de una sesión de ejercicio aeróbico	Asociación de la señal del EEG con la aptitud física, pero no con la sesión de ejercicio aeróbico
Woo et al.	2009	16 estudiantes de 19 a 23 años	Registro EEG frontal en reposo y después	Valores más altos de vigor psicológico y

			de 3 tiempos de diferentes de ejercicio	asimetría frontal después de 30 minutos
Schneider et al.	2009	11 corredores amateur	Registro EEG después de tres ejercicios aeróbicos	Aumento de la actividad cerebral depende del tipo de ejercicio realizado
Del Percio et al.	2009	10 karatecas de élite, 10 esgrimistas de élite y 12 no deportistas	Registro EEG en posición bipodal y monopodal	Los potenciales decrecientes relacionados con la tarea en onda alfa disminuyeron en los deportistas en relación con lo no deportistas
Del Percio et al.	2008	11 karatecas de élite, 11 esgrimistas y 11 no deportistas	Registro EEG durante la observación de imágenes de karate y esgrima	Mayores potenciales en área motora y sensoriomotoras en no deportistas
Moraes et al.	2007	4 hombres y 6 mujeres	Registro EEG antes y después de ejercicio de máximo esfuerzo	Aumento de la potencia absoluta de la onda beta en región frontal y central
Doppelmayr et al.	2007	8 expertos y 10 principiantes de tiro con rifle	Registro del EEG durante series de disparos	Onda theta con mayor potencia en expertos

Díaz, Maureira y Córdova (2017) evaluaron a 8 bailarines profesionales de 20 a 30 años, los cuales debían imaginar durante dos 2 minutos y con los ojos cerrados una coreografía. Se estudio la diferencia inter-hemisférica y entre las áreas frontales, temporales y occipitales. Se utilizó el exponente de Hurst (H) como índice de medición del orden/caos de la actividad neural registrada en el EEG. Los resultados muestran una asimetría en el área temporal y occipital, con mayores puntuaciones H en el hemisferio izquierdo. También existen diferencias entre las tres áreas, siendo la temporal la que presenta mayores puntajes de H. Se concluye que durante la imaginación de una danza moderna, el hemisferio izquierdo y la región temporal (asociada a la memoria) presentan una actividad más persistente ( $H > 0,5$ ), es decir, incrementos de actividad neuronal en el pasado se siguen de incrementos en el futuro y viceversa. Otro estudio de Díaz, Maureira, Córdova y Palominos (2017) analizaron las correlaciones de la oscilación de frecuencia de beta y gamma en 10 bailarines profesionales mientras imaginaban una coreografía de dos minutos. Se utilizó el índice de Hurst (H) como indicador de orden/caos y de persistencia a largo tiempo de la actividad cerebral del EEG. Los resultados muestran que H aumenta indicando una tendencia hacia la auto-similitud persistente en beta y gamma, además la cantidad de pares de electrodos altamente correlacionados ( $r < 0,85$ ) disminuye, lo que sugiere una desincronización en ambas bandas durante la resolución de una tarea cognitiva.

En un estudio de Darocha, De Souza, Spindolab, Vaza, De Oliveira y Geremiad (2016) evaluaron a 14 mujeres altamente entrenadas, siete de ellas en ballet (edad= $22,9 \pm 1,8$  años) y las otras siete en voleibol (edad= $20,1 \pm 1,6$  años). Para el análisis de la información utilizaron los electrodos de los puntos F3 (corteza motora suplementaria izquierda), F7 (corteza premotora izquierda), C3, C4 y Cz (corteza motora primaria izquierda, derecha y central), P3, P4 y Pz (corteza parietal

izquierda, derecha y central). En una primera instancia se le mostró a cada participante un video de 20 segundos de un movimiento específico de su deporte y luego se le pidió que imaginara dicho gesto deportivo. En ambas instancias se registró su actividad cerebral con el EEG. Los resultados de la observación e imaginación del movimiento de ballet muestran diferencias en las ondas gamma del electrodo C3 entre bailarinas y voleibolistas ( $p=0,002$ ), y de la misma región cerebral y F3 entre los tiempos de visualización e imaginación ( $p=0,03$ ;  $p=0,007$ ). Durante la observación e imaginación del movimiento del voleibol sólo se observaron diferencias significativas en el electrodo F7 entre ambos grupos ( $p=0,03$ ). Los autores concluyen que los sujetos altamente entrenados en ballet y voleibol presentan diferencias en el procesamiento cortical en regiones relacionadas con la planificación y control motor.

En otros estudios, Machado, Dos Santos, Teixeira, Do Vale, Cagy, De Sá, et al. (2016) y Machado, Dos Santos, Teixeira, Do Vale, Moreira, Cagy, et al. (2016) evaluaron a 15 personas diestras (4 hombres y 11 mujeres) con una media de  $24,0 \pm 1,2$  años. La muestra realizó una tarea consistente en la flexión y extensión del dedo índice de la mano derecha frente a una determinada señal en la pantalla de un computador. La tarea incluyó 6 bloques de 15 ensayos, con 3 minutos de descanso entre bloques, con una duración total de 24 minutos. En el primer estudio se registraron las ondas cerebrales beta y en el segundo las ondas cerebrales gamma. Después de la sesión se le aplicó un yeso en la mano derecha a los participantes, con los dedos en flexión durante 48 horas, con la finalidad de inmovilizar la región. Después de dos días se retiró el yeso y 5 minutos después se volvió a realizar el mismo trabajo motor. Los resultados del primer trabajo muestran un aumento de la potencia absoluta de las ondas beta de los electrodos Fp2 ( $p=0,042$ ), C3 ( $p=0,025$ ) y P4 ( $p=0,024$ ) tras la inmovilización. Por el contrario, la actividad del electrodo C4 decrece ( $p=0,001$ ). El trabajo concluye que las ondas beta de la corteza motora contralateral aumentan, esto debido a una menor participación de esta área en la planificación del movimiento. Los resultados del segundo trabajo muestran un aumento de la potencia absoluta de las ondas gamma de los electrodos F3 ( $p=0,001$ ), F4 ( $p=0,001$ ), Fz ( $p=0,001$ ), C3 ( $p=0,001$ ), C4 ( $p=0,001$ ) y Cz ( $p=0,001$ ). Se concluye que el aumento de la potencia de la banda gamma en áreas fronto-centrales se produce por una alteración de la red neuronal que permite la unión de la planificación y ejecución del movimiento.

Filippi, Cannon, Fox, Thorpe, Ferrari y Woodward (2016) estudiaron las respuestas neurales y conductuales en bebés de 7 meses, como una forma de relacionar señales neurofisiológicas de activación del sistema motor y el comportamiento social. Se observó una mayor desincronización de Mu en regiones centrales del área motora cuando los niños escogían el mismo objeto que anteriormente escogía el experimentador, además la desincronización de Mu durante la acción del experimentador predijo la posterior reproducción del comportamiento del bebé. Los autores concluyen que la activación del sistema motor predice la imitación de conductas durante la infancia. Por su parte, Ludyga, Gronwald y Hottenrott (2016) evaluaron a 36 ciclistas (24 hombres y 12 mujeres) para conocer el efecto de un ejercicio de cadencia sobre actividad cortical del cerebro. Para ello se asignaron los participantes a uno de tres grupos: ejercicio de alta cadencia con 120 revoluciones por minuto (G1), ejercicio de baja cadencia (G2) y control (GC). Se aplicó 4 horas de entrenamiento de resistencia básico por semana y los grupos G1 y G2 completaron además 4 sesiones de 60 minutos con alta y baja

cadencia respectivamente. Se registro la actividad cerebral con EEG al inicio y final del estudio. Los integrantes de G1 y G2 presentaron reducciones de la densidad espectral de la potencia de alfa y beta, siendo más pronunciada en G1. Los autores concluyen que la actividad de la corteza cerebral es especialmente sensible al entrenamiento de alta cadencia, lo que podría influir positivamente en la sensación de fatiga central.

En otro estudio, Cantillo, Gutiérrez, Flores, Cariño y Viñas (2014) evaluaron a 30 estudiantes universitarios diestros con edad de  $25,8 \pm 2,94$  años. El experimento trataba del registro del EEG del sujeto con los ojos cerrados y abiertos y al abrir-cerrar la mano derecha o izquierda o imaginar que se abría-cerraba la mano derecha o izquierda frente a cierto estímulo. Los resultados mostraron desincronización de la banda alfa en el 55% de los sujetos con la imaginación del movimiento, llegando a un 83% cuando era el movimiento imaginado de la mano derecha. Los canales Cz, C4, C3, T3 y P3 presentan diferencias entre géneros y en las frecuencias alfa y beta, los cuales podrían utilizarse como referencia para diferenciar la actividad cerebral cuando se ejecuta y cuando se imagina el movimiento.

Almanza, Llamas, Guevara y Hernández (2014) estudiaron la banda gamma del EEG durante la imaginación de una tarea motora en jugadores de videojuegos (gamer players). Para ello evaluaron a 24 hombres adultos de 18 a 25 años, clasificados equitativamente en dos grupos: jugadores de video juegos (con 7 horas semanales como mínimo por 2 años) y participantes sin experiencia en video juegos. Se registró la actividad cerebral de todos los sujetos en estado de reposo y durante 5 min de observación del juego Halo Reach. En condiciones basales no se observaron diferencias de correlación prefrontal-parietal en el hemisferio derecho (F4-P4) entre ambos grupos y durante la observación del video juego sólo se presentaron diferencias en la banda gamma (31-50 Hz) de la correlación F4-P4. La correlación prefrontal-parietal en el hemisferio izquierdo (F3-P3) no mostró diferencias en ninguna de las condiciones entre los grupos de expertos y las participantes sin experiencia en video juegos. Los autores concluyen que el acoplamiento prefrontal-parietal podría representar una característica funcional en los sujetos expertos en video juegos.

En un estudio de Kiefer, Gualberto y Myer (2014) evaluaron 30 participantes de 18 a 30 años, fueron sometidos a la prueba de trazado de estrella frente al espejo, siendo aleatoriamente asignados a 3 grupos: práctica completa, práctica parcial y control. Se analizaron los electrodos C3, C4, O1 y O2. Los resultados revelan que en la onda alfa inferior, alfa superior, beta inferior y beta superior de la región occipital presentó mayor actividad que la central ( $p < 0,001$ ) y el hemisferio izquierdo más que el derecho ( $p < 0,001$ ) en las tres condiciones. Los autores concluyen que durante la ejecución de tareas visuales-espaciales se requiere una mayor actividad del hemisferio izquierdo y regiones occipitales. Fry, Vogt y Folland (2014) estudiaron la actividad de la corteza sensoriomotora mediante EEG en 15 hombres de  $24 \pm 5$  años, durante una serie de contracciones isométricas de rodilla al 15%, 30%, 45% y 60% del torque voluntario máximo, evidenciando un aumento solo de la banda gamma (30-50 Hz) en todas las contracciones. Es posible que el rango gamma pueda tener un papel funcional en la atención durante la anticipación y rendimiento en las tareas sensoriomotoras.

Jain, Gourab, Schindler y Schmit (2013) evaluaron a 10 voluntarios mientras realizaban pedaleo en cicloergómetro sin esfuerzo y con carga (activo). La amplitud de pick positivo a pick negativo de la onda beta registrada en el electrodo Cz fue mayor en el pedaleo pasivo que en el activo ( $p < 0,01$ ) y las oscilaciones de la onda beta en las áreas motoras que representan a la pierna se desincronizaron durante el pedaleo activo en comparación con el pasivo ( $p < 0,01$ ). Se concluye que la actividad cortical aumenta durante el reclutamiento de los músculos de flexo-extensión de las piernas durante el pedaleo con carga.

Un estudio de Babiloni, Infarinato, Marzano, Iacoboni, Dassú, Soricelli, et al. (2011) con 12 golfistas expertos diestros mostró que la coherencia intrahemisférica de la banda alfa inferior (8-10 Hz) en la región parietal bilateral (P3-F3 y P4-F4) y parietal central (P3-C3 y P4-C4) posee mayores amplitudes en los lanzamientos exitosos en comparación con los fallidos ( $p < 0,004$ ). La misma situación ocurrió para la banda alfa superior (10-12 Hz) en las regiones parietales frontales bilaterales ( $p < 0,004$ ). Los autores concluyen que el acoplamiento funcional intrahemisférico de las ondas alfa en el área parietal está implicado en el control motor fino en golfistas. Infarinato, Marzano, Iacoboni, Aschieri, Lizio, Soricelli, et al. (2011) compararon los ritmos alfa con los ojos cerrados/abiertos en estados de reposo como un índice de eficiencia neuronal entre 18 deportistas de karate y 28 sujetos no atletas. Durante la medición con los ojos abiertos, los deportistas presentaron ondas alfa inferiores (8-10 Hz) menores que los no atletas, en las áreas frontales ( $p < 0,00002$ ), central ( $p < 0,008$ ) y occipital ( $p < 0,02$ ) y ondas alfa superiores (10-12 Hz) menores en áreas frontales ( $p < 0,0000$ ) y centrales ( $p < 0,01$ ). Los resultados sugieren que el cerebro de los deportistas posee una reactividad cortical reducida a los ojos que se abren en el estado de reposo.

En un estudio de Babiloni, Marzano, Infarinato, Iacoboni, Rizza, Aschieri, et al. (2010) compararon la actividad cortical de 16 atletas de elite de karate, 15 atletas aficionados y 17 no deportistas, mientras observaban videos de karate y donde debían evaluar el nivel técnico/atletico entre 0 y 10. Los resultados muestran que los ritmos alfa (8-12 Hz) de las vías dorsales y regiones de neuronas espejo (corteza de Broca y áreas parietales) disminuyen en atletas de elite, concluyendo que las acciones deportivas observadas se relacionan con ondas alfa menos pronunciadas, lo que sería un posible índice de eficiencia neural en expertos de un deporte. Otra investigación de Babiloni, Marzano, Iacoboni, Infarinato, Aschieri, Buffo, et al. (2010) compara la actividad del EEG entre 16 karatecas de elite, 20 karatecas amateur y 25 no deportistas. En reposo con los ojos cerrados la amplitud de las ondas alfa inferior (8-10,5 Hz) es mayor en atletas de elite, misma situación que ocurre con las ondas delta parietales y occipitales, y en las ondas theta occipitales. Los autores concluyen que la sincronización neural cortical de los ritmos del EEG en estado de reposo con los ojos cerrados es mejor en atletas de elite.

Un estudio de Hall, Ekkekakis y Petruzzello (2010) recolectó datos con el EEG de 30 participantes en reposo y se utilizó para predecir respuestas afectivas después de correr en treadmill a tres intensidades: por debajo del umbral ventilatorio, en el umbral ventilatorio y sobre el umbral ventilatorio. Antes del ejercicio, inmediatamente después, 5, 10 y 20 minutos terminado el ejercicio se evaluó la excitación energética y la apertura tensa. Los resultados muestran que la asimetría frontal en reposo predice respuestas afectivas después del ejercicio, donde una mayor actividad frontal izquierda predice menor excitación energética, situación

opuesta al modelo de dirección de la motivación. Ftaiti, Kacem, Jaidane, Tabka y Dogui (2010) evaluaron a un grupo de mujeres sedentarias en un cicloergómetro en dos condiciones: ejercicio extenuante con temperatura ambiental neutra (G1) y ejercicio extenuante con calor (G2). La temperatura timpánica y la frecuencia cardíaca aumentó en ambas sesiones, pero alcanzó niveles mayores en G2. El índice ondas alfa/beta aumento en ambos ensayos, sobre todo en G2 ( $p < 0,01$ ), lo que se asoció a mayor fatiga. Se concluyo que el trabajo físico agotador en condiciones de calor induce cambios en la actividad cerebral (relación alfa/beta) de mayor magnitud que trabajos agotadores en condiciones neutras.

Fumoto, Oshima, Kamiya, Kikuchi, Seki, Nakatani, et al. (2010) evaluaron la participación de la corteza prefrontal (CPF) y el sistema dopaminérgico (5-HT) durante y después de ejercicio de pedaleo en cicloergómetro. Los sujetos realizaron el trabajo durante 15 minutos a 60 revoluciones por minuto, con un esfuerzo percibido de 12-13 en la escala de Borg. Los resultados muestran un aumento de los niveles de hemoglobina oxigenada en la CPF ventral durante el ejercicio en comparación con la CPF dorsal. El EEG presentó cambios durante y después del ejercicio, con aumento de la onda alfa superior (10-13 Hz) y aumento del nivel de 5-HT después del ejercicio. Los cambios del EEG podrían ser causados por el aumento de niveles sanguíneos de 5-HT. Otro estudio de Del Percio, Infarinato, Iacoboni, Marzano, Soricelli, Aschieri, et al. (2010) donde evaluaron a 10 karates de élite y 12 no deportistas diestros, los cuales realizaron rápidas extensiones voluntarias de muñeca de la mano derecha e izquierda. Durante la preparación y ejecución del movimiento de la mano derecha la desincronización relacionada con el evento en alfa inferior (8-10 Hz) y alfa superior (10-12 Hz) fue más baja en el área motora primaria, área premotoras laterales y mediales en los karates de élite. Para los movimientos de la mano izquierda sólo la desincronización relacionada con el evento en alfa superior fue menor en los deportistas. Los autores concluyen que en deportistas de élite la actividad cortical durante el movimiento voluntario simple es menor que en no deportistas.

Vogt, Schneider, Brummer & Struder (2010) evaluaron el EEG en dos posiciones frontales (Fp1-Fp2) antes y después de caminar a un ritmo autoseleccionado durante 45-60 minutos por adultos mayores. Se observó un aumento de la onda alfa inferior (7,5-10 Hz) frontal derecha en relación con la frontal izquierda ( $p < 0,05$ ) y una mejora en el estado de ánimo. Se concluye que el ejercicio físico tiene efectos beneficiosos asociados a la corteza frontal derecha en adultos mayores.

Por su parte, Stroh, Kubesch, Dieterle, Ruchow, Heim y Kiefer (2009) evaluaron la aptitud física y los efectos de una sesión de ejercicio aeróbico sobre la preparación de tareas e inhibición de respuestas de 35 adolescentes de 13 y 14 años. Los resultados indican que los sujetos con mejor aptitud física presentan mayor amplitud CNV de la señal del EEG lo que representa mejores procesos de preparación de la tarea y amplitud disminuida del N2 que se asocia con procesos ejecutivos más eficientes. Las amplitudes P3 asociadas a la atención y memoria no mostraron efectos de la aptitud física. La sesión de ejercicio no produjo efecto en ninguna de las variables estudiadas. Se concluye que la aptitud física influye en el procesamiento cognitivo, pero no una sesión de ejercicio aeróbico. Woo, Kim, Kim, Petruzzello y Hatfield (2009) evaluaron a 16 estudiantes universitarias de 19 a 23 años, con el cuestionario perfil de estados de ánimo después de reposo y tres

duraciones diferentes de ejercicios (15, 30 y 45 minutos) realizadas justo debajo del umbral ventilatorio. Se monitoreo la actividad frontal con el EEG. Los resultados muestran valores más altos de vigor psicológico y asimetría del EEG frontal después de los 30 minutos, con lo cual se apoya la relación de U invertida de dosis-respuesta según la duración del ejercicio.

Un trabajo de Schneider, Brummer, Abel, Askew y Struder (2009) donde evaluaron a 11 corredores amateur antes y después de un trabajo incremental en treadmill, cicloergómetro de brazos y bicicleta estática a través de un EEG. Los resultados revelaron un aumento de la actividad alfa frontal inmediatamente después del ejercicio treadmill y cicloergómetro de brazos y aumento de alfa en regiones parietales. Los tres ejercicios produjeron un aumento de onda Beta en la región 7 de Brodmann. Quince y treinta minutos después del ejercicio se produjo una disminución de la actividad frontal y aumento en la región parietal después del treadmill. Se concluye que los patrones de activación cerebral están relacionados con diferentes tipos de ejercicios.

Del Percio, Babiloni, Marzano, Iacoboni, Infarinato, Vecchio, et al. (2009) evaluaron a 10 karatecas de élite, 10 esgrimistas de élite y 12 no deportistas en posición bipodal y monopodal registrando la actividad del EEG. Los potenciales decrecientes relacionados con la tarea (PDRT) de la onda alfa (8-12 Hz) disminuyeron durante la tarea monopodalica en relación con la bipodálica. Los PDRT en alfa inferior (8-10 Hz) fue más baja en los deportistas que en los no deportistas en el área parietal central izquierda, central derecha, parietal medio y parietal derecha ( $p < 0,01$ ). La amplitud de los PDRT de alfa superior (10-12 Hz) también fue menor en deportistas en el área frontal derecha, central izquierda, central derecha y parietal media ( $p < 0,03$ ). Se concluye que la actividad alfa cortical se reduce (desincronización) en los deportistas basado en la eficiencia neural, en relación con los no deportistas.

Del Percio, Rossini, Marzarno, Iacoboni, Infarinato, Aschieri, et al. (2008) evaluaron a 11 karatecas de élite, 11 esgrimistas de élite y 11 no deportistas, todos diestros, registrando la actividad cerebral mediante el EEG durante la observación de imágenes de karate y esgrima mientras reconocían movimientos al lado derecho e izquierdo de la pantalla. Se midieron los potenciales relacionados con la preparación y la iniciación del movimiento. Los resultados evidencian que en los movimientos correctos los potenciales del área motora suplementaria y sensoriomotoras contralaterales fueron más amplios en los no deportistas, además los potenciales motores del área sensoriomotriz ipsilateral fue mayor en karatecas de élite que en los esgrimistas. Se concluye que la eficiencia neural depende de varios factores, incluido el lado del movimiento, el hemisferio y el tipo de deportista.

Un estudio de Moraes, Ferreira, Deslandes, Cagy, Pompeu, Ribeiro, et al. (2007) evaluaron a 10 participantes (4 hombres y 6 mujeres) con edad de  $26 \pm 5$  años. Los autores midieron durante ocho minutos la potencia absoluta de las ondas alfa y beta en reposo antes y después de una intervención de esfuerzo máximo en cicloergómetro. Los resultados entregan un incremento de la onda beta en los electrodos Fp1, F3, F4 y C4 (en todos  $p < 0,05$ ), en tanto, no se observaron diferencias significativas en las ondas alfas. Los investigadores concluyen que este aumento de beta se produce por una mayor actividad cortical, que podría generarse por la

modificación de mecanismos metabólicos, fisiológicos, bioquímicos o incluso emocionales tras el ejercicio físico.

Doppelmayr, Finkenzeller y Sauseng (2007) investigaron la onda theta en la corteza frontal en 8 expertos y 10 principiantes de tiro con rifle. El grupo experto presentó un aumento de la potencia de la onda theta durante los últimos 3 segundos antes de disparar, específicamente en el cíngulo anterior la corteza frontal medial, ambas regiones relacionadas con la atención. Los principiantes mantienen un nivel relativamente constante de atención hacia el objetivo, en cambio los expertos pueden aumentar la atención en el momento del disparo.

La figura 2 corresponde a un resumen con el porcentaje de trabajos que describen la actividad neurofisiológica en diversas circunstancias asociadas a movimientos. Se observa que más del 60% de los estudios se realizaron con sujetos en movimiento o tras la realización de ejercicio físico, un 11% imaginando un movimiento, otro 11% observando videos sobre gestos deportivos, 3 estudios (11%) incluían comparaciones entre deportistas y no deportistas en estado inmóvil y solo una investigación utilizó la imaginación y la ejecución de un movimiento.

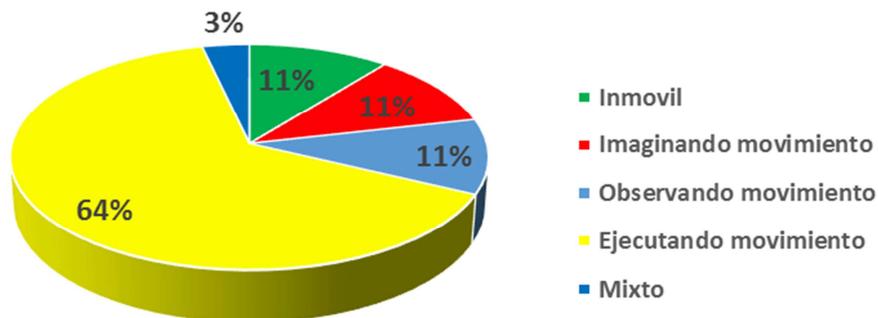


Figura 2. Porcentaje de trabajos que muestran mediciones de la actividad cerebral en diversas manifestaciones del movimiento.

### 3. CONCLUSIÓN

La revisión de la literatura entregó 28 estudios donde se utilizó el EEG para estudiar diversas manifestaciones del movimiento humano. Del total, siete trabajos comparan la actividad de la corteza cerebral entre deportistas y no deportistas, mostrando diferencias en regiones relacionadas con la planificación y control motor. Cuatro estudios registraron la actividad EEG durante la ejecución de un movimiento evidenciando los cambios en la corteza cerebral durante la acción. Once estudios analizan los efectos de una sesión de ejercicio físico o inmovilización sobre la actividad del EEG, dando cuenta de variaciones en diversas cortezas en diversas ondas cerebrales. Tres trabajos estudian la actividad cerebral cuando los sujetos imaginan un movimiento mostrando la neurofisiología de diversas áreas (incluida la motora) aun cuando no se realiza el movimiento. Finalmente, dos trabajos utilizan matemática no lineal (índice de Hurst) para el análisis de la actividad eléctrica de la corteza, basándose en la teoría del caos para intentar comprender el accionar del cerebro.

Todos los estudios evidencian cambios en la actividad cerebral durante la realización de un movimiento, tras una sesión de ejercicio físico o diferencias entre la actividad de la corteza cerebral de deportistas y no deportista. Esto da cuenta de la importancia del EEG como herramienta para estudiar el cerebro y su relación con el movimiento, incluido el efecto del ejercicio sobre funciones cognitivas.

Son necesarios más estudios para ahondar en la compleja relación de la actividad cerebral, cognición y movimiento humano, profundizando en los estudios o analizando nuevos enfoques que ayuden a comprender mejor este ámbito de la naturaleza humana.

#### 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almanza, M., Llamas, J., Guevara, M. & Hernández, M. (2014). Increased Prefrontal-Parietal EEG Gamma Band Correlation during Motor Imagery in Expert Video Game Players. *Actualidades en Psicología*, 28(117), 2014, 26-35.

Babiloni, C., Infarinato, F., Marzano, N., Iacoboni, M., Dassú, F., Soricelli, A., et al. (2011). Intra-hemispheric functional coupling of alpha rhythms is related to golfer's performance: A coherence EEG study. *International Journal of Psychophysiology*, 82(3), 260-268.

Babiloni, C., Marzano, N., Iacoboni, M., Infarinato, F., Aschieri, P., Buffo, P. et al. (2010). Resting state cortical rhythms in athletes: A high-resolution EEG study. *Brain Research Bulletin*, 81(1), 149-156.

Babiloni, C., Marzano, N., Infarinato, F., Iacoboni, M., Rizza, G., Aschieri, P. et al. (2010). Neural efficiency" of experts' brain during judgment of actions: A high-resolution EEG study in elite and amateur karate athletes. *Behavioural Brain Research*, 207(2), 466-475.

Bear, M., Connors, B. & Paradiso, M. (2016). *Neurociencia, la exploración del cerebro*. Madrid: Wolters Kluwer.

Berger, H. (1929). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen (On the human electroencephalogram). *Archiv f. Psychiatrie u. Nervenkrankheiten* 87, 527-570.

Browne, R., Costa, E., Sales, M., Fonteles, A., Moraes, J. & Barros, J. (2016). Acute effect of vigorous aerobic exercise on the inhibitory control in adolescents. *Revista Paulista de Pediatría*, 34(2), 154-161.

Cantillo, J., Gutiérrez, J., Flores, T., Cariño, R. & Viñas, D. (2014). Caracterización de la actividad eléctrica cerebral relacionada con la imaginación del movimiento de la mano en sujetos sanos. *Revista de Investigación Clínica*, 66(Extra 1), 111-121.

Chang, Y., Ku, P., Tomporowski, P., Chen, F. & Huang, C. (2012). Effects of acute resistance exercise on late-middle-age adults' goal planning. *Medicine & Science Sports Exercise*, 44(9), 1773-1779.

Darocho, C., De Souza, R., Spindolab, M., Vaza, M., De Oliveira, L. y Geremiad, J. (2016). Bailarinas x voleibolistas: efeito de diferentes treinamentos motores sobre o sinal eletroencefalográfico. *Rev. Bras. Ciênc. Esporte*, 38(4), 384-391.

De Bruin, E., van del Zwan, J. & Bögels, S. (2016). A RCT comparing daily mindfulness meditations, biofeedback exercises and daily physical exercise on attention control, executive functioning, mindful awareness, self-compassion and worrying in stressed young adults. *Mindfulness*, 7(5), 1182-1192.

Dwyer, T., Sallis, J., Blizzard, L., Lazarus, R. & Dean, K. (2001). Relation of academic performance physical activity and fitness in children. *Pediatric Exercise Science*, 13, 225-237

Del Percio, C., Babiloni, C., Marzano, N., Iacoboni, M., Infarinato, F., Vecchio, F. et al. (2009). Neural efficiency” of athletes’ brain for upright standing: A high-resolution EEG study. *Brain Research Bulletin*, 79(3-4), 193-200.

Del Percio, C., Infarinato, F., Iacoboni, M., Marzano, N., Soricelli, A., Aschieri, P., et al. (2010). Movement-related desynchronization of alpha rhythms is lower in athletes than non-athletes: A high-resolution EEG study. *Clinical Neurophysiology*, 121(4), 482-491.

Del Percio, C., Rossini, P., Marzarno, N., Iacoboni, M., Infarinato, F., Aschieri, P., et al. (2008). Is there a “neural efficiency” in athletes? A high-resolution EEG study. *Neuroimage*, 42(4), 1544-1553.

Díaz, H., Maureira, F. y Córdova, F. (2017). Temporal scaling and inter-individual hemispheric asymmetry of chaos estimation from EEG time series. *Procedia Computer Science*, 122, 339-345.

Díaz, H., Maureira, F., Córdova, F. y Palominos, F. (2017). Long-range linear correlation and nonlinear chaos estimation differentially characterizes functional connectivity and organization of the brain EEG. *Procedia Computer Science*, 122, 857-864.

Doppelmayr, M., Finkenzeller, T. & Sauseng, P. (2007). Frontal midline theta in the pre-shot phase of rifle shooting: Differences between experts and novices. *Neuropsychologia*, 46(5), 1463-1467.

Filippi, C., Cannon, E., Fox, N., Thorpe, S., Ferrari, P. & Woodward, A. (2016). Motor system activation predicts goal imitation in 7-month-old infants. *Psychological Science*, 27(5), 675-684.

Fry, A., Vogt, T. & Folland, J. (2014). Does sensorimotor cortex activity change with quadriceps femoris torque output? A human electroencephalography study. *Neuroscience*, 275, 540-548.

Ftaïfi, F., Kacem, A., Jaidane, N., Tabka, Z. & Dogui, M. (2010). Changes in EEG activity before and after exhaustive exercise in sedentary women in neutral and hot environments. *Applied Ergonomic*, 41(6), 806-811.

Fumoto, M., Oshima, T., Kamiya, K., Kikuchi, H., Seki, Y., Nakatani, Y. et al. (2010). Ventral prefrontal cortex and serotonergic system activation during pedaling exercise induces negative mood improvement and increased alpha band in EEG. *Behavioural Brain Research*, 213(1), 1-9.

González, J. (2014). *Técnicas de toma de datos y análisis de electroencefalografía*. Disponible en: <http://opera.eii.us.es/sinergia/public/uploads/sinergia/entregables/2013-2014/G2013-2014-9/Grupo9Memoria1.pdf> [consultado el 21 de noviembre de 2017].

Hall, E., Ekkekakis, P. & Petruzzello, S. (2010). Predicting affective responses to exercise using resting EEG frontal asymmetry: Does intensity matter? *Biological Psychology*, 83(3), 201-206.

Hawkes, T., Manselle, W. & Woollacott, M. (2014). Cross-sectional comparison of executive attention function in normally aging long-term T'ai Chi, meditation and aerobic fitness practitioners versus sedentary adults. *Journal of Alternative Complementary Medicine*, 20(3), 178-184

Infarinato, P., Marzano, N., Iacoboni, M., Aschieri, P., Lizio, R., Soricelli, A., et al. (2011). Reactivity of alpha rhythms to eyes opening is lower in athletes than non-athletes: A high-resolution EEG study. *International Journal of Psychophysiology*, 82(3), 240-247.

Jain, S., Gourab, K., Schindler, S. & Schmit, B. (2013). EEG during pedaling: Evidence for cortical control of locomotor tasks. *Clinical Neurophysiology*, 124(2), 379-390.

Kiefer, A., Gualberto, J. & Myer, G. (2014). Train the Brain: Novel Electroencephalography Data Indicate Links between Motor Learning and Brain Adaptations. *J Nov Physiother*, 4(2), 198.

Leong, I., Moghadam, S. & Hashim, H. (2015). Aggregated effects of combining daily milk consumption and aerobic exercise on short-term memory and sustained attention among female students. *Perceptual and Motor Skills*, 120(1), 57-66

Liu-Ambrose, T., Nagamatsu, L., Graf, P., Beattie, B., Ashe, M. & Handy, T. (2010). Resistance training and executive functions: a 12-month randomized controlled trial. *Archives of Internal Medicine*, 170(2), 170-178

Ludyga, S., Gronwald, T. & Hottenrott, K. (2016). Effects of high vs. low cadence training on cyclists' brain cortical activity during exercise. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 19(4), 342-347.

Machado, D., Dos Santos, J., Teixeira, S., Do Vale, V., Moreira, R., Cagy, M., et al. (2016). Involvement of beta absolute power in motor areas after hand immobilization: An EEG study. *MedicalExpress*, 3(5), M160503.

Machado, D., Dos Santos, J., Teixeira, S., Do Vale, V., Cagy, M., De Sá, A., et al. (2016). Gamma absolute power reveals activation of motor areas after hand immobilization. *MedicalExpress*, 3(5), M160504.

Maureira, F. (2017). *¿Qué es la inteligencia?* Madrid: Bubok Publishing.

Maureira, F., Díaz, I., Foos, P., Ibañez, C., Molina, D., Aravena, F., et al. (2014). Relación entre la práctica de actividad física y el rendimiento académico en escolares de Santiago de Chile. *Revista Ciencias de la Actividad Física UCM*, 15(1), 43-50.

Maureira, F. & Flores, E. (2016). *Principios de neuropsicobiología para estudiantes de educación*. Valencia: Obrapropia.

Maureira, F., Henríquez, F., Carvajal, D., Vega, J. & Acuña, C. (2015). Efectos del ejercicio físico agudo sobre la memoria visual de corto plazo en estudiantes universitarios. *Revista Ciencias de la Actividad Física UCM*, 16(1), 31-37.

Moraes, H., Ferreira, C., Deslandes, A., Cagy, M., Pompeu, F., Ribeiro, P., et al. (2007). Beta and alpha electroencephalographic activity changes after acute exercise. *Arq Neuropsiquiatr*, 65(3A), 637-641.

Niedermeyer, E. y Da Silva, F. (2005). *Electroencephalography*. Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins.

Ramos, F., Morales, G., Egozcue, S., Pabón, R. y Alonso, M. (2009). Técnicas básicas de electroencefalografía: principios y aplicaciones clínicas. *An. Sist. Sanit. Navar*, 32(Supl. 3), 69-82

Schneider, S., Brummer, V., Abel, T., Askew, C. & Struder, H. (2009). Changes in brain cortical activity measured by EEG are related to individual exercise preferences. *Physiology & Behavior*, 98(4), 447-452.

Stroh, S., Kubesch, S., Dieterle, K., Ruchsow, M., Heim, R. & Kiefer, M. (2009). Physical fitness, but not acute exercise modulates event-related potential indices for executive control in healthy adolescents. *Brain Research*, 1269, 114-124.

Talamillo, T. (2011). Manual básico para enfermeros en electroencefalografía. *Enfermería Docente*, 94, 29-33.

Tine, M. (2014). Acute aerobic exercise: an intervention for the selective visual attention and reading comprehension of low-income adolescents. *Frontiers in Psychology*, 5, 575.

Vogt, T., Schneider, S., Brummer, V. & Strude, K. (2010). Frontal EEG asymmetry: The effects of sustained walking in the elderly. *Neuroscience Letters*, 485(2), 134-137.

Woo, M., Kim, S., Kim, J., Petruzzello, J. & Hatfield, B. (2009). Examining the exercise-affect dose-response relationship: Does duration influence frontal EEG asymmetry? *International Journal of Psychophysiology*, 72(2), 166-172.

**Fecha de recepción: 26/12/2017**  
**Fecha de aceptación: 28/01/2018**