

Efectos de una sesión de ejercicio aeróbico sobre las correlaciones no lineales del cerebro en reposo

Effects of an aerobic exercise session on non-linear correlations of resting brain

Fernando Maureira Cid

Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación (Chile)

Resumen. En las últimas décadas, se ha estudiado la señal del electroencefalograma como una serie de tiempo con dinámicas no lineales. El objetivo de la presente investigación fue determinar los efectos del ejercicio físico sobre el número de correlaciones de la actividad no lineal de las diversas ondas cerebrales en estado basal. La muestra estuvo constituida por 12 varones voluntarios (seis experimentales y seis controles). El registro de la actividad cerebral se realizó con un dispositivo cerebro-interfaz Emotiv Epoc® mientras los estudiantes permanecían dos minutos sentados, relajados y con los ojos cerrados. Los registros se realizaron antes y después de un trabajo aeróbico de 30 minutos. Los resultados muestran que el número de correlaciones entre los exponentes de Hurst presentan modificaciones similares entre el grupo experimental y control en las ondas delta, beta y gamma. En las ondas theta existe mayor número de modificaciones en el grupo experimental (100% v/s 83.3%), situación más acentuada en alfa (83.3% v/s 16.7%). En conclusión, la intervención con 30 minutos de ejercicio físico aeróbico muestra efectos sobre el número de correlaciones entre los exponentes de Hurst en estado de reposo con los ojos cerrados en ondas theta y alfa. Los efectos son menos notorios o no presentan un patrón discriminativo en las ondas delta, beta y gamma.

Palabras claves: Ejercicio físico, electroencefalografía, exponente de Hurst, estado de reposo, ojos cerrados.

Abstract. In recent decades, the electroencephalogram signal has been studied as a time series with non-linear dynamics. The aim of this research was to determine the effects of physical exercise on the number of correlations of non-linear activity of the various brain waves at baseline. The sample consisted of 12 male volunteers (six experimental and six controls). The recording of brain activity was performed through a brain-interface device Emotiv Epoc® while the students remain seated, relaxed and with their eyes closed for two minutes. The logs were performed before and after 30-minutes of aerobic exercise. The results show that the number of correlations between the Hurst exponents show similar modifications between the experimental group and control group in the delta, beta and gamma waves. In theta waves there are a greater number of modifications in the experimental group (100% v/s 83.3%), a more pronounced situation in alpha (83.3% v/s 16.7%). In conclusion, the intervention with 30-minutes of aerobic physical exercise shows effects on the number of correlations for theta and alpha waves between the Hurst exponents at rest. The effects are less noticeable or do not show a discriminatory pattern in delta, beta and gamma waves.

Keywords: Physical exercise, electroencephalography, Hurst exponent, resting state, closed eyes.

Introducción

La teoría del caos describe ciertos fenómenos como dinámicas no lineales, que se caracterizan por presentar un comportamiento no periódico (Pikovsky et al., 2001) que muestran una expansión rápida de errores, lo que impide su predicción en el tiempo (Pidal, 2009). A principios del siglo XX Poincaré estableció la idea de que existen sistemas dinámicos deterministas cuya predicción resulta imposible (Madrid, 2010), idea que retoma Lorenz en la década de 1960, estableciendo la existencia de sistemas que son altamente dependientes a las condiciones iniciales, donde pequeños cambios en el presente provocarán enormes consecuencias del sistema en el futuro (Bondarenko, 2007).

En el contexto de la teoría del caos, el exponente de Hurst (H) es una herramienta útil para analizar los cambios en series temporales altamente dependientes a las condiciones iniciales (Díaz et al., 2017). El exponente H varía entre 0 y 1, siendo $H=0.5$ un indicador de un sistema caótico (como el movimiento browniano) donde no es posible predecir el futuro del sistema; $H<0.5$ indica un sistema antipersistente o de memoria de corto plazo, donde el comportamiento futuro será opuesto al comportamiento

presente; $H>0.5$ indica un sistema persistente o de memoria de largo plazo, donde el comportamiento futuro será similar al comportamiento presente (Díaz et al., 2015).

En las últimas décadas, se ha estudiado la señal del electroencefalograma (EEG) como una serie de tiempo con dinámicas no lineales (Kumar & Bhuvanewari, 2012). El EEG es un instrumento que permite medir la actividad eléctrica del cerebro a través de electrodos ubicados en el cuero cabelludo, con una buena resolución temporal (con mediciones de voltaje entre 1 y 3 milisegundos), pero con una limitada resolución espacial (Maureira, 2017). El EEG registra cinco tipos de ondas: a) delta (0.5-3 Hz) asociada a estados de sueño profundo; b) theta (3.5-7 Hz) relacionada con etapas de sueño ligero; c) alfa (8-12 Hz) asociada a un estado de vigilia, relajado y con los ojos cerrados; d) beta (13-30 Hz) relacionada con un estado de vigilia con percepción de estímulos y resolución de problemas cognitivos; e) gamma (>30 Hz) asociada a estados de altos niveles de concentración y meditación (Bear et al., 2016).

La literatura muestra variados estudios de la actividad cerebral evaluada con el EEG antes y después de una intervención con ejercicio físico aguda y crónica, con preferencia por trabajos aeróbicos (Engchuan et al., 2017; Ftaiti et al., 2010; Fumoto et al., 2010; Hübner et al., 2018; Ludyga et al., 2016; etc.) revelando variaciones en la potencia y/o amplitud de la señal de ondas alfa, beta y gamma. El número de estudios disminuye cuando la señal del EEG

es analizada como una dinámica no lineal con herramientas como el exponente de Hurst. Un estudio de Flores et al. (2019) describe un aumento del valor H de las ondas beta en la región prefrontal y occipital después de 30 minutos de ejercicio físico aeróbico, cuando los sujetos resolvían una prueba de atención selectiva. Otro estudio de Maureira et al. (2020a) muestra variaciones de los valores H de las ondas gamma de la región prefrontal izquierda y derecha durante la resolución de una prueba de atención, después de 30 minutos de ejercicio físico aeróbico. La región prefrontal se asocia a procesos de atención, planificación, resolución de problemas, toma de decisiones, etc. y, por lo tanto, los cambios de valores H reflejan más tendencia al orden o al caos en la actividad eléctrica de esta corteza, siendo esta última condición la que refleja una mayor eficiencia en la actividad eléctrica cerebral.

Flores et al. (2020) mostraron variaciones del exponente H de la onda beta durante la resolución de una prueba de atención sostenida tras 30 minutos de ejercicio físico aeróbico. Los valores H fueron menores a 0.5 (actividad antipersistente), tanto en la medición previa como posterior a la intervención, además de presentar bajo número de correlaciones entre la corteza prefrontal, temporal y occipital, durante la prueba cognitiva, lo cual sugiere mayor independencia de las diferentes regiones cerebrales durante la resolución de la prueba, lo que resulta más eficiente durante la tarea cognitiva. Finalmente, Maureira et al. (2020b) estudiaron el efecto de 30 minutos de ejercicio físico aeróbico sobre los valores H de las ondas cerebrales en estado de reposo, mostrando variaciones de delta y theta en la corteza prefrontal, temporal y occipital, en el grupo experimental y control. La onda alfa fue la más estable en ambos grupos, en tanto, beta mostró mayor modificación de valores H en la región temporal en el grupo experimental. Por el contrario, la onda gamma presenta mayor variabilidad en el grupo control.

En base a los antecedentes mencionados surge el objetivo de la presente investigación: determinar los efectos del ejercicio físico sobre el número de correlaciones de la actividad no lineal de las diversas ondas cerebrales en estado basal.

Método

Participantes

Fue de tipo no probabilística voluntaria. Se evaluaron a 12 varones estudiantes de educación física de una Universidad privada de Chile, con edad promedio de 19.5 ± 1.4 años. Fueron criterios de exclusión: presentar lesiones o trastornos que impidieran realizar ejercicio físico, presentar alteraciones cognitivas, estar consumiendo medicamentos o estar en tratamiento psicológico por lo menos un año antes de las evaluaciones. La presente investigación fue aprobada por el comité de ética de la Universidad Católica Silva Henríquez. Todos los participantes firmaron un consentimiento informado. Se cumplieron los criterios establecidos en la Declaración de Helsinki.

Instrumentos

Para el registro EEG se utilizó el dispositivo cerebro-

interfaz Emotiv EPOC® con frecuencia de muestreo de 128 Hz. El EEG registra 14 canales a través de electrodos posicionados según el sistema 10/20 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 prefrontal (AF3 y AF4), temporal (T7 y T8) y occipital (O1 y O2). Se registraron dos minutos de estado basal de la actividad cerebral en dos ocasiones. Se analizó el rango de frecuencia delta (0.5-3 Hz), theta (3.5-7 Hz), alfa (8-12 Hz), beta (13-30 Hz) y gamma (>30 Hz).

Procedimiento

Seis estudiantes fueron asignados aleatoriamente al grupo experimental y seis al grupo control. Para cada participante se registró su frecuencia cardíaca basal durante cinco minutos sentado relajadamente. Posterior a eso se realizó un registro basal de la actividad cerebral de dos minutos con los ojos cerrados. El grupo experimental fue sometido a un trabajo aeróbico de 30 minutos de trote en un treadmill BHF1 serie F, con una intensidad entre el 60 y 75% de la frecuencia cardíaca máxima del sujeto, la cual se obtuvo con la fórmula de Karvonen: $(FC_{\text{máx}} - FC_r) * \% \text{ de trabajo} + FC_r$; donde $FC_{\text{máx}}$ es la frecuencia cardíaca máxima y FC_r es la frecuencia cardíaca de reposo (Willmore y Costill, 2004). Esto se controló con un dispositivo pectoral de medición de FC modelo Polar T31-CODED. Una vez terminada la intervención con ejercicio físico, se esperó a que los participantes volvieran a su frecuencia cardíaca de reposo y se registró nuevamente la actividad cerebral basal durante dos minutos con los ojos cerrados. El grupo control estuvo 30 minutos relajado y sentado entre la primera y segunda medición. Todas las mediciones se realizaron durante la mañana (entre 10:00 y 12:00 hrs.). 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 exponentes de Hurst para cada un segundo de registro, obteniendo 120 índices de H (el período de ojos cerrados dura 120 segundos). Esto se realizó para cada uno de los seis electrodos (AF3, AF4, T7, T8, O1 y O2) de cada sujeto evaluado. Posteriormente 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 ($p > .05$) razón por la cual se procedió a utilizar estadística paramétrica. Para establecer relaciones entre la actividad eléctrica registrada en cada electrodo se utilizó correlaciones de Pearson y para comparar los porcentajes de cambios entre mediciones de cada sujeto y cambios entre el grupo control y experimental se utilizaron pruebas de proporciones. Se consideraron significativos valores $p < .05$.

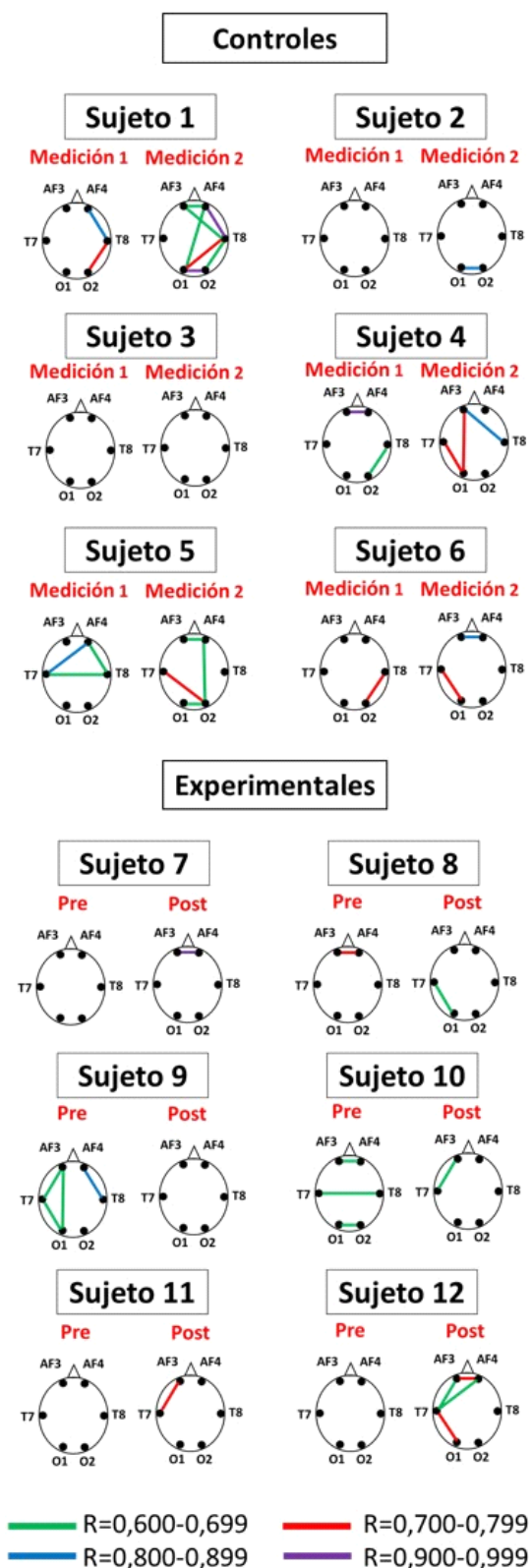


Figura 1. Correlaciones de las ondas delta durante los 2 minutos en estado de reposo pre y post ejercicio.

Resultados

En la figura 1 se observa las correlaciones entre los electrodos prefrontales, temporales y occipitales en las dos mediciones del grupo control y en las mediciones pre y post intervención del grupo experimental. Los porcentajes de correlaciones de las ondas delta de los estados

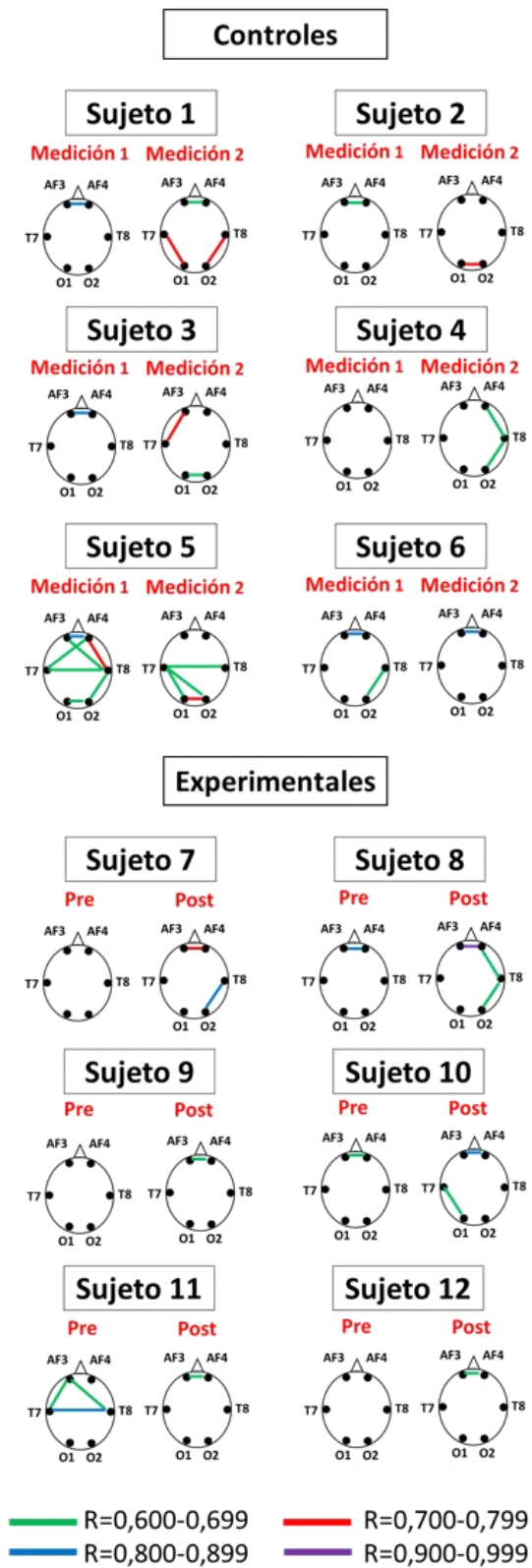


Figura 2. Correlaciones de las ondas theta durante los 2 minutos en estado de reposo pre y post ejercicio.

basales en reposo muestran variaciones significativas en el sujeto 1 ($Z=2.14$; $p<.05$) del grupo control y en el sujeto 12 ($Z=2.33$; $p<.05$) del grupo experimental, presentando ambos un aumento en el número de correlaciones en la 2ª medición. El grupo control presenta variaciones en cinco sujetos (83.3%) con un aumento en el número de correlaciones en todos ellos. Por su parte, el grupo experimental

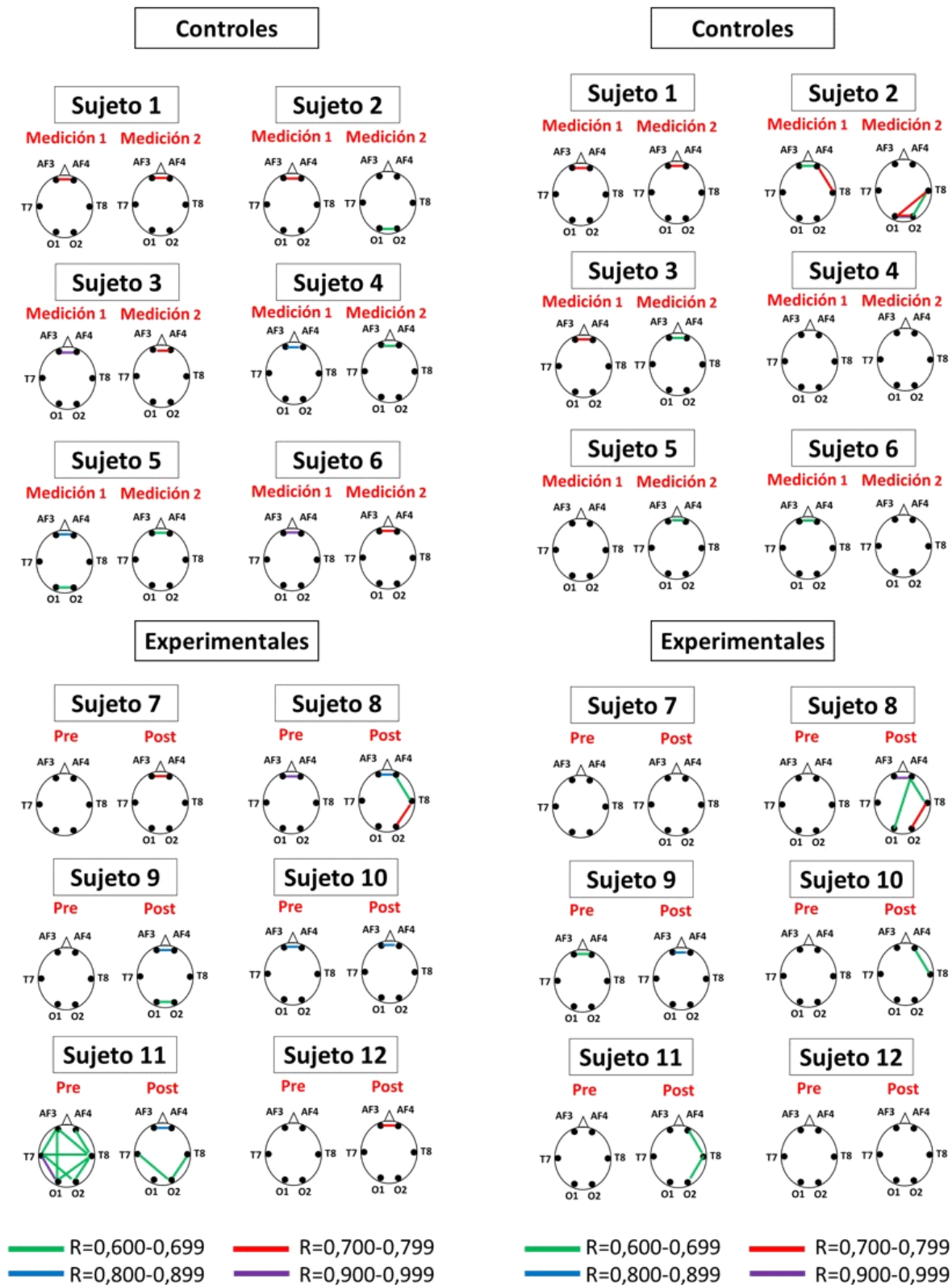


Figura 3. Correlaciones de las ondas alfa durante los 2 minutos en estado de reposo pre y post ejercicio.

también presenta variaciones en cinco sujetos (83.3%) con un aumento del número de correlaciones en tres de ellos y disminución en dos.

En la figura 2 se observa las correlaciones de las ondas theta de los estados basales en reposo de todos los sujetos de la muestra. Si bien algunos sujetos presentan modificaciones en el número de correlaciones, ninguno

Figura 4. Correlaciones de las ondas beta durante los 2 minutos en estado de reposo pre y post ejercicio.

revela variaciones significativas. El grupo control presenta variaciones en cinco sujetos (83.3%) con un aumento en el número de correlaciones en tres de ellos y disminución en dos. Por su parte, el grupo experimental también presenta variaciones en los seis sujetos (100%) con un aumento del número de correlaciones en cinco de ellos y disminución en uno.

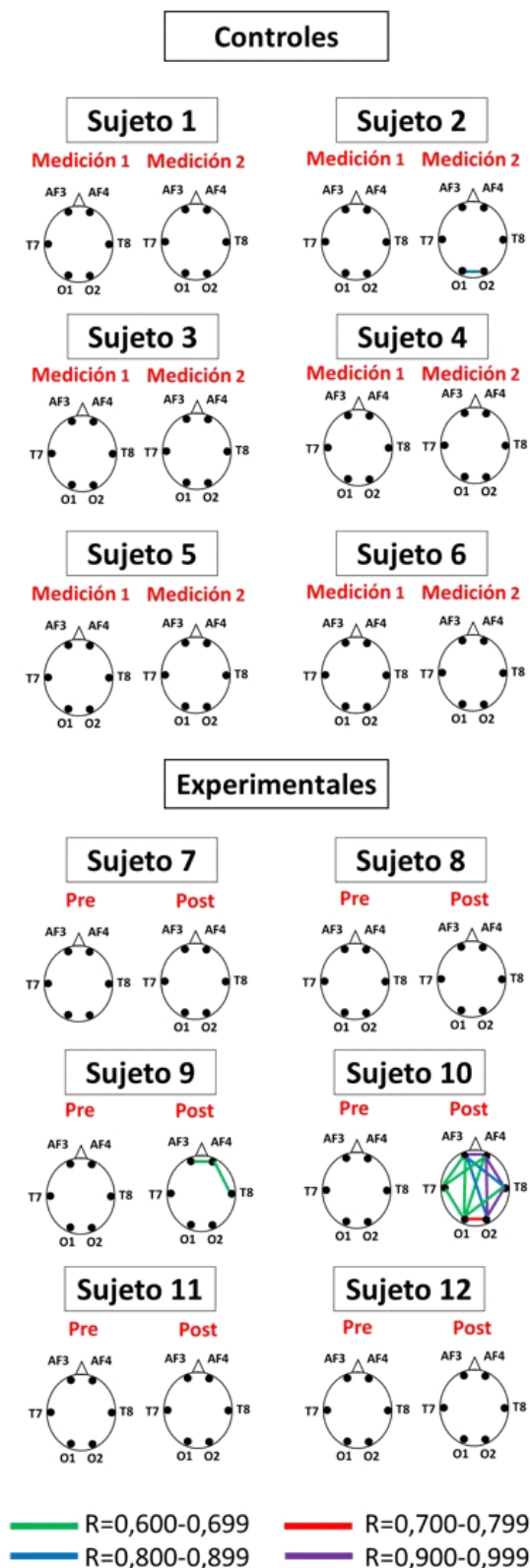


Figura 5. Correlaciones de las ondas gamma durante los 2 minutos en estado de reposo pre y post ejercicio.

En la figura 3 se observa las correlaciones de las ondas alfa de los estados basales en reposo de todos los sujetos de la muestra. El grupo control casi no presenta variaciones entre las dos mediciones, en tanto, dos sujetos del grupo experimental (n° 8 y n° 11) muestran un aumento y disminución del número de correlaciones tras el ejercicio físico. Sin embargo, sólo el sujeto 11 presenta

diferencias significativas tras la intervención ($Z=2.93$; $p<.01$). El grupo control presenta variaciones en un sujeto (16.7%) con una disminución en el número de correlaciones. Por su parte, el grupo experimental presenta variaciones en cinco sujetos (83.3%) con un aumento del número de correlaciones en cuatro de ellos y disminución en uno. El grupo que fue sometido a intervención posee un número de variaciones significativamente mayor al grupo control, el cual permaneció más estable en su segunda medición ($Z=3.09$; $p<.01$).

En la figura 4 se observa las correlaciones de las ondas beta de los estados basales en reposo de todos los sujetos de la muestra. El grupo control no presenta variaciones significativas entre las dos mediciones, en tanto, el sujeto 8 del grupo experimental muestra un aumento significativo del número de correlaciones tras el ejercicio físico ($Z=2.34$; $p<.05$). El grupo control presenta variaciones en tres sujetos (50%) con un aumento en el número de correlaciones en dos de ellos y disminución en uno. Por su parte, el grupo experimental también presenta variaciones en los tres sujetos (50%) con un aumento del número de correlaciones en todos ellos.

En la figura 5 se observa las correlaciones de las ondas gamma de los estados basales en reposo de todos los sujetos de la muestra. El grupo control no presenta correlaciones en ninguna de las dos mediciones, en tanto, dos sujetos del grupo experimental (n° 8 y n° 9) muestran un aumento del número de correlaciones tras el ejercicio físico. Sin embargo, sólo el sujeto 8 presenta diferencias significativas tras la intervención ($Z=9.89$; $p<.01$). El grupo control no presenta variaciones en el número de correlaciones en ninguno de los sujetos (0%). Por su parte, el grupo experimental presenta variaciones en dos sujetos (33.3%) con un aumento del número de correlaciones en ambos casos. El grupo que fue sometido a intervención posee un número de variaciones significativamente mayor al grupo control ($Z=1.73$; $p<.05$).

Discusión

El objetivo de la presente investigación fue determinar los efectos del ejercicio físico sobre el número de correlaciones de la actividad no lineal de las diversas ondas cerebrales en estado basal. En las ondas delta del grupo control se observa un aumento del número de correlaciones al comparar las dos mediciones realizadas a cada sujeto, en tanto, el grupo experimental presenta aumento y disminuciones. Esto podría explicarse ya que este tipo de onda se relaciona con etapas de sueño profundo en el adulto, asociándose a funciones autonómicas y metabólicas, con la motivación, aumentando con el hambre y la excitación sexual, todas funciones primitivas que durante la vigilia se ven eclipsadas con procesos cognitivos más complejas (Knyazev, 2012), razón por la cual parece ser que los integrantes del grupo control aumentan la sincronización de la relación orden/caos (obtenida con el exponente de Hurst) en la segunda medición, posiblemente debido a un estado más relajado, donde el aumento del número de correlaciones puede entenderse como un trabajo más global orientado a la regulación

homeostática. Con lo que respecta al ejercicio, la disminución del número de correlaciones en dos sujetos experimentales podría interpretarse como una disminución de la sincronización orden/caos, donde cada región del cerebro se encarga de la regulación de funciones autonómicas específicas.

En las ondas theta del grupo control se observan variaciones (aumento o disminución) del número de correlaciones entre los exponentes de Hurst entre las dos mediciones realizadas. En el grupo experimental se presenta aumento del número de correlaciones tras la sesión de ejercicio físico. Las ondas theta se relacionan con el sueño ligero y en estados de vigilia con soñar despierto y con estados emocionales (Chauhan & Preetam, 2016), además ayudan a la coordinación a gran escala del cerebro durante procesos cognitivos (Zhang et al., 2018). Esto último podría explicar el aumento de número de correlaciones tras el ejercicio, donde la onda theta tiende a aumentar la sincronización orden/caos de cada región cerebral para estabilizar procesos cognitivos que se pueden dar aún en estado de reposo, situación que se da en menor grado en sujetos que no han sido expuestos a una intervención aeróbica.

En las ondas alfa del grupo control se observa una estabilidad en el número de correlaciones en los exponentes de Hurst entre las dos mediciones. El grupo experimental presenta aumento del número de correlaciones tras la sesión de ejercicio físico. Las ondas alfa son comunes en sujetos con ojos cerrados, conduciendo a respuestas lentas frente a los estímulos (Tiago-Costa et al., 2016), siendo el aumento de sincronizaciones de los exponentes de orden/caos un indicativo de un estado más relajado del sujeto y donde la respuesta a estímulos requeriría un trabajo más global de las diversas regiones cerebrales tras el ejercicio físico en comparación con el grupo control.

En las ondas beta del grupo control existen variaciones en el número de correlaciones en el 50% de ellos (dos aumentan y uno disminuye). En el grupo experimental también existen aumento en el número de correlaciones en el 50% de los sujetos. Las ondas beta indican una alta velocidad de propagación asociados a estados de excitación y alerta (Tiago-Costa et al., 2016), además ciertos rangos de beta se relacionan con aumentos de energía, ansiedad, rendimiento cognitivo y concentración (Hosovecký & Babušiak, 2017). El aumento en el número de correlaciones entre los exponentes de Hurst se pueden relacionar con estados más sincronizados, con un trabajo global para sostener la concentración durante un estado de reposo con ojos cerrados. Sin embargo, el 50% de los sujetos en ambos grupos no presentan alteraciones de ningún tipo en el número de correlaciones. Parece ser que el ejercicio físico no posee efectos notorios sobre las ondas beta en reposo (esto representa estados menos ansiosos), las cuales pudiesen diferenciarlos de sujetos controles.

En las ondas gamma del grupo control no se observan variaciones en el número de correlaciones entre las dos mediciones, en tanto, el grupo experimental presenta un aumento en dos de ellos. Las ondas gamma podrían modular la entrada sensorial y los procesos de atención y memoria (Jia & Kohn, 2011), por lo cual parecen no ser

afectadas de manera importante por la intervención con ejercicio físico, al menos en estados de reposo, mostrando situaciones similares al grupo control, excepto en casos aislados.

Conclusión

La intervención con 30 minutos de ejercicio físico aeróbico muestra efectos sobre el número de correlaciones entre los exponentes de Hurst de diferentes regiones del cerebro en estado de reposo con los ojos cerrados en ondas theta y alfa. Los efectos son menos notorios o no presentan un patrón discriminativo en las ondas delta, beta y gamma entre el grupo experimental y control. Los resultados presentados muestran una enorme variabilidad de la actividad cerebral entre los sujetos, lo que entrega argumentos para realizar los estudios de actividad orden/caos de la actividad eléctrica del cerebro en forma individual y no agrupándolos como sujetos homogéneos. Una limitación del estudio es el bajo número de sujetos participantes, si bien en este tipo de estudios se acostumbra a trabajar con muestras pequeñas, esto impide la generación de resultados a una población similar.

Es necesario continuar con las investigaciones en esta línea de estudio, incorporando muestras femeninas, aplicando diversas intensidades y duración de ejercicio físico y analizar los efectos de dichas intervenciones no solo en estados basales, sino también durante la resolución de diversos problemas cognitivos.

Referencias

- Bear, M., Connors, B., & Paradiso, M. (2016). *Neurociencia, la exploración del cerebro*. Madrid: Wolters Kluwer.
- Bondarenko, N. (2007). El lenguaje y la teoría del caos. *Opción*, 23(53), 38-51.
- Chauhan, P., & Preetam, M. (2016). Brain waves and sleep science. *Intl J Engg Sci Adv Research*, 2(1), 33-36.
- Díaz, H., Maureira, F., Cohen, E., Córdova, F., Palominos, F., Otárola, J., et al. (2015). Individual differences in the orden/chaos balance of the brain self-organization. *Annals of Data Science*, 2(4), 421-438. doi: <https://doi.org/10.1007/s40745-015-0051-y>
- Díaz, H., Maureira, F., & Córdova, F. (2017). Temporal scaling and inter-individual hemispheric asymmetry of chaos estimation from EEG time series. *Procedia Computer Science*, 122, 339-345. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.378>
- Engchuan, P., Wongsuphasawat, K., & Sittiprapaporn, P. (2017). *Changes of EEG power spectra in bench press weight training exercise*. Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2017 14th International Conference on Phuket, Thailand. doi: [10.1109/ECTICon.2017.8096161](https://doi.org/10.1109/ECTICon.2017.8096161)
- Flores, F., Maureira, F., Díaz, H., & Navarro, B. (2020). Modificaciones neurofisiológicas de ondas beta durante un test atencional tras una intervención de ejercicio físico. *Cultura, Ciencia y Deporte*, 15(44), 201-

211. doi: <http://dx.doi.org/10.12800/ccd.v15i44.1462>
- Flores, F., Maureira, F., Díaz, H., Navarro, B., Gavotto, O., & Matheu, A. (2019). Efectos de una sesión de ejercicio físico sobre la actividad neurofisiológica durante la resolución de una prueba de atención selectiva. *Retos*, 36, 390-396.
- Ftaiti, 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2010.01.008>
- 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2010.04.017>
- Hosovecký, M., & Babušiak, B. (2017). Methodius in Trnava Brain activity: beta wave analysis of 2D and 3D serious games using EEG. *JAMSI*, 13(2), 39-53. doi: <https://doi.org/10.1515/jamsi-2017-0008>
- Hübner, L., Godde, B., & Voelcker-Rehage, C. (2018). Older adults reveal enhanced task-related beta power decreases during a force modulation task. *Behav Brain Res*, 345, 104-113. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2018.02.028>
- Jia, X., & Kohn, A. (2011). Gamma rhythms in the brain. *PLoS Biology*, 9(4), e1001045. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001045>
- Knyazev, G. (2012). EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 36, 677-695. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.10.002>
- Kumar, J., & Bhuvaneshwari, P. (2012). Analysis of electroencephalography (EEG) signals and its categorization-a study. *Procedia Engineering*, 38, 2525-2536.
- 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2015.04.003>
- Madrid, C. (2010). Historia de la teoría del caos contada para escépticos. *Encuentros Multidisciplinarios*, 34, 1-15.
- Maureira, F. (2017). *¿Qué es la inteligencia?* Madrid: Bubok Publishing.
- Maureira, F., Díaz, H., Flores, E., Gavotto, O., & Hadweh, M. (2020a). Variaciones de las dinámicas no lineales de las ondas gamma durante la resolución de una prueba de atención tras la aplicación de ejercicio físico. *Retos*, 37, 320-325.
- Maureira, F., Flores, E., Díaz, H., Barroso, H., Rueff, C., Bravo, P., et al. (2020b). Efectos de una sesión de ejercicio físico sobre la actividad no lineal de las ondas cerebrales en estado basal. *Retos*, 38, 180-187.
- Pidal, M. (2009). La teoría del caos en las organizaciones. *Cuadernos Unimetanos*, 18, 29-33.
- Pikovsky, A., Rosenblum, M., & Kurths, J. (2001). *Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tiago-Costa, E., Quelhas-Costa, E., & Santos-Baptistas, J. (2016). Changes in EEG amplitude (Alpha and Beta waves) with Thermal environment. *DYNA*, 83(197), 87-93. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n197.57590>
- Wilmore, J., & Costill, D. (2004). *Fisiología del esfuerzo y del deporte*. Barcelona: Paidotribo.
- Zhang, H., Watrous, A., Patel, A., & Jacobs, J. (2018). Theta and alpha oscillations are traveling waves in the human neocortex. *Neuron*, 98, 1269-1281. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.05.019>

