

LA VIGILANCIA COMO FUNCIÓN COGNITIVA CLAVE EN LA RELACIÓN ENTRE EL EJERCICIO FÍSICO PUNTUAL Y LA COGNICIÓN

VIGILANCE AS KEY COGNITIVE FUNCTION IN THE RELATIONSHIP BETWEEN ACUTE PHYSICAL EXERCISE AN COGNITION

González-Fernández, Francisco Tomás

Doctor Internacional en Biomedicina. Profesor e Investigador. Universidad Internacional de Valencia. Franciscotomas.gonzalez@campusviu.es

Código UNESCO: 6199.

Clasificación Consejo de Europa: 15. Psicología del deporte

DOI: <http://dx.doi.org/10.24310/riccafd.2019.v8i1.5762>

RESUMEN

En las últimas dos décadas han surgido numerosas investigaciones que han mostrado los efectos beneficiosos de la actividad física para la salud (Biddle, Fox y Boutcher, 2003; Lee y Skerritt, 2001). Lejos de creer que la actividad física tan sólo prevenía trastornos físicos [e.g., enfermedades cardiovasculares (Haskell et al., 2007)], la literatura científica argumenta que también previene trastornos mentales [e.g., depresión y reducción del estrés (Dunn et al., 2001) o ansiedad (Paluska y Schwenk, 2000)]. Además, entidades de relevancia mundial tales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC), el Colegio Americano de Medicina del Deporte (ACSM) o la Asociación Americana del Corazón (AHA), relacionan positivamente la actividad física con la salud general y consideran a la actividad física como algo esencial e indispensable para preservar la salud. En resumen, el presente trabajo tiene como objetivo principal estudiar los efectos del ejercicio físico puntual sobre el funcionamiento cognitivo (vigilancia y percepción), sugieren que el esfuerzo ligero-moderado aumenta la activación general y mejora la velocidad de respuesta en tareas de atención sostenida con independencia de la relevancia del estímulo objetivo. Además, no replicamos el resultado de investigaciones previas que demostraron el efecto de un entrenamiento físico en el rendimiento cognitivo

Palabras clave: atención sostenida, ejercicio físico puntual, cognición.

ABSTRACT

The last two decades, there have been numerous studies that have shown the beneficial effects of physical activity on health (Biddle, Fox y Boutcher, 2003; Lee y Skerritt, 2001). Far from believing that physical activity only prevented physical disorders [e.g., cardiovascular disease (Haskell et al., 2007)], the scientific literature argues that it also prevents mental disorders [e.g., depression and stress reduction (Dunn et al., 2001) or anxiety (Paluska y Schwenk, 2000)]. In addition, organizations of global relevance such as World Health Organization (WHO), Centers for disease Control and Prevention (CDC), American College of Sports Medicine (ACSM) or the American Heart Association (AHA), have positively related physical activity to general health and contemplate physical activity as essential and indispensable to preserve health. The present work aimed to investigate the effects of acute exercise on cognitive functioning (vigilance and perception) and suggest that moderate-light effort increment general activation and improve the speed of response in sustained attention tasks independently of target stimulus relevance.

Key words: sustained attention – acute exercise – cognition.

INTRODUCCIÓN

Son bien conocidas las investigaciones que han señalado la repercusión del ejercicio físico puntual sobre el funcionamiento cognitivo (ver revisiones de Lambourne y Tomporowski, 2010; McMorris y cols., 2009; Tomporowski, 2003). Específicamente, el número de estudios que han explorado las anteriores investigaciones ha incrementado en los últimos años (Tomporowski, Lambourne y Okumura, 2011). Destáquese aquí que los primeros estudios que buscaban relaciones entre el ejercicio físico y la cognición examinaron el procesamiento de la información mediante tareas de detección de letras, de búsqueda visual, de tiempo de reacción (TR) simple y elección o tareas de discriminación perceptual (Tomporowski, 2003). Sin embargo, los estudios más recientes, examinaron de forma más destacada las funciones ejecutivas (Hillman et al., 2009; Kamijo et al., 2004; Kamijo y et al., 2007, 2009; Pontifex et al., 2013; Scudder et al., 2012).

La literatura existente no nos proporciona resultados consistentes y aclaradores de la relación entre el ejercicio físico puntual y el rendimiento cognitivo. De hecho, podemos encontrar una gran cantidad de estudios que muestran diversos resultados (empeoramiento, mixtos o de mejora). Por un lado, encontramos los estudios que encontraron un deterioro del ejercicio físico puntual sobre el rendimiento cognitivo (Fery et al., 1997; Isaacs y Pohlman, 1991; McMorris y Keen, 1994). Por ejemplo, McMorris y Keen, (1994) examinaron a 12 deportistas recreativos y estudiaron la relación existente entre el ejercicio físico realizado a tres intensidades de ejercicio [descanso, 70% del $VO_{2máx}$ (ejercicio moderado), 100% del $VO_{2máx}$ (ejercicio fatigante)] y el rendimiento cognitivo valorado por una tarea de TR simple. Los resultados mostraron que el TR durante el 100% $VO_{2máx}$ fue significativamente más lento que en las otras dos condiciones que no difiri-

eron significativamente entre sí. Por otro lado, encontramos los estudios que informaron sobre datos mixtos o ambiguos para los efectos del ejercicio agudo sobre el rendimiento cognitivo (ver Chang y cols., 2012 para una revisión). Principalmente, esto puede deberse a las cantidad de protocolos usados, tareas empleadas, funciones cognitivas estudiadas, etc. (Adam et al., 1997; Arcelin et al., 1998; Cian et al., 2001; Cian et al., 2000; Davranche et al., 2005, 2006; Dietrich y Sparling, 2004; Fery et al., 1997; Fleury y Brad, 1987; Heckler y Croce, 1992; Hillman et al., 2003; Hogervorst et al., 1996; Paas y Adam, 1991). Por último, se ha evidenciado que el ejercicio físico puntual también puede producir una facilitación en el rendimiento cognitivo (Arcelin et al., 1997; Gondola, 1987; Tomporowski et al., 2005). Por ejemplo, Arcelin et al., (1997) examinaron el efecto de un ejercicio físico puntual al 60% del $VO_{2m\acute{a}x}$ sobre una tarea de TR de elección. Los resultados de las tareas cognitivas fueron recogidos en reposo, después de 3' de ejercicio y después de 8' de ejercicio. Los resultados indicaron que el TR fue significativamente más rápido tras las dos condiciones de ejercicio, con respecto a la condición en reposo. Posteriormente, Audiffren, Tomporowski y Zagrodnik (2008) y Collardeau, Brisswalter y Audiffren (2001) mostraron una reducción en los TRs tras la realización de un ejercicio físico puntual. Sin embargo, esta mejora en los TRs duró poco tiempo. En otras palabras, los efectos del ejercicio físico puntual sobre la disminución de los TRs tan solo duraron unos minutos tras el cese del ejercicio físico.

Otro estudio realizado por Pesce et al., (2002), examino el efecto de un ejercicio físico puntual al 60% del $VO_{2m\acute{a}x}$ y en reposo sobre una tarea atencional para medir la reorientación atencional. Los resultados mostraron que durante el ejercicio físico al 60% del $VO_{2m\acute{a}x}$ se facilitó en general la velocidad de reacción y además, la intensidad del ejercicio provoco un aumento de la flexibilidad de desplazamiento produciendo un amplio enfoque atencional en el espacio visual.

Por lo tanto, los resultados obtenidos implican que los mecanismos energéticos que impulsan el efecto facilitatorio del ejercicio sobre los TRs dependen del ejercicio físico, debido a que la realización de un esfuerzo físico produce un aumento del arousal que será el principal causante de la disminución de los TRs (e.g., McMorris y Graydon, 2000). Posteriormente, el aumento del arousal irá desapareciendo de forma progresiva tras finalizar el ejercicio físico (Audiffren et al., 2008).

Relevantes para este importante tópico de investigación, son las investigaciones referentes al comportamiento de la orientación espacial exógena tras o durante la realización de un ejercicio físico puntual. Por ejemplo, Sanabria et al., (2011), investigaron los efectos del ejercicio físico puntual sobre la orientación espacial exógena. Para ello, Sanabria y sus colaboradores usaron una tarea de discriminación en tres condiciones de actividad distintas (reposo, durante y después). Los resultados de este estudio mostraron que el ejercicio físico aeróbico aumentó la capacidad de redirigir la atención espacial de los participantes hacia lugares que habían sido previamente atendidos. En este mismo sentido, otro estudio importante de Llorens, Sanabria y Huertas (2015) demostraron en participantes con baja condición física que tras finalizar un ejercicio físico existe

una modulación en el funcionamiento de la orientación espacial exógena, observando una reducción en la captura atencional, efecto producido por los estímulos distractores que aparecen en el campo visual.

Aunque se han encontrado gran diversidad de resultados, la mayoría de las investigaciones sugirieron un efecto positivo del ejercicio sobre el rendimiento cognitivo. Como bien venimos diciendo, un moderador importante que influyó en los resultados obtenidos en la literatura fue la intensidad del ejercicio. De hecho, cuando se utilizó un protocolo de ejercicio a intensidad moderada (entre el 40% y el 60% del $VO_{2m\acute{a}x}$ o de la frecuencia cardiaca máxima) con una duración de entre 20 y 60 minutos, la mayoría de las investigaciones mostraron un efecto positivo (Arcelin et al., 1997; Gondola, 1987; Tomporowski et al., 2005) o una tendencia positiva (Adam et al., 1997; Arcelin et al., 1998; Cian et al., 2001; Davranche et al., 2005, 2006; Dietrich, 2003; Fery et al., 1997; Fleury y Brad, 1987; Heckler y Croce, 1992; Herrmann et al., 2006; Hogervorst et al., 1996; Paas y Adam, 1991) para la relación entre el ejercicio físico puntual y el rendimiento cognitivo.

Cuando los estudios se revisan de forma meta-analítica, los resultados sugieren que el ejercicio físico puntual mejora el funcionamiento ejecutivo en niños, preadolescentes y adolescentes (ver Verburgh et al., 2013). Sin embargo, los resultados de otros dos meta-análisis han sido contradictorios. Así, por ejemplo, Chang et al., 2012 mostraron un pequeño efecto significativo y positivo (tamaño del efecto = 0.101) y Lambourne y Tomporowski (2010) informaron de un pequeño, significativo y negativo efecto (tamaño del efecto = -0.14) para el ejercicio sobre el rendimiento cognitivo durante la actividad física. En definitiva, las revisiones cualitativas y meta-análisis dentro del tema de investigación que ocupa a la presente tesis doctoral sugieren la existencia de una pequeña relación positiva entre ejercicio físico puntual y el rendimiento cognitivo.

De forma general, la literatura ha sugerido que el ejercicio físico aumenta el nivel de arousal durante el ejercicio físico puntual de intensidad moderada, probablemente debido al aumento de las concentraciones cerebrales de los neurotransmisores de dopamina y norepinefrina (Brisswalter et al., 2002; Tomporowski, 2003). Como hemos visto anteriormente, la gran mayoría de investigaciones publicadas sobre la relación existente entre el ejercicio físico y la cognición se han relacionado o están en consonancia con las teorías del arousal (p. ej., Yerkes y Dodson, 1908; Kahnemann, 1973; Humphreys y Revelle, 1984; Sanders, 1986; Hockey, Gaillard y Coles, 1986). Sin embargo, existen muchos estudios que no pueden explicarse con las teorías del arousal, lo que demuestra que la interacción ejercicio físico puntual y la cognición no es tan simple.

Podemos afirmar que un rendimiento cognitivo óptimo causado por la realización de esfuerzos físicos se ha relacionado tradicionalmente con un mayor nivel de activación/arousal hasta un punto determinado (Davranche y Audiffren, 2004; McMorris y Graydon, 2000). La existencia de estos beneficios ha sido apoyada por estudios que muestran cambios positivos en los individuos a partir de los primeros 15-20' de tarea (ver revisión Chang et al., 2012). Normalmente,

estos beneficios causados por el ejercicio físico puntual producen diferentes cambios fisiológicos (p.ej., temperatura corporal, frecuencia cardiaca, lactato en sangre, concentración de catecolaminas en plasma) a nivel central y periférico (Chmura, Nazard y Kaciuba-Uscilko, 1994; Chmura et al., 1998), que a su vez incrementan el arousal inducido (estado general de activación) que desempeña un papel fundamental para mantener un nivel óptimo durante diferentes tareas comportamentales que van desde tareas de tiempo de reacción simple, tiempo reacción-elección o tareas de memoria entre otros (Véase Lambourne y Tomporowski, 2010).

De acuerdo a las evidencias mostradas, desde una perspectiva comportamental son destacables los estudios que han encontrado relaciones positivas en forma de U invertida (Ask, 1998; Arent y Lander, 2003; Briswalter et al., 1995; Chmura et al., 1994; Davranche y Audiffren 2004; Delignieres, Briswalter y Legros, 1994; Kamijo et al., 2004; Levitt y Gutin, 1971; McMorris y Graydon, 1997; Reilly y Smith, 1986; Salmela y Ndoeye, 1986; Tenenbaum et al., 1993). Por ejemplo, Arent y Landers (2003) realizaron un estudio examinando una tarea de TR simple mientras pedaleaban en un cicloergómetro. Para ello utilizaron a participantes en edad universitaria ($n=104$) que fueron asignados al azar a uno de los ocho niveles de arousal/activación diseñados para esta investigación (entre el 20% y el 90% de la reserva de la $FC_{m\acute{a}x}$). Los resultados mostraron que el rendimiento óptimo en la tarea de TR simple se observó en el 60-80% del arousal máximo. Estos hallazgos mostraron una tendencia cuadrática y apoyan las predicciones previas de la hipótesis de la U-invertida.

En este mismo contexto, Chmura et al., (1994) reclutaron a 22 jugadores de fútbol. Los jugadores tuvieron que realizar una tarea de TR simple mientras que realizaban un protocolo incremental en cicloergómetro. Mientras realizaban el protocolo se recogieron medidas de lactato, adrenalina y noradrenalina para valorar la intensidad del ejercicio. Los resultados mostraron una correlación negativa entre la concentración de catecolaminas plasmáticas y TR durante un ejercicio incremental hasta el agotamiento. Esta relación de las catecolaminas durante un ejercicio submáximo podría ser responsable de la mejora de los TR a estas intensidades. Los resultados también indicaron que los mejores TRs se encontraron en la intensidad del 75% del $VO_{2m\acute{a}x}$ justamente donde se superaron el umbral de adrenalina y de lactato. Por lo tanto, los resultados mostraron un patrón de U invertida con respecto a todas las medidas.

La vigilancia o atención sostenida como función cognitiva clave en la relación entre ejercicio físico puntual y la cognición.

Como se ha podido ver anteriormente, en la literatura se ha evidenciado que el ejercicio físico tiene efectos beneficiosos sobre una gran diversidad de tareas implicando diferentes funciones cognitivas de alto nivel (McMorris, Tomporowski y Audiffren, 2009; Tomporowski, 2003). Sin embargo, dentro del gran avance que se ha encontrado en las últimas dos décadas, tenemos conocimiento parcial acerca de un proceso cognitivo inherente en la gran mayoría de estas tareas

cognitivas y que además resulta necesario para un óptimo rendimiento, i.e., atención sostenida o vigilancia.

Cuando hablamos de vigilancia o atención sostenida, nos referimos a la función cognitiva (atencional) que se encarga de facilitar la respuesta eficaz (rápida y precisa) ante estímulos relevantes, así como de la asignación de recursos atencionales a lo largo del desarrollo de la tarea, manteniendo las metas del observador. Esta función cognitiva representa un componente fundamental de las capacidades cognitivas generales en humanos, ya que una capacidad reducida de monitorizar fuentes de información significativas afecta directamente a todas las capacidades cognitivas (Sarter, Givens y Bruno, 2001).

En este sentido, debemos destacar que la vigilancia o atención sostenida es una función cognitiva de alto nivel necesaria en la mayoría de las tareas de laboratorio (ver Oken, Salinsky y Elsas, 2006 para una revisión), tareas de la vida diaria [e.g., conducción (Correa, Molina y Sanabria, 2011) o estudiantes (Steinmayr, Ziegler y Träuble, 2009) y entornos de trabajo [e.g. control de la salud (Weinger y Englund, 1990), conducción profesional (Dorrian, Roach, Fletcher y Dawson, 2007; Wiggins, 2011), inspección y detección (Hancock y Hart, 2002) entre otros], que además influye en el funcionamiento de otros mecanismos atencionales de alto nivel (e.g., el control cognitivo; Langner y Eickhoff, 2013).

Algunas de las características propias en las que se enfatiza cuando se habla de tareas de atención sostenida o vigilancia son la alta incertidumbre espacial/temporal del objetivo, lo que requiere que los participantes mantengan su atención enfocada en la tarea continuamente y que reorienten su atención hacia los objetivos de la tarea en caso de aburrimiento mental o distracciones. En este sentido, también cargan la atención sostenida aspectos como la carga de memoria de trabajo, la tasa de estímulos, así como el tiempo en tarea. Este último es un factor determinante en el rendimiento en las tareas de vigilancia o atención sostenida, ya que lo que se suele encontrar es que con el paso del tiempo ejecutando una tarea la ejecución disminuye, lo que se ha denominado “decremento en vigilancia”. Este efecto se ha relacionado con un agotamiento continuo de los recursos atencionales (Warm et al., 2008). Otro aspecto a tener en cuenta en este tipo de tareas es que dependen del estado de atención general del participante, que principalmente pueden estar influenciado por varios factores tales como privación de sueño (por ejemplo, Basner y Dinges, 2011), los ritmos circadianos (por ejemplo, Correa, Molina y Sanabria, 2013, Muto et al., 2016) o la aptitud cardiovascular (e.g., Luque-Casado y cols., 2016a, 2016b).

Debemos destacar el papel fundamental de la vigilancia durante las tareas que realizamos en nuestro día a día y la importancia que tiene su rendimiento en diferentes actividades como el deporte y entornos de trabajo. Un estado de vigilancia óptimo minimizará los errores humanos (e.g., Caldwell, Caldwell, Brown y Smith, 2004) y evitará muchas circunstancias peligrosas en nuestra vida diaria.

Ejercicio físico puntual y vigilancia

Durante una competición de ciclismo de carretera, un ciclista que se encuentra subiendo un puerto de montaña, es atacado por un rival de forma inesperada. La reacción del ciclista será la de levantarse del sillín y responder a este ataque para mantenerse con posibilidades en carrera. En este mismo sentido, la aparición repentina de un bache o un obstáculo durante el circuito de una maratón requerirá de una respuesta rápida para evitar el obstáculo inesperado. Estos dos ejemplos muestran la gran importancia de mantener un nivel óptimo de vigilancia o atención sostenida durante el ejercicio de larga duración con el fin de mantener el rendimiento lo mejor posible. Por lo tanto, un nivel adecuado de atención sostenida desempeña un papel fundamental en el deporte.

Tradicionalmente la investigación realizada con EEG ha señalado que el ejercicio aeróbico realizado a una intensidad moderada mejora las frecuencias altas del espectro de EEG, principalmente en la banda de frecuencia alfa, que se ha relacionado con la relajación y un estado de bienestar/serenidad (Lattari et al., 2014). En este sentido, Kubitz y Pothakos (1997), encontraron cambios en la activación cerebral durante ejercicio aeróbico (10 minutos en cicloergómetro), disminuyendo la frecuencia alfa y aumentando la frecuencia beta. Otras investigaciones coinciden con los aumentos en las frecuencias bajas, especialmente en la potencia theta (Ballard, 1996; Paus et al., 1997; Pennekamp et al., 1994). En un estudio similar, Smith, Eling, Hopman y Coenen (2005), midieron los efectos de un esfuerzo mental y un esfuerzo físico presentados consecutivamente sobre el EEG. En su estudio evaluaron a 3 grupos diferentes. El grupo 1 y 2 completaron un esfuerzo físico de 40 minutos en cicloergómetro y una tarea mental de 40 minutos, contrabalanceando el orden de presentación. El grupo 3 (grupo control) pasó el mismo tiempo que los otros dos grupos hablando con el experimentador y leyendo revistas. El esfuerzo mental aumentó la frecuencia Theta, (véase también Smith et al., 2004) y en medidas subjetivas disminuyó el estado de alerta-activación, sugiriendo una disminución de la vigilancia o atención sostenida. Sin embargo, el esfuerzo físico aumentó la frecuencia alfa y la frecuencia beta 1 (13-22 Hz), considerándolo como un aumento de vigilancia o atención sostenida. Aunque tras el ejercicio se sentían más cansados, se encontraron aumentos de alerta-activación (medidas subjetivas) lo que sugiere que el esfuerzo físico generó un incremento en la activación global. También se tomaron medidas subjetivas de demanda mental (NASA-TLX) mostrando que no hubo diferencias significativas en la carga percibida entre la tarea mental y la tarea física. Finalizaron diciendo que el esfuerzo mental disminuyó la vigilancia o atención sostenida, mientras que el esfuerzo físico la aumentó. Los escasos estudios citados anteriormente investigaron el efecto del ejercicio sobre el estado de vigilancia durante el ejercicio tomando medidas de EEG. Sin embargo, que sepamos, en la actualidad no encontramos ninguna investigación que haya examinado el efecto de un ejercicio físico puntual mantenido sobre la ejecución concurrente de una tarea de atención sostenida.

Por un lado, los resultados de los pocos estudios que existían hasta la fecha mostraban principalmente que el ejercicio aeróbico realizado a una intensidad

moderada mejora las frecuencias altas del espectro de EEG, generalmente la onda alfa. Sin embargo, el único meta-análisis realizado hasta la fecha (Crabbe y Dishman, 2004), no informó de una influencia específica en la dinámica del cerebro, si no que más bien sugirió la existencia de un aumento general en la potencia de todas las frecuencias (Bailey, 2008). Así, el objetivo del estudio de Bailey fue el de investigar durante una sola sesión de ejercicio aeróbico la actividad del EEG mientras que los participantes realizaban una tarea cognitiva como punto de partida para comprender la dinámica del cerebro. Los resultados de este estudio sugirieron que la actividad EEG aumentó durante el ejercicio y que pudo estar relacionada con la intensidad del ejercicio, lo cual podría influir positivamente en las funciones cerebrales y la cognición.

Tal y como afirmamos anteriormente, resulta extraño la escasa evidencia científica encontrada sobre vigilancia o atención sostenida durante el ejercicio físico. A pesar de que los pocos estudios encontrados con EEG apuntan hacia una importante relación entre el ejercicio físico a intensidad moderada y mejoras en las frecuencias altas del espectro de EEG y aunque esto podría sugerirnos aumentos en la vigilancia o atención sostenida, existe cierta controversia a la hora de interpretar sus resultados. Además, el estudio de la actividad cerebral en movimiento (durante el ejercicio físico) implica varios problemas metodológicos y técnicos (e.g. movimiento de los electrodos, potenciales musculares, sudoración causada por el ejercicio, etc.). En consecuencia, la mayoría de las investigaciones que buscan relaciones existentes entre ejercicio físico puntual y el funcionamiento cognitivo (actividad cerebral) se han registrado posteriormente a la realización del ejercicio puntual. En definitiva, los datos que encontramos en la literatura son aún insuficientes y por lo tanto, existen diversas cuestiones por esclarecer en el futuro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aks, D. J. (1998). Influence of exercise on visual search: Implications for mediating cognitive mechanisms. *Perceptual and Motor Skills*, 87, 771-783.
2. Arent, S. M., y Landers, D. M. (2003). Arousal, anxiety, and performance: A reexamination of the inverted-u hypothesis. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 74(4), 436-444.
3. Arcelin, R., Brisswalter, J., y Delignieres, D. (1997). Effects of physical exercise duration on decision making performance. *Journal of Human Movement Studies*, 32, 123-140.
4. Arcelin, R., Delignieres, D., y Brisswalter, J. (1998). Selective effects of physical exercise on choice reaction processes. *Perceptual and Motor Skills*, 87, 175-185.
5. Ando, S., Kimura T., Hamada, T., Kokubu, M., Moritani, T., y Oda, S. (2005). Increase in reaction time for the peripheral visual field during exercise above the ventilatory threshold. *European Journal of Applied Physiology*, 94: 461-467.
6. Audiffren, M., Tomporowski, P. D., y Zagrodnik, J. (2008). Acute aerobic exercise and information processing: Energizing motor processes during a choice reaction time task. *Acta Psychologica*, 129, 410-419.

7. Audiffren, M., Tomporowski, P. D., y Zagrodnik, J. (2009). Acute aerobic exercise and information processing: Modulation of executive control in a Random Number Generation task. *Acta Psychologica*, 132, 85-95.
8. Bard, C., y Fleury, M. (1978). Influence of imposed metabolic fatigue on visual capacity components. *Perceptual and Motor Skills*, 47, 1283-1287.
9. Ballard, J.C. (1996). Computerized assessment of sustained attention: a review of factors affecting vigilance performance. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 18 (6), 843-863.
10. Bailey, S. P., Holt, C., Pfluger, K. C., La Budde, Z., Afergan, D., Stripling, R., Miller, P. C., y Hall, E. E. (2008). Impact of prolonged exercise in the heat and carbohydrate supplementation on performance of a virtual environment task. *Military Medicine*, 173(2), 187-192.
11. Basner M., y Dinges D.F., (2011). Maximizing sensitivity of the psychomotor vigilance test (PVT) to sleep loss. *Sleep*, 34(5), 581-591.
12. Brisswalter, J., Arcelin, R., Audiffren, M., y Delignières, D. (1997). Influence of physical exercise on simple reaction time: effect of physical fitness. *Perceptual and Motor Skills*, 85, 1019-1027.
13. Brisswalter, J., Collardeau, M., y Arcelin, R. (2002). Effects of acute physical exercise characteristics on cognitive performance. *Sports Medicine*, 32(9), 555-566.
14. Brisswalter, J., Collardeau, M., y Rene, A. (2002). Effects of acute physical exercise characteristics on cognitive performance. *Sports Medicine*, 32, 555-566.
15. Brisswalter, J., Durand, M., Delignieres, D., y Legros, P. (1995). Optimal and non-optimal demand in a dual-task of pedaling and simple reaction time: Effects on energy expenditure and cognitive performance. *Journal of Human Movement Studies*, 29, 15-34.
16. Caldwell, J.A., Caldwell, J.L., Smith, J.K., y Brown, D.L. (2004) Modafinil's effects on simulator performance and mood in pilots during 37 h without sleep. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 75(9):777-84.
17. Chang, Y.K., Labban, J.D., Gapin, J.I., y Etnier J.L. (2012). The effects of acute exercise on cognitive performance: A meta-analysis. *Brain Research*, 1453, 87-101.
18. Chmura, J., Nazar, K., y Kaciuba-Uscilko, H. (1994). Choice reaction time during graded exercise in relation to blood lactate and plasma catecholamine thresholds. *International Journal of Sports Medicine*, 15, 172-176.
19. Chmura, J., Kryzstofiak, H., Ziemba, A.W. (1998). Psychomotor performance during prolonged exercise above and below the blood lactate threshold. *European Journal of Applied Physiology*, 77, 77-80
20. Cian, C., Barraud, P. A., Melin, B., y Raphel, C. (2001). Effects of fluid ingestion on cognitive function after heat stress or exercise-induced dehydration. *International Journal of Psychophysiology*, 42, 243-251.
21. Cian, C., Koulmann, N., Barraud, P. A., Raphel, C., Jimenez, C., y Melin, B. (2000). Influences of variations in body hydration on cognitive function: Effects of hyperhydration, heat stress, and exercise-induced dehydration. *Journal of Psychophysiology*, 14, 29-36.
22. Clark, C.R., Geffen, G.M., y Geffen, L.B. (1989). Catecholamines and the covert orientation of attention in humans. *Neuropsychologia*, 27 (2):131-9.

23. Correa, A., Molina, E., Sanabria, D. (2014). Effects of chronotype and time of day on the vigilance decrement during simulated driving. *Accident Analysis y Prevention*, 67, 113-118.
24. Collardeau, M., Brisswalter, J., y Audiffren, M. (2001). Effects of a prolonged run on simple reaction time of well trained runners. *Perceptual and Motor Skills*, 93, 679-689.
25. Collardeau, M., Brisswalter, J., Vercruyssen, F., Audiffren, M. y Goubault, C. (2001). Single and choice reaction time during prolonged exercise in trained subjects: Influence of carbohydrate availability. *European Journal of Applied Physiology*, 86, 150-156.
26. Cote, J., Salmela, J., y Papathanasopoulou, K. P. (1992). Effects of progressive exercise on attentional focus. *Perceptual and Motor Skills*, 75, 351-354.
27. Culham, J. C., Cavanagh, P., y Kanwisher, N. G. (2001). Attention response functions: characterizing brain areas using fMRI activation during parametric variations of attentional load. *Neuron*, 32(4), 737-745.
28. Davranche, K., y Audiffren M. (2004). Facilitating effects of exercise on information processing. *Journal of Sports Sciences*, 22, 419-428.
29. Davranche, K., Burle, B., Audiffren, M., y Hasbroucq, T. (2005). Information processing during physical exercise: A chronometric and electromyographic study. *Experimental Brain Research*, 165, 532-540.
30. Davranche, K., Burle, B., Audiffren, M., y Hasbroucq, T. (2006). Physical exercise facilitates motor processes in simple reaction time performance: An electromyographic analysis. *Neuroscience Letters*, 396(1), 54-56.
31. Delignieres, D., Brisswalter, J., y Legros, P. (1994). Influence of physical exercise on choice reaction time in sports experts: The mediating role of resource allocation. *Journal of Human Movement Studies*, 27, 173-188.
32. Del Giorno, J. M., Hall, E. E., O'Leary, K. C., Bixby, W. R., y Miller, P. C. (2010). Cognitive function during acute exercise: a test of the transient hypofrontality theory. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 32, 312-323
33. Dietrich, A. (2003). Functional neuroanatomy of altered states of consciousness: The transient hypofrontality hypothesis. *Consciousness and Cognition*, 12, 231-256.
34. Dietrich, A. (2006). Transient hypofrontality as a mechanism for the psychological effects of exercise. *Psychiatry Research*, 145, 79-83.
35. Dietrich, A., y Audiffren, M. (2011). The reticular-activating hypofrontality (RAH) model of acute exercise. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 35, 1305-1325.
36. Dietrich, A., y Sparling, P. B. (2004). Endurance exercise selectively impairs prefrontal-dependent cognition. *Brain and Cognition*, 55, 516-524.
37. Dorrian, J., Rogers, N.L., y Dinges, D.F. (2005). Psychomotor vigilance performance: Neurocognitive assay sensitive to sleep loss. In Kushida, C. A. (Ed.), *Sleep Deprivation. Clinical issues, pharmacology, and sleep loss effects* (39-70). New York, NY: Marcel Dekker.
38. Dorrian, J., Roach, G.D., Fletcher, A., y Dawson, D. (2007). Simulated train driving: fatigue, self-awareness and cognitive disengagement. *Applied ergonomics*, 38 (2): 155-66.

39. Drummond, S.P., Bischoff-Grethe, A., Dinges, D., Ayalon, L., Mednick, S.C., y Meloy, M.J. (2005). The Neural Basis of the Psychomotor Vigilance Task. *Sleep*, 28 (9), 1059-1068.
40. Easterbrook, J. A. (1959). The effect of emotion on cue utilization and the organization of behavior. *Psychological Review*, 1959(66), 183-201.
41. Etnier, J. L., Nowell, P. M., Landers, D. M., y Sibley, B. A. (2006). A meta-regression to examine the relationship between aerobic fitness and cognitive performance. *Brain Research Review*, 52, 119-130.
42. Etnier, J. L., Salazar, W., Landers, D. M., Petruzzello, S. J., Han, M., y Nowell, P. (1997). The influence of physical fitness and exercise upon cognitive functioning: A meta-analysis. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 19, 249-277.
43. Fery, Y. A., Ferry, A., Vom-Hofe, A., y Rieu, M. (1997). Effect of physical exhaustion on cognitive functioning. *Perceptual and Motor Skills*, 84, 291-198.
44. Fleury, M., y Brad, C. (1987). Effects of different types of physical activity on the performance of perceptual tasks in peripheral and central vision and coincident timing. *Ergonomics*, 30, 945-958.
45. Gondola, J. C. (1987). The effects of a single bout of aerobic dancing on selected tests of creativity. *Journal of Social Behavior and Personality*, 2, 275-278.
46. Hancock, P.A., y Hart, S.G. (2002). Defeating terrorism: What can human factors/ergonomics offer? *Ergonomics in Design*, 10 (1), 6-16.
47. Heckler, B., y Croce, R. (1992). Effects of time of posttest after two durations of exercise on speed and accuracy of addition and subtraction by fit and less-fit women. *Perceptual and Motor Skills*, 75, 1059-1065.
48. Herrmann, D. J., Yoder, C., Gruneberg, M., y Payne, D. (2006). *Applied cognitive psychology: A textbook (1st ed.)*. Philadelphia, PA: Lawrence Erlbaum Associates.
49. Hillman, C. H., Pontifex, M. B., Raine, L. B., Castelli, D. M., Hall, E. E., y Kramer, A. F. (2009). The effect of acute treadmill walking on cognitive control and academic achievement in preadolescent children. *Neuroscience*, 159, 1044-1054.
50. Hillman, C. H., Snook, E. M., y Jerome, G. J. (2003). Acute cardiovascular exercise and executive control function. *International Journal of Psychophysiology*, 48, 307-314.
51. Hockey, G. R. (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: a cognitive-energetical framework. *Biological Psychology*, 45, 73-93.
52. Hockey, G.R., Gaillard, A.W., y Coles, M.G. (1986). *Energetic Aspects of Human Information Processing*. Nijhoff, Netherlands.
53. Hogervorst, E., Riedel, W., Jeukendrup, A., y Jolles, J. (1996). Cognitive performance after strenuous physical exercise. *Perceptual and Motor Skills*, 83, 479-488.
54. Humphreys, M. S., y Revelle, W. (1984). Personality, motivation, and performance: A theory of the relationship between individual differences and information processing. *Psychological Review*, 91(2), 153-184.
55. Ide, K., Schmalbruch, I. K., Quistorff, B., Horn, A., y Secher, N. H. (2000). Lactate, glucose and O₂ uptake in human brain during recovery from maximal exercise. *Journal of Physiology*, 522, 159-164.

56. Isaacs, L. D., y Pohlman, E. L. (1991). Effects of exercise intensity on an accompanying timing task. *Journal of Human Movement Studies*, 20, 123-131.
57. Kahneman, D. (1973). *Attention and Effort*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
58. Kamijo, K., Hayashi, Y., Sakai, T., Yahiro, T., Tanaka, K., y Nishihira, Y. (2009). Acute effects of aerobic exercise on cognitive function in older adults. *Journal of Gerontology B-Psychology*, 64, 356–363.
59. Kamijo, K., Nishihira, Y., Hatta, A., Kaneda, T., Kida, T., Higashiura, T., et al. (2004). Changes in arousal level by differential exercise intensity. *Clinical Neurophysiology*, 115, 2693-2698.
60. Kamijo, K., Nishihira, Y., Hatta, A., Kaneda, T., Wasaka, T., Kida, T., y Kuroiwa, K. (2004). Differential influences of exercise intensity on information processing in the central nervous system. *European Journal of Applied Physiology*, 92, 305-311.
61. Kamijo, K., Nishihira, Y., Higashiura, T., y Kuroiwa K. (2007). The interactive effect of exercise intensity and task difficulty on human cognitive processing. *International Journal of Psychophysiology*, 65(2):114-21.
62. Kamijo, K., Pontifex, M.B., O’Leary, K.C., Scudder, M.R., Wu, C.T., Castelli, D.M., y Hillman, C.H. (2011). The effects of an afterschool physical activity program on working memory in preadolescent children. *Developmental Science*. 14(5):1046-58.
63. Kruk, B., Chmura, J., Krzeminski, K., Ziembra, A.W., Nazar, K., Pekkarinen, H., y Kaciuba-Uscilko, H. (2001). Influence of caffeine, cold and exercise on multiple choice reaction time. *Psychopharmacology*, 157, 197–201.
64. Kubitz, K.A., y Pothakos, K., (1997). Does aerobic exercise decrease brain activation? *Journal of Sport y Psychology*. 19, 291-301.
65. Lambourne K., y Tomporowski PD. (2010). The effect of acute exercise on cognitive task performance: a meta-regression analysis. *Brain Research Reviews*, 1341, 12–24.
66. Langner, R., y Eickhoff, S. B. (2013). Sustaining Attention to Simple Tasks: A Meta-Analytic Review of the Neural Mechanisms of Vigilant Attention. *Psychological bulletin*, 139(4), 870-900.
67. Levitt, S., y Gutin, B. (1971). Multiple choice reaction time and movement time during physical exertion. *Research Quarterly*, 42, 405-411.
68. Llorens, F., Sanabria, D., y Huertas, F. (2015). The influence of acute intense exercise on exogenous spatial attention depends on physical fitness level. *Experimental Psychology*, 62 (1): 20-9.
69. Luque-Casado, A., Perakakis, P., Ciria, L., y Sanabria, D. (2016a). Transient autonomic responses during sustained attention in high and low fit young adults. *Scientific Reports*. 6: 27556.
70. Luque-Casado, A., Perakakis, P., Hillman, C. H., Kao, S.C., Llorens, F., Guerra, P., y Sanabria, D. (2016b). Differences in Sustained Attention Capacity as a Function of Aerobic Fitness. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 48 (5), 887–895.
71. Magnié, M.N., Bermon, S., Martin, F., Madany-Lounis, M., Suisse, G., Muhammad, W., y Dolisi, C. (2000). P300, N400, aerobic fitness, and maximal aerobic exercise. *Psychophysiology*, 37(3):369-77.

72. Manly, T., Owen, A.M., McAvinue, L., Datta, A., Lewis, G.H., Scott, S.K., y Robertson, I.H. (2003). Enhancing the sensitivity of a sustained attention task to frontal damage: convergent clinical and functional imaging evidence. *Neurocase*, 9:340–349.
73. Martens, R., y Landers, D. M. (1970). Motor performance under stress: A test of the inverted-u hypothesis. *Journal of Personality and Social Psychology*, 16, 29-37.
74. Mackworth, J.F., y Webb, E.C. (1948). The inhibition of serum cholinesterase by alkyl fluorophosphonates. *Biomechanical Journal*, 42 (1): 91-5.
75. McGlynn, G. H., Laughlin, N. T., y Bender, V. I. (1977). Effect of strenuous to exhaustive exercise on a discrimination task. *Perceptual and Motor Skills*, 44, 1139-1147.
76. McGlynn, G. H., Laughlin, N. T., y Vivienne, R. (1979). The effect of increasing levels of exercise on mental performance. *Ergonomics*, 22, 407-414.
77. McMorris, T. (1995). The effect of exercise on simple reaction time. In R. Vanfraechem-Raway y Y. Vanden Auweele (Eds.), *Proceedings of the IXth European congress on sport psychology* (pp. 952-959). Brussels: Belgian Federation of Sport Psychology.
78. McMorris, T., Collard, K., Corbett, J., Dicks, M., y Swain, J. P. (2008). A test of the catecholamines hypothesis for an acute exercise–cognition interaction. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, 89, 106-115.
79. McMorris, T., Davranche, K., Jones, G., Hall, B., Corbett, J., y Minter, C. (2009). Acute incremental exercise, performance of a central executive task, and sympatho-adrenal system and hypothalamic-pituitary-adrenal axis activity. *International Journal of Psychophysiology*, 73(3), 334-340.
80. McMorris, T., Delves, S., Sproule, J., Lauder, M., y Hale, B. (2005). Effect of incremental exercise on initiation and movement times in a choice response, whole body psychomotor task. *British Journal of Sport Medicine*, 39(8):537-41.
81. McMorris, T., y Graydon, J. (1996a). Effects of exercise on soccer decision-making tasks of differing complexities. *Journal of Human Movement Studies*, 30, 177-193.
82. McMorris, T., y Graydon, J. (1996b). The effects of exercise on the decision-making performance of experienced and inexperienced soccer players. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 67, 109-114.
83. McMorris, T., y Graydon, J. (1997). Effect of exercise on cognitive performance in soccer-specific tests. *Journal of Sports Sciences*, 15, 459-468.
84. McMorris, T., y Graydon, J. (2000). The effect of incremental exercise on cognitive performance. *International Journal of Sport Psychology*, 31, 66-81.
85. McMorris, T., y Hale, B.J. (2012). Differential effects of differing intensities of acute exercise on speed and accuracy of cognition: A meta-analytical investigation. *Brain Cognition*, 80 (3), 338–351.
86. McMorris, T., y Hale, B.J. (2015). Is there an acute exercise-induced physiological/ biochemical threshold which triggers increased speed of cognitive functioning? A meta-analytic investigation. *Journal of Sport and Health Science*, 4, 4-13.
87. McMorris, T., y Keen, P. (1994). Effect of exercise on simple reaction times of recreational athletes. *Perceptual and Motor Skills*, 78, 123-130.
88. McMorris, T., Tallon, M., Williams, C., Sproule, J., Potter, J., Swain, J., et al. (2003). Incremental exercise, plasma concentrations of catecholamines, reaction time, and

- motor time during performance of a noncompatible choice response time task. *Perceptual and Motor Skills*, 97, 590–604.
89. McMorris, T., Tomporowski, P., y Audiffren, M. (2009). *Exercise and cognitive function*. Michigan: Wiley-Blackwell.
 90. Muto, V., Jaspard, M., Meyer, C., Kussé, C., Chellappa, S. L., Degueldre, C., Balteau, E., Shaffii-Le Bourdieu, A., Luxen, A., Middleton, B., Archer, S.N., Phillips, C., Collette, F., Vandewalle, G., Dijk, D.-J., y Maquet, P. (2016). Local modulation of human brain responses by circadian rhythmicity and sleep debt. *Science*, 353(6300), 687-690.
 91. Oken, B. S., Salinsky, M. C., y Elsas, S. M. (2006). Vigilance, alertness, or sustained attention: physiological basis and measurement. *Clinical Neurophysiology*, 117(9), 1885-1901.
 92. Paas, F.G y Adam, J.J. (1991). Human information processing during physical exercise. *Ergonomics*, 34, 1385-1397.
 93. Pennekamp, P., Boesel, R., Mecklinger, A., y Ott, H. (1994). Differences in EEG-theta for responded and omitted targets in a sustained attention task. *Journal of Psychophysiology*, 8, 131-141.
 94. Pesce, C., Capranica, L., Tesitore, A., y Figura, F. (2002). Effects of a submaximal physical load on the orienting and focusing of visual attention. *Journal of Human Movement Studies*, 42, 401-420.
 95. Petersen, S. E., y Posner, M. I. (2012). The Attention System of the Human Brain: 20 Years After. *Annual review of neuroscience*, 35, 73-89.
 96. Petruzzello, S.J., Landers, D.M., Hatfield, B.D., Kubitz, K.A., y Salazar, W. (1991). A meta-analysis on the anxiety-reducing effects of acute and chronic exercise. *Outcomes and mechanisms*. *Sports Medicine*, 11(3):143-82.
 97. Pontifex, M.B., y Hillman, C.H. (2007). Neuroelectric and behavioral indices of interference control during acute cycling. *Clinical Neurophysiology*, 118(3):570-80.
 98. Pontifex, M.B., Saliba, B.J., Raine, L.B., Picchiatti, D.L., y Hillman, C.H. (2013). Exercise improves behavioral, neurocognitive, and scholastic performance in children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Journal of Pediatrics*, 162 (3):543-51.
 99. Reilly, T., y Smith, D. (1986). Effect of work intensity on performance in a psychomotor task during exercise. *Ergonomics*, 29, 601-606.
 100. Rosenberg, M. D., Finn, E. S., Scheinost, D., Papademetris, X., Shen, X., Constable, R. T., y Chun, M. M. (2016). A neuromarker of sustained attention from whole-brain functional connectivity. *Nature neuroscience*, 19(1), 165-171.
 101. Salmela, J. H., y Ndoye, O. D. (1986). Cognitive distortions during progressive exercise. *Perceptual and Motor Skills*, 63, 1067-1072.
 102. Sanabria, D., Morales, E., Luque, A., Galvez, G., Huertas, F., y Lupiáñez, J. (2011). Effects of aerobic exercise on exogenous spatial attention. *Psychology of Sport and Exercise*, 12(5), 570-574.
 103. Sarter, M., Given, B., y Bruno, J.P. (2001). The cognitive neuroscience of sustained attention: where top-down meets bottom-up. *Brain Research Reviews*, 35(2):146-160.
 104. Scudder, M.R., Drollette, E.S., Pontifex, M.B., y Hillman, C.H. (2012). Neuroelectric indices of goal maintenance following a single bout of physical activity. *Biological Psychology*, 89 (2): 528-31.

105. Sibley, B. A., Etnier, J. L., y Le Masurier, G. C. (2006). Effects of an acute bout of exercise on cognitive aspects of Stroop performance. *Journal of Sport y Exercise Psychology*, 28, 285–299.
106. Sjoberg, H., (1977). Interaction of task difficulty, activation, and workload. *Journal of Human Stress* 3, 33–38.
107. Smit, A. S., Eling, P. A., Hopman, M. T., y Coenen, A. M. (2005). Mental and physical efforts affect vigilance differently. *International Journal of Psychophysiology*, 57, 211–217.
108. Smith, P.J., Blumenthal, J.A., Hoffman, B.M., Cooper, H., Strauman, T.A., Welsh-Bohmer, K., Browndyke, J.N., y Sherwood, A. (2010). Aerobic Exercise and Neurocognitive Performance: A Meta-Analytic Review of Randomized Controlled Trials. *Psychosomatic Medicine*, 72(3):239–52.
109. Tenenbaum, G., Yuval, R., Elbaz, G., Gar-Eli, M., y Weinberg, R. (1993). The relationship between cognitive characteristics and decision making. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 18, 48-62.
110. Tomporowski, P., Cureton, K., Armstrong, L., Kane, G., Sparling, P., y Millard-Stafford, M. (2005). Short-term effect of aerobic exercise on executive processes and emotional reactivity. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 3(2), 131–146.
111. Tomporowski, P. D., Ellis, N. R., y Stephens, R. (1987). The immediate effects of strenuous exercise on free recall memory. *Ergonomics*, 30, 121-129.
112. Tomporowski, P. D., Lambourne, K., y Okumura, M. S. (2011). Physical activity interventions and children's mental function: an introduction and overview. *Preventive Medicine*, 52 Suppl 1, S3-9.
113. Travlos, A. K., y Marisi, D. Q. (1995). Information processing and concentration as a function of fitness level and exercise induced activation to exhaustion. *Perceptual and Motor Skills*, 80, 15-26.
114. Warm, J.S., Parasuraman, R., y Matthews, G. (2008). Vigilance requires hard mental work and is stressful. *Human Factors*, 50:433-41.
115. Wiggins, M.W. (2011). Vigilance decrement during a simulated general aviation flight. *Applied Cognitive Psychology*, 1; 25(2):229–35.
116. Yagi, Y., Coburn, K.L., Estes, K.M., y Arruda, J.E. (1999). Effects of aerobic exercise and gender on visual and auditory P300, reaction time, and accuracy. *European Journal of Physiology and Occupational Physiology*, 80 (5): 402-8.
117. Yerkes, R.M. y Dodson, J.D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 18, 459–482.