



## ADAPTACIONES FISIOLÓGICAS AL ENTRENAMIENTO INTERVÁLICO DE ALTA INTENSIDAD DE VOLUMEN BAJO

**Martin J. Gibala, PhD.** | Profesor y Presidente del Departamento de Kinesiología | Universidad de McMaster | Canadá

### PUNTOS CLAVE

- El entrenamiento interválico de alta intensidad (HIIT, por sus siglas en inglés) se caracteriza generalmente por sesiones repetidas de ejercicio corto e intermitente, generalmente a intensidades que logran  $\geq 85\%$  del consumo de oxígeno pico ( $VO_{2pico}$ ) intercalados con periodos de descanso o ejercicio de baja intensidad para recuperación.
- Aunque es ampliamente apreciado por los atletas de resistencia como un componente integral de los programas de entrenamientos diseñados para llevar al máximo el rendimiento, los estudios a corto plazo que duran algunas semanas en personas sanas de condición física promedio han establecido que el HIIT por sí mismo es un estímulo potente para inducir adaptaciones fisiológicas que se parecen a los cambios típicamente asociados con el entrenamiento tradicional de resistencia, a pesar de un volumen total de ejercicio menor y menor compromiso en tiempo de entrenamiento.
- Tan poco como seis sesiones de HIIT durante 2 semanas, utilizando un protocolo que implica sólo 2-3 minutos de ejercicio supramáximo dentro de una sesión de entrenamiento que dure ~20 minutos (es decir, pruebas de Wingate repetidas), puede incrementar la capacidad oxidativa del músculo esquelético, reducir el aporte de energía no-oxidativa durante el ejercicio submáximo y mejorar marcadamente el rendimiento durante el trabajo que depende principalmente del metabolismo energético aeróbico.
- Aunque los protocolos HIIT supramáximos son muy efectivos, otros modelos HIIT de volumen bajo que consisten en esfuerzos relativamente intensos, pero submáximos y de carga constante (por ejemplo, 10 x 60 s a una intensidad de trabajo fijo que llega al ~90% de la frecuencia cardiaca máxima, separados por 60 s de recuperación) han mostrado que inducen adaptaciones fisiológicas y del rendimiento rápidas, similares al entrenamiento basado en "Wingate".
- La mayoría de los estudios de HIIT de volumen bajo realizados a la fecha han utilizado periodos de intervención relativamente cortos (es decir, que duran algunas semanas) y se necesitan trabajos a futuro que involucren intervenciones a largo plazo (es decir, meses a años) para avanzar en el entendimiento de la mecánica de cómo el manipular el estímulo del ejercicio se traduce en el remodelamiento fisiológico, así como en la identificación desde una perspectiva práctica de la "dosis" mínima del HIIT para maximizar la adaptación, dado que la falta de tiempo sigue siendo la barrera más comúnmente citada para la falta de participación en el ejercicio regular.

### INTRODUCCIÓN

El entrenamiento de resistencia regular mejora el rendimiento durante las actividades que dependen principalmente de la energía del metabolismo aeróbico, en gran medida por que incrementan la habilidad del cuerpo para transportar y utilizar el oxígeno, y mejoran la capacidad del metabolismo para oxidar sustratos por los músculos esqueléticos activos (Saltin & Gollnick, 1983). Aunque es menos apreciado, el entrenamiento interválico de alta intensidad (HIIT) es un estímulo potente para inducir adaptaciones fisiológicas que se parecen, y de hecho pueden ser superiores a, los cambios típicamente asociados con el entrenamiento tradicional de resistencia (Kubukeli et al., 2002; Ross & Leveritt, 2001). De hecho, los atletas de resistencia altamente entrenados han incorporado el HIIT como un componente integral de sus programas de entrenamiento diseñados para maximizar el rendimiento (Laursen & Jenkins, 2002). Recientemente, algunos estudios a corto plazo de algunas semanas de duración en personas sanas de condición física promedio han establecido que el HIIT por sí mismo es un estímulo potente para inducir adaptaciones fisiológicas que se parecen a los cambios típicamente asociados con el entrenamiento de resistencia tradicional,

a pesar de un menor volumen total de ejercicio y menor compromiso con el tiempo de entrenamiento (Burgomaster et al., 2005; Gibala et al., 2006; Little et al., 2010). Esta breve revisión resalta el trabajo reciente que aclara la potencia del HIIT con volumen bajo para inducir el remodelamiento fisiológico rápido y mejorar la capacidad para el rendimiento durante las actividades que dependen principalmente de la energía del metabolismo aeróbico. Para un análisis más completo, así como la aplicación potencial del HIIT a diferentes poblaciones, el lector es referido a otras revisiones recientes hechas por el presente autor (Gibala et al., 2012, 2014) y otros, incluyendo trabajo que ha sido específicamente enfocado a aquellos en riesgo, o afectados por, enfermedades cardiometabólicas (Kessler et al., 2012; Weston et al., 2014). Con respecto a las aplicaciones prácticas y prescripción del entrenamiento, otras dos revisiones recientes (Buchheit & Laursen, 2013ab) consideran a detalle diversos aspectos del programa HIIT, con un enfoque particular en el rendimiento atlético.

### REVISIÓN DE LAS INVESTIGACIONES – ¿QUÉ ES HIIT?

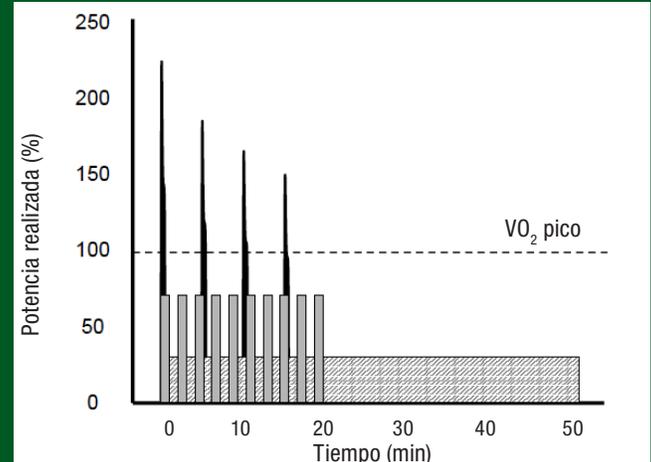
El entrenamiento interválico de alta intensidad (HIIT) generalmente se caracteriza por sesiones repetidas de ejercicio corto, intermitente,

típicamente a intensidades que alcanzan  $\geq 85\%$  del consumo de oxígeno pico ( $VO_{2pico}$ ) y se intercalan con periodos de descanso o ejercicio de baja intensidad para recuperación.

Se ha utilizado un amplio rango de términos para describir varios protocolos de entrenamiento interválico, llevando a muchos acrónimos diferentes y una falta de estandarización general en las publicaciones científicas. Recientemente se propuso un esquema de clasificación en el cual el término “HIIT” se utiliza para describir protocolos en los cuales los estímulos de entrenamiento son “cercaos al máximo” o la intensidad objetivo es entre el 80-100% de la frecuencia cardiaca máxima, y “el entrenamiento interválico de sprints” (SIT, por sus siglas en inglés) utilizado para protocolos que involucran “esfuerzos totales” o “supramáximos”, en los cuales las intensidades objetivo corresponden a cargas de trabajo mayores que las que se requieren para alcanzar el consumo máximo de oxígeno o ( $VO_{2pico}$ ) (Weston et al., 2014).

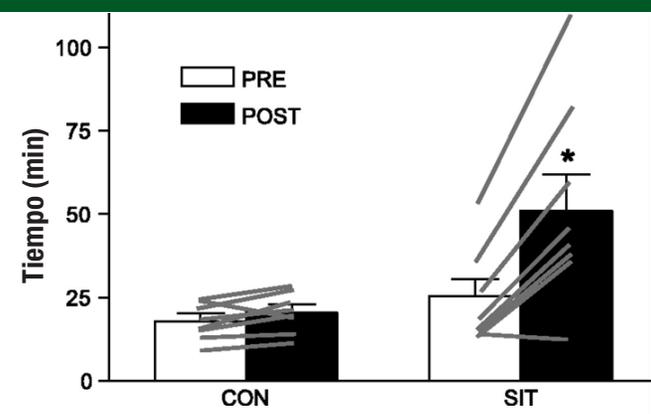
Para simplificar, en esta revisión se utilizará exclusivamente el término “HIIT”, pero el lector interesado es referido a Weston et al. (2014) para examinar más. De la misma forma, no existe una definición universal de lo que constituya un entrenamiento interválico de “volumen bajo”, pero hemos considerado que generalmente son protocolos en los cuales la cantidad total del ejercicio intenso realizado durante una sesión de entrenamiento es  $\leq 10$  minutos, es decir, la sumatoria total de los grandes esfuerzos, excluyendo los periodos de recuperación y cualquier calentamiento o enfriamiento (Gibala et al., 2014). Con respecto a los estudios que han examinado las adaptaciones fisiológicas al HIIT de volumen bajo, uno de los protocolos empleados más comúnmente es el Test de Wingate, que involucra 30 segundos de pedaleo máximo en un ergómetro especializado, generalmente utilizando una fuerza de frenado o resistencia equivalente al 7.5% de la masa corporal. La actividad es extremadamente demandante, y durante un solo esfuerzo los sujetos típicamente generan una potencia promedio que corresponde a  $\sim 250$ -300% de la que se puede alcanzar durante una prueba incremental estándar para determinar el ( $VO_{2pico}$ ). Una sola sesión de entrenamiento dura  $\sim 20$ -25 minutos incluyendo un calentamiento y enfriamiento cortos, con los sujetos típicamente realizando 4-6 Tests de Wingate separados por unos cuantos minutos de recuperación (Burgomaster et al., 2005; Gibala et al., 2006).

Otra intervención comúnmente empleada en estudios de HIIT de volumen bajo es realizar esfuerzos repetidos de una carga constante a una intensidad de trabajo relativamente alta (pero no total); por ejemplo,  $\sim 10$  esfuerzos de pedaleo de 60 s al 100% de la producción de potencia máxima alcanzada durante una prueba de  $VO_{2pico}$  de rampa, o a una intensidad que alcance  $\sim 90\%$  de la frecuencia cardiaca máxima, intercalada con una cantidad de recuperación similar entre esfuerzos (Little et al., 2010). En la Figura 1, se muestra una revisión de algunos protocolos comunes empleados en estudios de entrenamiento interválico.



**Figura 1.** Ejemplos de protocolos empleados en los estudios de entrenamiento interválico, expresados en relación con la potencia máxima pico (PPO, por sus siglas en inglés) que se requiere para alcanzar el consumo máximo de oxígeno ( $VO_{2pico}$ ). (A) Ejercicio continuo típico de intensidad moderada (MICT, por sus siglas en inglés), por ejemplo, 50 min a  $\sim 35\%$  de la PPO, la cual alcanza  $\sim 70\%$  de la  $FC_{máx}$  (zona con textura); (B) Entrenamiento interválico de alta intensidad de volumen bajo (HIIT), por ejemplo, 10 x 1 min de un trabajo constante correspondiente al  $\sim 75\%$  de la PPO intercalado con 1 min de recuperación, el cual alcanza  $\sim 85$ -90% de la  $FC_{máx}$  durante los intervalos (barras grises); (C) Entrenamiento interválico de sprints de volumen bajo (SIT), por ejemplo, 4 x 30 s de esfuerzo máximo a una potencia variable correspondiente al  $\sim 175\%$  de la PPO (promediado durante el curso de los intervalos), intercalados con 4 min de recuperación, el cual alcanza  $\sim 90$ -95% de la  $FC_{máx}$  durante los intervalos (símbolos negros). La potencia y la frecuencia cardiaca estimadas están basadas en los datos del laboratorio del autor [Reimpreso con permiso de Gibala et al., (2014)].

Uno de los hallazgos más llamativos de los estudios de HIIT con volumen bajo es la mejoría dramática en la capacidad del ejercicio durante las actividades que dependen principalmente de metabolismo energético aeróbico, a pesar de la menor cantidad relativa de ejercicio total realizado (Burgomaster et al., 2005; Gibala et al., 2006; Little et al., 2010). Por ejemplo, Burgomaster y colaboradores (2005) encontraron que los sujetos duplicaban la cantidad de tiempo del ejercicio que se puede mantener a una carga de trabajo submáxima fija - de  $\sim 26$  a 51 minutos durante el pedaleo al 80% del  $VO_{2pico}$  de pre-entrenamiento - después de sólo seis sesiones de HIIT basado en Wingate durante 2 semanas (Figura 2).



**Figura 2.** Tiempo de pedaleo hasta la fatiga al 80% del consumo de oxígeno pico ( $VO_{2pico}$ ) pre-entrenamiento antes (PRE) y después (POST) de seis sesiones de entrenamiento interválico de “sprints” de alta intensidad (SIT) durante 2 semanas o un periodo equivalente sin entrenamiento (control; CON). Resultados individuales y promedio ( $\pm SE$ ) de ocho sujetos en cada grupo. \* $P < 0.05$  contra PRE en las mismas condiciones. [Reimpreso con permiso de Burgomaster et al., (2005)].

La validez de estos hallazgos se reforzó con el hecho de que un grupo control no mostró cambios en el rendimiento cuando se evaluaron con 2 semanas de diferencia sin intervenciones de entrenamiento. Los trabajos subsecuentes confirmaron que el mismo protocolo HIIT mejora el rendimiento durante actividades que se parecen más a la competencia deportiva normal, incluyendo las pruebas contrarreloj en laboratorio que simulan carreras de ciclismo que duran de <2min a <1h (Gibala et al., 2006). Obviamente, los factores responsables de las mejoras inducidas por el entrenamiento en la capacidad del ejercicio son complejos y determinados por numerosos factores incluyendo tanto fisiológicos (por ejemplo, cardiovasculares, iónicos, metabólicos, neurales, respiratorios) como atributos psicológicos (por ejemplo, estado de ánimo, motivación, percepción del esfuerzo). En los estudios a corto plazo citados previamente (Burgomaster et al., 2005; Gibala et al., 2006; Little et al., 2010) se reportó que no había cambios medibles en el  $VO_{2pico}$  después de 2 semanas de HIIT de volumen bajo, lo que sugiere que la mejoría en el rendimiento del ejercicio fue atribuible principalmente a las adaptaciones periféricas en el músculo esquelético, como se considera más adelante. Algunos estudios han reportado mejorías en el  $VO_{2pico}$  después de tan solo 2 semanas de HIIT basado en Wingate, sin embargo, esto fue realizado en individuos previamente sedentarios y con menor condición física (Whyte et al., 2010). Para una mejor comprensión de estos datos, el lector interesado puede buscar las revisiones recientes incluyendo un meta-análisis (Bacon et al., 2013) que consideró la entrenabilidad del  $VO_{2pico}$  en respuesta al HIIT.

### ADAPTACIONES FISIOLÓGICAS AL HIIT DE VOLUMEN BAJO

Similar al entrenamiento tradicional de resistencia o de fuerza, las adaptaciones fisiológicas al HIIT son altamente dependientes de la naturaleza precisa del estímulo de entrenamiento, es decir, la frecuencia, intensidad y volumen del trabajo realizado. Sin embargo, a diferencia de las otras dos categorías generales de entrenamiento que se basan principalmente en energía oxidativa (resistencia) o no oxidativa (fuerza) para aportar ATP, la bioenergética del ejercicio de alta intensidad puede diferir de forma importante dependiendo de la duración e intensidad de cada intervalo, número de intervalos realizados y de la naturaleza y duración de la recuperación entre esfuerzos (Ross & Leveritt, 2001). Por ejemplo, durante un esfuerzo de 30 s de pedaleo máximo, aproximadamente el 20% de la energía total se deriva del metabolismo oxidativo (Parolin et al., 1999). Sin embargo, si la serie de ejercicio se repite tres veces con cuatro minutos de recuperación entre series, el principal aporte de ATP durante la serie final se deriva del metabolismo oxidativo (Parolin et al., 1999).

El incremento en la contribución del metabolismo oxidativo durante esfuerzos repetidos de alta intensidad es atribuible tanto a un incremento en la tasa de transporte y utilización de oxígeno como a una reducción en la habilidad de estimular la fosforilación de sustratos a través de la hidrólisis de la fosfocreatina y glucólisis (Parolin et al., 1999). El ejercicio intermitente de alta intensidad es por lo tanto único

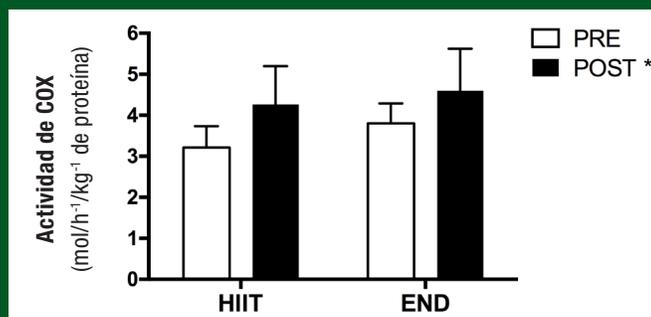
debido a que durante una serie o determinada sesión de entrenamiento, la energía celular se puede derivar principalmente del metabolismo no oxidativo u oxidativo. En consecuencia, el HIIT puede alcanzar un amplio rango de adaptaciones fisiológicas, y el lector puede referirse a más revisiones para una descripción más extensa de las adaptaciones fisiológicas al HIIT (Buchheit & Laursen, 2013 ab; Kubukeli et al., 2002; Ross & Leveritt, 2001). Las siguientes secciones resumen brevemente algunas de las principales adaptaciones metabólicas y morfológicas al HIIT, nuevamente enfocado en estudios recientes que han examinado la rápida remodelación del músculo esquelético después de un corto tiempo de HIIT de bajo volumen.

La mejoría en "sprint" o en el rendimiento en el ejercicio de alta intensidad después del HIIT está relacionada en parte al incremento de las actividades máximas de las enzimas que regulan el aporte de energía no oxidativa (por ejemplo, glucógeno fosforilasa, fosfofructocinasa), incremento en la capacidad de amortiguamiento muscular y adaptaciones iónicas incluyendo el incremento en el contenido y función de la sodio-potasio ATPasa ( $Na^+K^+$ -ATPasa) (Kubukeli et al., 2002; Ross & Leveritt, 2001). En términos de composición de fibras musculares, en muchos estudios se ha reportado un cambio bidireccional del tipo IIa ( $I \rightarrow IIa \leftarrow IIx$ ), similar a la tendencia observada después del entrenamiento tanto de resistencia como de fuerza, aunque esto no es un hallazgo universal (Kubukeli et al., 2002; Ross & Leveritt, 2001). El HIIT no tiene un efecto principal en el tamaño del músculo, especialmente comparado con el entrenamiento de fuerza intenso, aunque pocos estudios han reportado una hipertrofia modesta pero significativa de ambas fibras tipo I y tipo II después de varios meses de HIIT (Ross & Leveritt, 2001). En este sentido, una serie aguda de HIIT basado en Wingate no activa las vías de señalización dentro del músculo esquelético que se relacionan al crecimiento/hipertrofia de las fibras (Gibala et al., 2009).

Se ha reconocido ampliamente que el HIIT también tiene el potencial para incrementar la capacidad oxidativa del músculo y el rendimiento durante actividades que principalmente dependen del metabolismo energético aeróbico (Saltin y Gollnick, 1983). MacDougall y colaboradores (1998) aportaron un ejemplo de la potencia del HIIT basado en Wingate cuando reportaron un incremento de la actividad máxima de muchas enzimas mitocondriales después de un protocolo de 7 semanas de entrenamiento en el cual los sujetos realizaron 4-10 intervalos por día, tres veces por semana. Hasta ahora, se conocía poco con respecto al tiempo y volumen mínimo de entrenamiento necesarios para alcanzar adaptaciones rápidas en el músculo esquelético, o el efecto del HIIT en el metabolismo de sustratos durante las actividades que principalmente dependen del aporte de energía aeróbica. En una serie de estudios, examinamos las adaptaciones rápidas en el metabolismo energético oxidativo y en la capacidad del ejercicio después de un tiempo corto de HIIT basado en Wingate como se describió previamente (Burgomaster et al., 2005, 2006, 2007; Gibala et al., 2006). El aspecto principal de este trabajo fue que, con un volumen muy bajo de entrenamiento, equivalente a

<15 min de ejercicio muy intenso o <143 kcal (<600 kJ) de trabajo total. Todos los estudios se realizaron en varones sanos de edad universitaria y mujeres que eran habitualmente activas pero que no estaban en un tipo de programa de entrenamiento estructurado.

Hemos encontrado consistentemente un incremento en la capacidad muscular oxidativa (medida utilizando la actividad máxima o el contenido proteico máximo de enzimas mitocondriales como la citrato sintetasa y la citocromo oxidasa) con rangos desde <15-35% después de seis sesiones de HIIT durante 2 semanas (Burgomaster et al., 2005, 2006, 2007). Sorprendentemente, solo unos cuantos estudios han comparado previamente los cambios en la capacidad oxidativa muscular después de entrenamiento de intervalos contra entrenamiento continuo en humanos, con resultados ambiguos (ver referencias en Gibala et al., 2006). Más aún, los estudios que han evaluado la capacidad oxidativa muscular después de ejercicio interválico contra ejercicio continuo han utilizado un diseño de trabajo cruzado en el cual el trabajo total fue similar entre ambos grupos. En nuestros estudios, buscamos comparar los cambios en la capacidad oxidativa muscular y el rendimiento en el ejercicio después de entrenamientos de sprints de volumen bajo y entrenamiento de resistencia tradicional de volumen alto, ambos protocolos diferían marcadamente en términos de volumen total y tiempo de entrenamiento. El protocolo de sprint consistió en seis sesiones de esfuerzos "supramáximos" de pedaleo cortos, de 30 segundos en total, intercalados con una recuperación corta, durante 14 días. El protocolo de resistencia consistió en seis sesiones de ejercicio 90-120 minutos de pedaleo de moderada intensidad, con 1-2 días de recuperación intercalados entre sesiones de entrenamiento. Como resultado, los sujetos en ambos grupos realizaron el mismo número de sesiones de entrenamiento en los mismos días con el mismo número de días de recuperación; sin embargo, el tiempo total de entrenamiento fue 2.5 y 10.5 horas, respectivamente, para el grupo de sprint y resistencia, y el volumen de entrenamiento difirió en 90% (150 contra 1553 kcal (630 contra 650 kJ)). Los dos protocolos de entrenamiento indujeron adaptaciones marcadamente similares en el rendimiento en el ejercicio y en la capacidad oxidativa muscular, como reflejo de la actividad máxima de la citocromo c oxidasa (Figura 3).

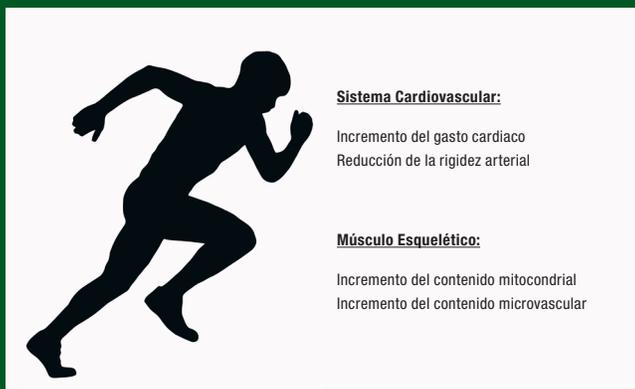


**Figura 3.** Máxima actividad de citocromo c oxidasa medida en muestras de biopsia de músculo esquelético humano en reposo, obtenidas antes (PRE) y después (POST) de seis sesiones de entrenamiento interválico de alta intensidad (HIIT) o entrenamiento continuo de moderada intensidad (END, por sus siglas en inglés) durante 2 semanas. El tiempo total realizado fue de aproximadamente 2.5 y 10.5 horas para los grupos de sprint y resistencia, respectivamente, y el volumen total de ejercicio fue aproximadamente 90% menor para el grupo HIIT. Los valores son promedios  $\pm$ SE para ocho sujetos en cada grupo. \* $P < 0.05$  contra PRE (principal efecto para el tiempo). [Modificado después del permiso de Gibala et al., (2006)].

Además del incremento en la capacidad oxidativa del músculo esquelético después de 2 semanas de HIIT, también detectamos cambios en el metabolismo de los carbohidratos que normalmente están asociados con el entrenamiento de resistencia tradicional, incluyendo un incremento en el contenido de glucógeno en reposo y una tasa de utilización de glucógeno reducida durante el ejercicio de trabajo equivalente (Burgomaster et al., 2006, 2007). Marcadores seleccionados del metabolismo de los ácidos grasos, incluyendo la actividad máxima de la  $\beta$ -hidroxiacil-CoA deshidrogenasa (HAD) y el contenido muscular de la translocasa de ácidos grasos (FAT/CD36) o la proteína transportadora de ácidos grasos asociada a la membrana plasmática (FABPpm), no tuvieron cambios después de nuestra intervención de entrenamiento basada en Wingate de corto tiempo (Burgomaster et al., 2006, 2007), aunque hemos demostrado un incremento en la HAD después de 6 semanas de este tipo de entrenamiento. Talanian y colaboradores (2007) demostraron que en siete sesiones de HIIT durante 2 semanas se incrementó la actividad máxima de HAD, el contenido proteico muscular de FABPpm y la oxidación de grasas en todo el cuerpo durante 60 min de ciclismo al 65% del  $VO_{2\text{pico}}$  del pre-entrenamiento.

Una discrepancia principal entre los respectivos protocolos de 2 semanas de entrenamiento fue la naturaleza del estímulo del HIIT. Los sujetos no realizaron sprints máximos en el estudio de Talanian y colaboradores (2007), sin embargo, cada sesión de entrenamiento consistió en series de 10 x 4 minutos de ciclismo al  $\sim 90\%$  del  $VO_{2\text{pico}}$  con 2 minutos de descanso entre los intervalos. El tiempo total de entrenamiento ( $\sim 5$  h) y el volumen de ejercicio ( $\sim 717$  kcal o 3000 kJ) durante un periodo de 2 semanas de entrenamiento fue por lo tanto sustancialmente mayor que en los estudios que ocuparon el entrenamiento de ejercicio basado en Wingate (Burgomaster et al., 2006, 2007).

Con respecto a las adaptaciones cardiovasculares, se ha reportado que 8 semanas de HIIT de volumen bajo incrementan tanto la masa ventricular izquierda como el volumen sistólico (Matsuo et al., 2014). Se han reportado mejorías similares en la estructura y función vascular periférica, incluyendo la distensibilidad de la arteria poplítea y la dilatación mediada por flujo, después de 6 semanas de entrenamiento HIIT basado en Wingate y entrenamiento tradicional continuo de moderada intensidad (Rakobowchuk et al., 2008). Un estudio de un laboratorio diferente que utilizó el mismo protocolo experimental mostró mejorías similares en la densidad microvascular del músculo esquelético y del contenido enzimático microvascular, a pesar de las grandes diferencias en el volumen total de entrenamiento (Cocks et al., 2013). En la Figura 4, se resume una revisión de algunas de las principales adaptaciones fisiológicas al HIIT de volumen bajo.



**Figura 4.** Revisión de algunos de los principales cambios fisiológicos observados después de varias semanas de HIIT de volumen bajo. ©Can Stock Photo Inc./Snap2Art.

## ¿CÓMO ESTIMULA EL HIIT ADAPTACIONES EN EL MÚSCULO ESQUELÉTICO?

La potencia del HIIT para alcanzar cambios rápidos en el remodelamiento del músculo esquelético está sin duda relacionada a su alto nivel de reclutamiento de fibras musculares y al potencial para estresar particularmente a las fibras tipo II (Saltin & Gollnick, 1983), pero los mecanismos subyacentes no son claros. Desde una perspectiva de señalización celular, el ejercicio se clasifica típicamente como de “fuerza” o de “resistencia”, con el trabajo de corta duración y alta intensidad generalmente asociado con incrementos en la masa muscular, y el ejercicio prolongado de intensidad baja a moderada asociado con incrementos en la masa mitocondrial y actividad oxidativa de las enzimas (Baar, 2006). De hecho, las distintas vías que regulan ya sea el crecimiento de las células o la biogénesis de las mitocondrias se intersectan en numerosos puntos en una forma inhibitoria, resultando en una respuesta que es ampliamente exclusiva para un tipo de ejercicio u otro (Baar, 2006). Hasta ahora, se conocía poco sobre los eventos de señalización intracelular que median el remodelamiento del músculo esquelético en respuesta al HIIT, el cual, a diferencia del entrenamiento tradicional de fuerza, no se caracteriza por una hipertrofia muscular esquelética marcada (Ross & Leveritt, 2001).

Dado que el fenotipo oxidativo está rápidamente sobrerregulado por el HIIT, parece probable que las adaptaciones metabólicas a este tipo de ejercicio se pueden mediar en parte a través de las vías de señalización normalmente asociadas con el entrenamiento de resistencia. Las alteraciones metabólicas inducidas por la contracción activan diversas cinasas y fosfatasa involucradas en la transducción de las señales, incluyendo las cascadas de la proteincinasa activada por AMP (AMPK) y la proteincinasa activada por mitogénesis (MAPK). Se ha mostrado que estas vías de señalización juegan un papel en promover coactivadores específicos involucrados en el metabolismo y biogénesis mitocondrial, incluyendo la activación del proliferador de peroxisomas activado por el coactivador del receptor  $\gamma$  (PGC)-1 $\alpha$ , el cual se cree es el “regulador principal” de la biogénesis mitocondrial en el músculo (Coffee & Hawley, 2007).

Se ha demostrado que el HIIT basado en Wingate estimula de forma aguda los marcadores de señalización de AMPK y MAPK e incrementa el ARNm de PGC-1 $\alpha$  muchas veces (Gibala et al., 2009; Little et al., 2011), similar a lo que se ha reportado después del ejercicio continuo de moderada intensidad (Little et al., 2010). De la misma forma parecido al entrenamiento de resistencia tradicional, el HIIT basado en Wingate de forma aguda puede activar la PGC-1 $\alpha$  al incrementar su translocación nuclear (Little et al., 2011), y varias semanas de HIIT llevan al incremento del contenido proteico de PGC-1 $\alpha$  (Burgomaster et al., 2008), sugiriendo que la PGC-1 $\alpha$  está probablemente involucrada en la regulación de algunas de las adaptaciones metabólicas a esta forma de entrenamiento. También hay evidencia que muestra que los incrementos repetidos y transitorios del ARNm en respuesta a las cargas sucesivas de HIIT llevará a incrementos sostenidos del contenido de proteínas de transcripción y metabólicas, eventualmente resultando en un mayor contenido de proteínas mitocondriales y actividad enzimática (Perry et al., 2010).

## IMPLICACIONES PRÁCTICAS

- A menudo se descarta al HIIT por ser solo para atletas de élite. Sin embargo, el concepto básico de alternar periodos de ejercicio de alta y baja intensidad se puede aplicar a casi todos los niveles de acondicionamiento físico.
- Como cualquier forma de actividad física, existen beneficios potenciales, así como ciertas limitaciones asociadas con el entrenamiento interválico.
- Los “pros” incluyen el hecho de que los intervalos son un estímulo de entrenamiento potente, y aunque la cantidad total de ejercicio realizado puede ser muy pequeña, el entrenamiento puede inducir adaptaciones parecidas a aquellas asociadas con periodos de entrenamiento más prolongados de ejercicio continuo de moderada intensidad, lo que lo hace relativamente más eficiente en tiempo.
- Los “contras” incluyen la sensación incómoda del HIIT debido al esfuerzo relativamente alto que se requiere para hacer eficiente el tiempo de entrenamiento, y también el gran riesgo potencial de lesiones especialmente si se corre, al compararlo con actividades de menor carga de peso como el ciclismo o natación.
- Mientras que el HIIT es efectivo para mejorar la condición física, no existe una fórmula mágica que “se ajuste a todos” y que sea la mejor para todos, en principio el mejor acercamiento a largo plazo es una estrategia variada que incorpore sesiones de fuerza, resistencia y velocidad, así como ejercicio de flexibilidad y una adecuada nutrición.

## RESUMEN

Los atletas de resistencia altamente entrenados han valorado el papel del HIIT como parte de un programa de entrenamiento completo. La evidencia reciente demuestra que – en personas jóvenes saludables

de condición física promedio – el ejercicio interválico intenso es una estrategia eficiente en tiempo para estimular adaptaciones en el músculo esquelético comparables con el entrenamiento de resistencia tradicional. Tan poco como seis sesiones de HIIT durante 2 semanas, o un total de solo <15 min de ejercicio muy intenso, puede incrementar la capacidad oxidativa del músculo esquelético y mejorar el rendimiento durante actividades que dependen principalmente del metabolismo energético aeróbico. Estos hallazgos no deberán ser interpretados para sugerir que el HIIT de volumen bajo aporta todos los beneficios que normalmente se asocian con el entrenamiento de resistencia tradicional. La duración de los programas de entrenamiento en los trabajos publicados a la fecha es relativamente corta (es decir, que duran unas cuantas semanas) y queda por determinar si adaptaciones similares se manifiestan después de varios meses de intervalos de bajo volumen y entrenamiento continuo de alto volumen. Es posible que el tiempo para los ajustes fisiológicos difiera entre los protocolos de entrenamiento; la naturaleza intensa del entrenamiento interválico puede estimular cambios rápidos, mientras que las adaptaciones inducidas por el entrenamiento de resistencia tradicional pueden ocurrir más lentamente. Desde un punto de vista aplicado a la práctica, será importante para trabajos futuros el identificar la(s) combinación(es) óptima(s) necesarias de intensidad y volumen de entrenamiento para inducir adaptaciones de una forma eficiente en tiempo, dado que la falta de tiempo sigue siendo la barrera más comúnmente citada para la falta de participación regular en el ejercicio.

## REFERENCIAS

- Baar K. (2006). Training for endurance and strength: lessons from cell signaling. *Med. Sci. Sports Exerc.* 38:1939-1944.
- Bacon, A.P., R.E. Carter, E.A. Ogle, and M.J. Joyner (2013). VO<sub>2</sub>max trainability and high intensity interval training in humans: a meta-analysis. *PLoS One.* 8:e73182.
- Buchheit, M., and P.B. Laursen (2013a). High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle: part I: cardiopulmonary emphasis. *Sports Med.* 43:313-338.
- Buchheit, M., and P.B. Laursen (2013b). High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle: part II: anaerobic energy, neuromuscular load and practical applications. *Sports Med.* 43:927-954.
- Burgomaster, K.A., N. Cermak, S.M. Phillips, C. Benton, A. Bonen, and M.J. Gibala (2007). Divergent response of metabolite transport proteins in human skeletal muscle after sprint interval training and detraining. *Am. J. Physiol.* 292:R1970-R1976.
- Burgomaster, K.A., G.J.F. Heigenhauser, and M.J. Gibala (2006). Effect of short-term sprint interval training on human skeletal muscle carbohydrate metabolism during exercise and time trial performance. *J. Appl. Physiol.* 100:2041-2047.
- Burgomaster, K.A., K.R. Howarth, M. Rakobowchuk, S.M. Phillips, M.J. MacDonald, S. McGee, and M.J. Gibala (2008). Similar metabolic adaptations during exercise after low volume sprint interval and traditional endurance training in humans. *J. Physiol.* 586:151-160.
- Burgomaster, K.A., S.C. Hughes, G.J.F. Heigenhauser, S.N. Bradwell, and M.J. Gibala (2005). Six sessions of sprint interval training increases muscle oxidative potential and cycle endurance capacity. *J. Appl. Physiol.* 98:1895-1990.
- Cocks, M., C.S. Shaw, S.O. Shepherd, J.P. Fisher, A.M. Ranasinghe, T.A. Barker, K.D. Tipton, and A.J. Wagenmakers. (2013). Sprint interval and endurance training are equally effective in increasing muscle microvascular density and eNOS content in sedentary males. *J. Physiol.* 591:641-656.
- Coffey, V.G., and J.A. Hawley (2007). The molecular bases of training adaptation. *Sports Med.* 37:737-763.
- Gibala M.J., J.B. Gillen J.B., and M.E. Percival (2014). Physiological and health-related adaptations to low-volume interval training: influences of nutrition and sex. *Sports Med.* 44 Suppl 2:127-137.
- Gibala, M.J., J.P. Little, M. van Essen, G.P. Wilkin, K.A. Burgomaster, A. Safdar, S. Raha, and M.A. Tarnopolsky (2006). Short-term sprint interval versus traditional endurance training: similar initial adaptations in human skeletal muscle and exercise performance. *J. Physiol.* 575:901-911.
- Gibala, M.J., J.P. Little, M.J. MacDonald, and J.A. Hawley (2012). Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease. *J. Physiol.* 590:1077-1084.
- Gibala, M.J., S.L. McGee, A. Garnham, K. Howlett, R. Snow, and M. Hargreaves M (2009). Brief intense interval exercise activates AMPK and p38 MAPK signaling and increases the expression of PGC-1 $\alpha$  in human skeletal muscle. *J. Appl. Physiol.* 106:929-934.
- Kessler H.S., S.B. Sisson, and K.R. Short (2012). The potential for high-intensity interval training to reduce cardiometabolic disease risk. *Sports Med.* 42:489-509.
- Kubukeli, Z.N., T.D. Noakes, and S.C. Dennis (2002). Training techniques to improve endurance exercise performances. *Sports Med.* 32:489-509.
- Laursen, P.B., and D.G. Jenkins (2002). The scientific basis for high-intensity interval training: optimising training programmes and maximising performance in highly trained endurance athletes. *Sports Med.* 32:53-73.
- Little, J.P., A. Safdar, D. Bishop, M.A. Tarnopolsky, and M.J. Gibala (2011). An acute bout of high-intensity interval training increases the nuclear abundance of PGC-1 $\alpha$  and activates mitochondrial biogenesis in human skeletal muscle. *Am. J. Physiol.* 300:R1303-1310.
- Little, J.P., A.S. Safdar, G.P. Wilkin, M.A. Tarnopolsky, and M.J. Gibala (2010). A practical model of low-volume high-intensity interval training induces mitochondrial biogenesis in human skeletal muscle: potential mechanisms. *J. Physiol.* 586:1011-1022.
- MacDougall, J.D., A.L. Hicks, J.R. MacDonald, R.S. McKelvie, H.J. Green, and K.M. Smith (1998). Muscle performance and enzymatic adaptations to sprint interval training. *J. Appl. Physiol.* 84:2138-2142.
- Matsuo, T., K. Saotome, S. Seino, N. Shimojo, A. Matsushita, M. Iemitsu, H. Ohshima, K. Tanaka, and C. Mukai C. (2014). Effects of a low-volume aerobic-type interval exercise on VO<sub>2</sub>max and cardiac mass. *Med. Sci. Sports Exerc.* 46:42-50.
- Parolin, M.L., A. Chesley, M.P. Matsos, L.L. Spriet, N.L. Jones, and G.J.F. Heigenhauser (1999). Regulation of skeletal muscle glycogen phosphorylase and PDH during maximal intermittent exercise. *Am. J. Physiol.* 277:E890-900.
- Perry, C.G., J. Lally, G.P. Holloway, G.J. Heigenhauser, A. Bonen, and L.L. Spriet LL (2010). Repeated transient mRNA bursts precede increases in transcriptional and mitochondrial proteins during training in human skeletal muscle. *J. Physiol.* 588:4795-4810.
- Rakobowchuk, M. S. Tanguay, K.A. Burgomaster, K.R. Howarth, M.J. Gibala, and M.J. MacDonald. Sprint interval and traditional endurance training induce similar improvements in peripheral arterial stiffness and flow-mediated dilation in healthy humans. *Am. J. Physiol.* 295:R236-R242, 2008.
- Ross A., and M. Leveritt (2001). Long-term metabolic and skeletal muscle adaptations to short-sprint training: implications for sprint training and tapering. *Sports Med.* 31:1063-1082.
- Saltin, B., and P.D. Gollnick (1983). Skeletal muscle adaptability: significance for metabolism and performance. In L.D. Peachey (ed.) *Handbook of Physiology. Skeletal Muscle.* pp. 555-631, American Physiological Society, Bethesda.
- Talanian, J.L., S.D. Galloway, G.J.F. Heigenhauser, A. Bonen, and L.L. Spriet (2007). Two weeks of high-intensity aerobic interval training increases the capacity for fat oxidation during exercise in women. *J. Appl. Physiol.* 102:1439-1447.
- Weston, K.S., U. Wisloff, and J.S. Coombes. High-intensity interval training in patients with lifestyle-induced cardiometabolic disease: a systematic review and meta-analysis. *Br. J. Sports Med.* 48:1227-1234, 2014.
- Whyte, L.J., J.M. Gill, and A.J. Cathcart (2010). Effect of 2 weeks of sprint interval training on health-related outcomes in sedentary overweight/obese men. *Metabolism.* 59:1421-1428.

## TRADUCCIÓN

Este artículo ha sido traducido y adaptado de: Gibala M. (2015). Physiological Adaptations To Low-Volume High-Intensity Interval Training. *Sports Science Exchange* 139, Vol. 28, No. 139, 1-6, por el Dr. Samuel Alberto García Castrejón.