

Balsalobre-Fernández, C.; Tejero-González; C.M.; del Campo-Vecino, J. y Alonso-Curiel, D. (2014). La exposición hipóxica como medio para aumentar el rendimiento deportivo: ¿mito o realidad? / Hypoxic exposure as a means of increasing sporting performance: fact or fiction? Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte vol. 14 (53) pp. 183-198. <http://cdeporte.rediris.es/revista/revista53/artexposicion426.htm>

## REVISIÓN / REVIEW

### LA EXPOSICIÓN HIPÓXICA COMO MEDIO PARA AUMENTAR EL RENDIMIENTO DEPORTIVO: ¿MITO O REALIDAD?

### HYPOXIC EXPOSURE AS A MEANS OF INCREASING SPORTING PERFORMANCE: FACT OR FICTION?

Balsalobre-Fernández, C.<sup>1</sup>; Tejero-González; C.M.<sup>2</sup>; del Campo-Vecino, J.<sup>3</sup> y Alonso-Curiel, D.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Entrenador personal certificado por la National Strength and Conditioning Association. Becario del Departamento de Educación Física, Deporte y Motricidad Humana, Universidad Autónoma de Madrid ([carlos.balsalobrefernandez@uam.es](mailto:carlos.balsalobrefernandez@uam.es))

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Madrid. Departamento de Educación Física, Deporte y Motricidad Humana. Entrenador Nacional de Atletismo ([www.uam.es/carlos.tejero](http://www.uam.es/carlos.tejero); [carlos.tejero@uam.es](mailto:carlos.tejero@uam.es)).

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Madrid. Departamento de Educación Física, Deporte y Motricidad Humana. Entrenador Nacional de Atletismo, Centro de Alto Rendimiento Joaquín Blume ([juan.delcampo@uam.es](mailto:juan.delcampo@uam.es))

<sup>4</sup>Universidad Autónoma de Madrid. Departamento de Educación Física, Deporte y Motricidad Humana. Entrenador Nacional de Atletismo, Centro de Alto Rendimiento Joaquín Blume ([dionisio.alonso@uam.es](mailto:dionisio.alonso@uam.es))

**Clasificación de la UNESCO / UNESCO classification:** 3299 Otras especialidades médicas (Fisiología del ejercicio) / Other medical specialities (Exercise physiology)

**Clasificación del Consejo de Europa / European Council classification:** 6 Fisiología del ejercicio / Exercise physiology.

**Recibido** 8 de septiembre de 2011 **Received** September 8, 2011

**Aceptado** 6 de febrero de 2012 **Accepted** February 6, 2012

## RESUMEN

Las crecientes exigencias del deporte de élite han propiciado la continua investigación de diversos métodos para aumentar el rendimiento deportivo de los deportistas. Uno de los que más se ha hablado en los últimos años, especialmente en los deportes de resistencia, es el entrenamiento en altitud o *exposición hipóxica*. No obstante, a pesar de la popularidad que ha cobrado entre atletas y entrenadores de todo el mundo, existe una gran controversia

sobre sus supuestas bondades. De esta forma, el objetivo de esta revisión es tratar de clarificar el papel de la exposición hipóxica en el aumento del rendimiento deportivo, analizando las distintas metodologías, herramientas e investigaciones al respecto. Se concluye que la exposición hipóxica carece en la actualidad de suficientes evidencias científicas que validen su efectividad, pues los resultados de la literatura son contradictorios.

**PALABRAS CLAVE:** entrenamiento físico y acondicionamiento, anoxemia, altitud.

## ABSTRACT

The increasing demands of elite sports have led to continuing research into various methods for improving the sporting performance of their participants. One of the most widely discussed in the past few years, especially in the field of endurance sports, is altitude training, or *hypoxic exposure*. However, despite its increasing popularity amongst athletes and coaches worldwide, a great deal of controversy remains regarding its supposed benefits. As such, the aim of this review was to attempt to clarify the role of hypoxic exposure on improved sporting performance by analysing the various methodologies, tools and research available. The key conclusion is that hypoxic exposure currently lacks sufficient scientific evidence to validate its efficacy as literature results tend to be contradictory.

**KEYWORDS:** physical training and conditioning, anoxaemia, altitude.

## INTRODUCCIÓN

Las crecientes exigencias de rendimiento en el deporte de alta competición han fomentado el desarrollo de múltiples métodos, modelos y herramientas con el fin de optimizar el estado de forma de deportistas de especialidades muy diversas. Concretamente, en el área de las disciplinas de resistencia, los parámetros fisiológicos relacionados con el consumo máximo de oxígeno han sido ampliamente estudiados, pues se sabe que el éste es uno de los principales condicionantes del rendimiento deportivo (Earle y Baechle, 2007; López, 2008). Así, desde hace varias décadas se han venido investigando diferentes métodos para aumentar el  $VO_2Máx$  de los deportistas de fondo, especialmente en el atletismo y el ciclismo (Billat, 2002; López, 2008).

Fue a finales de la década de los 60 del pasado siglo XX, con la celebración de los Juegos Olímpicos en México en 1968, cuando atletas, entrenadores y demás personas involucradas en el sistema deportivo comenzaron a preocuparse por la preparación de los deportistas en las zonas geográficamente altas del país anfitrión, con la intención de alcanzar el máximo rendimiento (Wilber, 2001). En estas circunstancias, el entrenamiento en altitud

comenzó a tomar protagonismo en el deporte de élite y la comunidad científica se dedicó a analizar los efectos de la *hipoxia* sobre el organismo de los atletas, siendo los parámetros sanguíneos, como la concentración de glóbulos rojos, su principal objeto de estudio (Levine y Stray-Gundersen, 2005; Vogt y Hoppeler, 2010).

Los posibles efectos que tiene el entrenamiento en altitud sobre distintas variables relacionadas con el rendimiento deportivo, especialmente con el sistema de aporte de oxígeno, han sido estudiados y utilizados profusamente por investigadores y deportistas (Wilber, 2001; Billat, 2002; Gore, Clark y Saunders, 2007; López, 2008; Vogt y Hoppeler, 2010).

Tradicionalmente, los deportistas hacían estancias completas en altitud en las cuales convivían y entrenaban. No obstante, en la década de los 90 surgió una nueva metodología de entrenamiento en altitud, denominada “living high-training low”, o simplemente “high-low”, que propone que los deportistas vivan en altitud pero que entrenen en condiciones normales. Este método de entrenamiento en altitud defiende que — pese a que vivir en altitud parece aumentar la producción de eritropoyetina (EPO), hematocrito y hemoglobina—, entrenar a dichos niveles hipobáricos no aumenta el rendimiento del deportista, ya que la baja presión parcial de oxígeno en el ambiente ( $FiO_2$ ) no permite alcanzar una intensidad de entrenamiento suficiente como para conseguir las adaptaciones deseadas (Levine y Stray-Gundersen, 2005; Wilber, 2001). Además, según Billat (2002), el entrenamiento en altitud debería ser, al menos, un 10% menos intenso que a nivel del mar, ya que, de lo contrario, podría aparecer el síndrome de sobreentrenamiento. Tanto es así, que Terrados, Mizuno y Andersen (1985) demostraron que el consumo de oxígeno en cicloergómetro se reduce de forma significativa en deportistas de élite a partir de 900 metros de altitud. Así, parece bastante aceptado por la comunidad científica que las estancias prolongadas en altitud disminuyen el rendimiento deportivo (Billat, 2002; Earle y Baechle, 2007). Por lo tanto, el paradigma de entrenamiento “high-low” ha sido propuesto como un medio más efectivo para aumentar el rendimiento de los deportistas (Wilber, 2001).

Por ejemplo, Levine y Stray-Gundersen (1997) fueron los primeros en realizar un estudio sobre la metodología “high-low”. En dicho estudio, 26 deportistas, 13 hombres y 13 mujeres, se dividieron en dos grupos de entrenamiento diferentes, uno basado en el método “living high-training low”, en el cual los sujetos vivían a 2500 metros y entrenaban a 1250 metros, y otro grupo de control en el que vivían y entrenaban a nivel del mar. Tres días después de terminar las 4 semanas en las que consistió el entrenamiento, el grupo “high-low” presentó un incremento del 5% del hematocrito y del 9% de hemoglobina ( $p < 0.05$ ), mientras que el grupo control no tuvo mejoras significativas. Además, el grupo de entrenamiento mostró un incremento significativo del  $VO_2Máx$  y un mejor rendimiento en la carrera de 5 km, hasta 3 semanas después del entrenamiento en altitud. Lo cual muestra la considerable estabilidad de los beneficios del entrenamiento “high-low”.

Sin embargo, las estancias y los desplazamientos sistemáticos que conlleva esta metodología de entrenamiento son costosos. Por ello, este hecho, unido al avance de la tecnología, ha fomentado el desarrollo de diversos métodos que buscan simular condiciones de altitud en condiciones normobáricas, siendo quizá las cámaras hipobáricas las más conocidas. Así, estos dispositivos de altitud simulada facilitan el acceso a condiciones de hipoxia sin desplazamientos continuos y estancias fuera del lugar de residencia habitual, pudiendo incluso los deportistas contar con uno en su propio domicilio.

De este modo, las facilidades que ofrecen las cámaras y habitaciones hipobáricas han permitido la utilización de una metodología de entrenamiento: la exposición intermitente a la hipoxia (EIH), que antaño era muy difícil de realizar por problemas logísticos. La EIH se basa en que la concentración sanguínea de EPO se eleva tras una hipoxia de 90 a 120 minutos (Wilber, 2001; López, 2008), por lo que exposiciones diarias de 1.5-2 horas podrían producir las adaptaciones buscadas. La EIH tiene dos modalidades: en reposo y durante el entrenamiento. La exposición intermitente a la hipoxia en reposo (EIHR) se fundamenta en que la hipoxia se produzca en condiciones de reposo, independientemente del entrenamiento en condiciones normales que se realice; mientras que en la exposición intermitente a la hipoxia durante el entrenamiento (EIHE), la hipoxia se produce mientras el deportista está entrenándose, algo que, como ya se ha comentado, no parece producir adaptaciones debido a la escasa calidad del entrenamiento que se puede realizar en estas condiciones. Estos métodos resultan controvertidos, existiendo estudios que muestran sus beneficios (Bonetti, Hopkins, Lowe y Kilding, 2009; Burtscher, Gatterer, Faulhaber, Gerstgrasser y Schenk 2010; Frese y Friedmann-Bette, 2010), pero también otros que no muestran ninguna mejora significativa en ningún parámetro relevante (Feriche et al., 2007; Beidleman et al., 2009; Faulhaber, Gatterer, Haider, Patterson y Burtscher, 2010; Hamlin, Marshall, Hellemans y Ainslie, 2010).

A pesar de las controversias que genera, en la actualidad la exposición hipóxica constituye un elemento muy utilizado en el entrenamiento deportivo, y pese a que tradicionalmente ha sido propuesto como un buen medio para aumentar el rendimiento aeróbico (Wilber, 2001), cada vez hay más estudios que analizan sus aplicaciones en muchas otras variables, como la fuerza (Nishimura et al., 2010), el perfil lipídico (Minvaleev, 2011), la composición corporal en obesos (Wiesner et al., 2010), la rigidez arterial en menopáusicas (Nishiwaki et al., 2011), los antioxidantes (Pialoux et al. 2009a; Pialoux et al. 2009b; Pialoux et al., 2010), o el mal de altura en aviadores (Debevec et al., 2010; Moniaga y Griswold, 2009). Por si fuera poco, el interés por la exposición hipóxica también ha dado lugar a investigaciones con animales (Wenjun, Xudong, Xiaogang, Zheng y Zhenxi, 2010; Martinez-Bello et al., 2011). No obstante, a pesar del entusiasmo por el entrenamiento en condiciones de hipoxia, todavía estamos lejos de poder afirmar sin matices que la exposición hipóxica, sea del tipo que sea, es beneficiosa para el rendimiento deportivo.

Por ello, el objetivo de este artículo es intentar esclarecer si la exposición hipóxica mejora o no el rendimiento deportivo. Se hará con una orientación científica y a la vez didáctica, a partir de las investigaciones más recientes y relevantes al respecto. Para tal fin, se han establecido dos objetivos específicos: el primero, describir los principales simuladores de altitud citados en la literatura científica; y el segundo, presentar el estado de la cuestión.

## MÉTODO

Se ha realizado una revisión bibliográfica de las bases de datos SPORTDiscus y MedLine en septiembre de 2011, tratando de ofrecer una síntesis de la utilización de la exposición hipóxica en el entrenamiento de la resistencia cardiovascular, utilizando las siguientes palabras clave: *hypoxic training*, *hypobaric chamber*, *normobaric hypoxia* e *intermittent hypoxia*, cruzando los resultados con *training*, *exercise* y *adaptation (physiology)*. No se establecieron límites por año de publicación en la búsqueda, y los criterios de elección para la inclusión de los artículos en esta revisión fueron los siguientes:

- Que el artículo tratara sobre el área de conocimiento de las ciencias de la actividad física y del deporte.
- Que el artículo estuviera en el top 20 según la clasificación de relevancia en EbscoHost.

De esta forma, hemos recopilado algunos de los resultados más relevantes de las tres últimas décadas sobre exposición hipóxica. Si hubiésemos sido más específicos (por ejemplo, interesándonos sólo en los estudios sobre exposición hipóxica intermitente que muestran efectos beneficiosos en los deportistas) habríamos perdido el carácter global y recopilatorio de esta revisión. Además, la elección tomando como referencia la clasificación de relevancia nos ha permitido seleccionar varios de los artículos más reconocidos de entre una lista de cientos y cientos de referencias, las cuales, dadas las limitaciones de extensión de este trabajo, no podían incluirse en la presente revisión.

Por último, también se han revisado algunas de las páginas webs de las empresas más relevantes de la industria del entrenamiento en hipoxia, como CAT, Biolaster, Go2Altitud o Altitrainer, para poder ofrecer información actualizada sobre los instrumentales utilizados actualmente.

## RESULTADOS

### Principales instrumentales simuladores de altitud

#### *Habitaciones hipobáricas mediante nitrógeno diluido*

Estos apartamentos, creados en Finlandia al principio de década de los 90 del siglo XX, simulan una condición hipóxica de aproximadamente 2000 a 3000 metros de altitud, pero manteniendo una presión atmosférica similar a la del nivel del mar ( $\approx 760$  mm Hg), de ahí que se denominen también *apartamentos de hipoxia normobárica* (Wilber, 2001).

Para conseguirlo, se introduce en la habitación gas comprimido al 100% de  $N_2$  a través de unos sistemas de ventilación (en condiciones normales, el aire ambiental posee aproximadamente un 20.9% de  $O_2$  y un 78% de  $N_2$ ), con lo que se consigue reducir el porcentaje de oxígeno a un 15%, logrando la condición de hipoxia deseada.

#### *Cámaras hipobáricas*

Las cámaras hipobáricas simulan condiciones hipobáricas de hasta 6.000 metros de altitud. Funcionan gracias a un dispositivo que extrae y filtra el  $O_2$  del aire de la cámara, y que posteriormente introduce de nuevo con la presión parcial de oxígeno reducida al nivel que se desee. También se denominan dispositivos hipóxicos para dormir, dada su facilidad de montaje, sin necesidad de obra alguna, y sus reducidas dimensiones.

#### *Dispositivos inhaladores*

Estos modernos dispositivos dan un paso más, y permiten la inhalación de aire con bajo porcentaje de oxígeno, según la altura que se desee simular, en cualquier lugar y sin instalaciones. Gracias a ello, el deportista podrá exponerse a la hipoxia en su propio domicilio, ya sea sentado en el sofá o ejercitándose en su ergómetro.

### Estado de la cuestión: la controversia de la hipoxia

Son muchos los estudios realizados sobre la eficacia del entrenamiento en condiciones de exposición hipóxica (Wilber, 2001; Böning, 2002; Gore, Clark & Saunders, 2007; Bonetti & Hopkins, 2009). Hasta la fecha, se han utilizado protocolos high-low (Levine & Stray-Gundersen, 1997; Levine & Stray-Gundersen, 2005), low-high (Mori et al, 1996; Katayama, Sato, Ishida, Mori & Miyamura, 1998; Meeuwsen et al., 2001; Hendricksen & Meeuwsen, 2003), e incluso mixtos (Millets, Roels, Schmitt, Woorons & Richalet, 2010; (Robertson, Saunders, Pyne, Gore, & Anson, 2010). Si bien, actualmente, la mayoría de estudios utilizan la exposición hipóxica intermitente en reposo (Beidleman et al., 2008, citado en Faria, 2009;).

No obstante, a pesar de la popularidad que ha cobrado el entrenamiento en altitud (real o simulada), lo cierto es que la disparidad en los resultados hace muy difícil el consenso en cuanto a las metodologías a utilizar con los deportistas. Así, aunque hay autores que sostienen que la hipoxia durante el ejercicio es perjudicial para el rendimiento (Terrados, Mizuno y Andersen, 1985; Billat, 2002; Levine y Stray-Gundersen, 2005), también existen estudios en los que tras protocolos similares se muestran resultados favorables (Terrados, Melichna, Sylven, Jansson y Kaijser, 1988; Katayama et al., 1998; Hendriksen y Meeuwsen, 2003).

Así, Meeuwsen, Hendriksen y Holwjin (2001) realizaron un estudio con un grupo experimental y un grupo control, en el que 8 triatletas de élite entrenaron 2 horas diarias en un cicloergómetro situado en una cámara hipobárica simulando 2.500 metros de altitud, mientras que otros 8 realizaron el mismo entrenamiento al nivel del mar. Después de 10 días de entrenamiento en hipoxia, el grupo experimental aumentó significativamente su  $VO_{2max}$  en un 7%, así como la potencia media, la potencia total desarrollada y el pico de potencia en el Test Anaeróbico de Wingate. Según estos datos, el entrenamiento en hipoxia produce beneficios tanto en los sistemas aeróbico y anaeróbico. Estas mejorías en el rendimiento anaeróbico han sido observadas por otros autores (Aughey et al., 2005)

Sin embargo, como ya hemos comentado, en los últimos años la exposición hipóxica intermitente en reposo es la que más se ha investigado (Rodríguez et al., 1999; Casas et al. 2000; Villa et al, 2005; Hamlin y Hellemans, 2007; Bonetti et al., 2009; Burtscher et al., 2010; Brugniaux et al., 2011), encontrándose resultados dispares. Por un lado, algunos autores han concluido que la hipoxia intermitente en reposo mejora el rendimiento de los deportistas y ciertas variables sanguíneas, como la eritropoyesis (Bonetti, et al., 2009; Burtscher, et al., 2010; Frese & Friedmann-Bette, 2010). Por ejemplo, el estudio de Burtscher et al. (2010) muestra cómo después de 5 semanas de exposición hipóxica durante 2 horas, 3 veces a la semana, la economía de carrera de corredores y corredoras de mediofondo mejoró significativamente. Esto quiere decir que los deportistas disminuyeron su consumo máximo de oxígeno a una intensidad submáxima dada. Por su parte, Bonetti et al. (2009) demostraron que 60 minutos de hipoxia intermitente (3 minutos de exposición alternados con otros de normoxia) mejora el rendimiento de ciclistas y triatletas en un test específico en cicloergómetro, aunque dichos incrementos volvían al valor inicial en menos de 14 días.

Por otro lado, son muchos los autores que no han encontrado resultados beneficiosos en sus estudios tras un periodo de exposición hipóxica intermitente (Beidleman, et al., 2009; Faulhaber, et al., 2010; Feriche, et al., 2007; Hamlin, et al., 2010). Por ejemplo, Trujiens et al. (2008), no obtuvieron mejoras significativas tras un programa de exposición intermitente a la hipoxia en reposo en su investigación. En su estudio se dividió 23 participantes en dos grupos equivalentes, uno experimental, en el que sus integrantes descansaron

en una cámara hipobárica simulando de 4.000 a 5.000 metros de altitud, y otro control, en el que los participantes descansaron en la misma cámara, pero a nivel del mar, a modo de placebo, dado que el estudio se realizó a doble ciego. Estos periodos de descanso duraban 3 horas diarias para ambos grupos, 5 días a la semana durante un mes. Además, cada participante siguió realizando su entrenamiento con normalidad, siendo mínimas las diferencias del mismo entre los sujetos, pues todos tenían el mismo nivel de rendimiento, e incluso entrenaban en el mismo club o con el mismo entrenador. Así, después de las 4 semanas de exposición intermitente a la hipoxia, el grupo experimental no mostró ninguna mejora significativa en la economía submáxima de trabajo, medida por la frecuencia cardíaca, la concentración de ácido láctico en sangre, la ventilación y la velocidad aeróbica máxima.

En otro estudio de doble ciego, Faulhaber et al. (2010) no encontraron diferencias significativas en una prueba de contrarreloj entre dos grupos de ciclistas (uno experimental y otro control) tras 7 sesiones de exposición hipóxica intermitente, de una hora de duración cada sesión, a una altitud simulada de 4500 metros. Resultados muy similares encontraron Hamlin et al. (2010), con población ciclista. Muchos otros estudios no han observado mejorías en los deportistas tras diversos protocolos de exposición hipóxica intermitente (Hoppeler, Vogt, Weibel & Flück, 2003; Aughey et al., 2005; Hinckson, Hopkins, Downey & Smith ; Rodríguez et al., 2007).

En definitiva, como puede apreciarse en Tabla 1, no existe aún un consenso en la comunidad científica sobre la idoneidad de la exposición hipóxica como medio para aumentar el rendimiento de los deportistas.

**Tabla 1.** Recopilación de algunos estudios favorables y desfavorables sobre las bondades de la exposición a la hipoxia.

Mejora del rendimiento deportivo tras exposición hipóxica				
	Estudio	Población	Programa EH	Resultados*
Estudios Favorables	Katayama et al. (1998)	13 adultos sanos	4.500m. simulados, 6 días	Mejoras en la respuesta ventilatoria
	Meeuwssen et al. (2001)	16 atletas varones de élite	2.500m. simulados, 10 días	Mejoras en pruebas aeróbicas y anaeróbicas
	Hendriksen y Meeuwssen (2003)	16 atletas varones de élite	2.500m. simulados, 10 días	Mejoras en pruebas aeróbicas y anaeróbicas
	Beidleman et al (2008), en Faria (2009)	10 adultos sanos	4.300m. simulados, 7 días no consecutivos	Mejoras en el tiempo en realizar una prueba en cicloergómetro,
	Hamlin y Hellemans (2007)	22 deportistas de distintas modalidades	8% de O <sub>2</sub> en aire inspirado en cámara, 5	Mejoras en el tiempo en correr 3km, y aumento

		días/semana, 3 semanas	de los reticulocitos
Terrados et al. (1988)	8 ciclistas competitivos	2.300m. simulados, 4 días/semana, 4 semanas	Reducciones en la concentración de lactato, aumentos en la capilaridad, disminución de enzimas anaeróbicas
Casas et al. (2000)	23 Montañistas de élite	4.000-5.500m simulados, 9-17 sesiones	Aumento de hemoglobina, glóbulos rojos y reticulocitos
Rodríguez et al. (1999)	17 montañistas de élite	4.000-5.000m simulados, 9 sesiones	Aumento del tiempo de ejercicio en prueba de esfuerzo máximo, de hemoglobina, reticulocitos y glóbulos rojos
Villa et al. (2005)	6 ciclistas de élite	4.000m simulados, 3 semanas seguidas	Aumento de la EPO
Frese y Friedmann-Bette (2010)	8 corredores de élite	2.000m reales, más de 3 semanas seguidas	Aumento de la EPO
Burschter et al. (2010)	11 mediofondistas	15% de oxígeno en aire inhalado, 10 semanas, 3 veces/semana	Aumento de la economía de carrera y del tiempo total de ejercicio en test máximo
Mori et al. (1996)	6 montañistas	4.000-6.000m simulados, 3 semanas, 2 sesiones/semana	Aumento de la producción de potencia en cicloergómetro, disminución de la producción de lactato
Estudios No Favorables			No hubo cambios en la economía de carrera, la frecuencia cardíaca ni la velocidad aeróbica máxima
Trujiens et al. (2008)	13 nadadores, 10 corredores	4.000-5.500m. simulados, 4 semanas, 5 días/semana	No hubo mejoras en el VO <sub>2</sub> Máx, la frecuencia cardíaca ni en el
Rodríguez et al. (2007)	13 nadadores, 10 corredores	4.000-5.500m. simulados, 4 semanas, 5 días/semana	

			rendimiento en el test de carrera
Hinckson et al. (2006)	7 remeros de élite	Saturación de oxígeno del 90 al 80%, 3 semanas, todos los días	No hubo mejoras significativas en el tiempo en recorrer 5km ni en la potencia generada en 500m
Aughey et al. (2005)	13 atletas	3.000m simulados, 23 días seguidos	Se redujo el consumo de oxígeno pico
Hamlin et al. (2010)	9 atletas de élite	Saturación de O <sub>2</sub> al 80%, 10 sesiones	No hubo mejoras significativas en una prueba de 20km. en cicloergómetro
Faulhaber et al. (2010)	11 ciclistas	4.500m simulados, 7 sesiones	Se redujo la potencia media en una prueba en cicloergómetro
Beidleman et al. (2009)	17 adultos sanos	4.300m simulados, 7 sesiones	No hubo mejoras en ninguna variable de una prueba en cicloergómetro

\*Todas las mejoras que se señalan son estadísticamente significativas, a niveles .05 o .001 según el estudio.

Además, de entre los estudios favorables a la exposición hipóxica como medio de mejora del entrenamiento, hay algunos (Mounier et al., 2009; Hamlin, et al., 2010) que, pese a mostrar incrementos significativos en diversos marcadores sanguíneos, no han probado que eso se correspondiera con aumentos en el rendimiento deportivo, lo cual es el principal objetivo del entrenamiento.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Como se ha podido comprobar a lo largo del presente artículo, aún se tiene que avanzar mucho en el conocimiento científico para poder establecer con rotundidad protocolos de exposición hipóxica que mejoren el rendimiento de los deportistas. De momento, existe una gran controversia en torno a la hipoxia como medio para incrementar las capacidades físicas de los atletas, a pesar de que en los últimos años el entrenamiento en altitud haya cobrado popularidad entre atletas y entrenadores de todo el mundo.

No obstante, hay ciertas características comunes en los estudios que muestran efectos favorables de la exposición hipóxica intermitente sobre el rendimiento de los atletas. Si bien tienen un carácter muy general, pueden

servir de orientación para que el lector o lectora se haga una idea de los posibles protocolos que pueden resultar útiles en el entrenamiento. Los elementos comunes son los siguientes (Beidleman et al (2008), en Faria (2009) ; Bonetti et al., 2009; Burschter et al., 2010; Casas et al., 2000; Frese y Friedmann-Bette (2010) ; Hamlin y Hellemans (2007) ; Hamlin y Hellemans (2007) ; Katayama et al., 1998 ; Meeuwssen et al. (2001) ; Rodríguez et al. 1999 ; Terrados et al. (1988) ; Villa et al. (2005):

- Respecto a la altitud. Los estudios comprenden altitudes de entre poco menos de 2000 y los 5500-6.000 metros.
- Respecto al número de sesiones recibidas. Los estudios comprenden periodos de tratamiento de entre 6 días y 4 semanas.
- Respecto a la frecuencia semanal de exposición. Los estudios hablan de al menos 4 ó 5 sesiones a la semana
- Respecto a la duración de cada sesión. Los estudios comprenden duraciones entre 20 minutos y 5 horas, siendo la moda 2 horas, la media 2h15 min. y la desviación típica 1h26 min.

Sin embargo, no todos los estudios cuyas variables se encuentran entre dichos parámetros obtuvieron resultados satisfactorios (Faulhaber, et al., 2010; Hamlin, et al., 2010). Es más, en un interesante metaanálisis, Bonetti y Hopkins (2009) concluyeron que la mejor metodología para aumentar el rendimiento deportivo de los deportistas de élite es la “living high- training low” en medio natural, es decir, sin la utilización de simuladores de altitud.

Estas grandes contradicciones entre los diversos resultados encontrados en investigaciones de todo el mundo pueden deberse a la variabilidad existente en los distintos trabajos publicados respecto a la frecuencia y duración de la exposición, la altitud simulada, el tipo de entrenamiento utilizado y las características de los participantes. Del mismo modo, en la mayoría de los estudios no se describe la intensidad ni el nivel de entrenamiento de los participantes (pues, a nuestro juicio, hablar de élite es demasiado impreciso). Además, como indican varios autores (Chapman, Stray-Gundersen y Levine, 1998; Chapman, Stray-Gundersen, & Levine, 2010), las adaptaciones a la hipoxia son individuales, existiendo, según su criterio, dos tipos de deportistas: los “responders” y los “non-responders”, es decir, aquellos a los que la hipoxia les ayuda a mejorar su rendimiento, y aquellos que no muestran respuestas favorables a estos estímulos, respectivamente.

Por ello, estamos todavía muy lejos del consenso en lo que respecta a las características del entrenamiento en altitud simulada, siendo necesario un profundo conocimiento del deportista y de sus respuestas a la hipoxia para decidir finalmente iniciar un programa de exposición o no. En este sentido, Lozano (2008), afirma que para poder obtener beneficios del entrenamiento

con hipoxia, se debe diseñar un programa individualizado a cada deportista, acorde a sus características y a sus respuestas fisiológicas. Así, la sesión de hipoxia debe ser considerada como una carga más a la que se somete al deportista y, por tanto, debe formar parte de la programación y la evaluación global de la carga de entrenamiento. El entrenador deberá estar muy atento a las reacciones del deportista ante las sesiones de hipoxia a la hora de programar el resto de las cargas de entrenamiento.

No obstante, las principales empresas del sector de los simuladores de altitud se muestran muy optimistas respecto a los beneficios de la utilización de sus dispositivos para la exposición a la hipoxia, ya sea durante el entrenamiento o en reposo. Por un lado, es lógico que estas empresas traten de avalar sus productos mediante algunos estudios científicos pues, como hemos visto, efectivamente existen autores que han encontrado resultados prometedores respecto a la altitud simulada y el rendimiento deportivo; sin embargo, la gran disparidad de los distintos resultados existentes en la literatura científica sobre los efectos de la hipoxia sobre el rendimiento no nos permite compartir su entusiasmo.

Por lo tanto, creemos que todavía queda un largo camino por recorrer en el conocimiento científico antes de poder establecer unos criterios uniformes para planificar entrenamientos con exposición a la hipoxia, pues, de momento, la elección de la altitud simulada, el tipo de exposición (LHTL, EHIR, etc.), la frecuencia, la duración, el tipo de entrenamiento realizado y demás parámetros relevantes son decisiones controvertidas. Así, en la actualidad, la exposición hipóxica es una variable que debe ser utilizada con cautela y sus resultados no están garantizados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aughey, R., Gore, C., Hahn, A., Garnham, A., Clark, S., Petersen, A., y ... McKenna, M. (2005). Chronic intermittent hypoxia and incremental cycling exercise independently depress muscle in vitro maximal Na<sup>+</sup>-K<sup>+</sup>-ATPase activity in well-trained athletes. *Journal of Applied Physiology* (Bethesda, Md.: 1985), 98(1), 186-192.
- Beidleman, B. A., Muza, S. R., Fulco, C. S., Jones, J. E., Lammi, E., Staab, J. E., y Cymerman, A. (2009). Intermittent Hypoxic Exposure Does Not Improve Endurance Performance at Altitude. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41(6), 1317-1325.
- Billat, V. (2002). Entorno físico y rendimiento deportivo: Temperatura y altitud. En Billat, V. (2002), *Fisiología y metodología del entrenamiento* (pp.117-127). Barcelona: Paidotribo.
- Bonetti, D. L., Hopkins, W. G., Lowe, T. E. y Kilding, A. E. (2009). Cycling Performance Following Adaptation to Two Protocols of Acutely Intermittent Hypoxia. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 4(1), 68-83.

- Bonetti, D. y Hopkins, W. (2009). Sea-Level Exercise Performance Following Adaptation to Hypoxia: A Meta-Analysis. *Sports Medicine*, 39(2), 107-127.
- Böning, D. (2002). Altitude and hypoxia training - effects on performance capacity and physiological functions at sea level. *Medicina Sportiva Polonica*, 6(1), E7-e17.
- Brugniaux, J. V., Pialoux, V., Foster, G. E., Duggan, C. T. C., Eliasziw, M., Hanly, P. J. y Poulin, M. J. (2011). Effects of intermittent hypoxia on erythropoietin, soluble erythropoietin receptor and ventilation in humans. *The European Respiratory Journal: Official Journal of The European Society For Clinical Respiratory Physiology*, 37(4), 880-887.
- Burtscher, M., Gatterer, H., Faulhaber, M., Gerstgrasser, W. y Schenk, K. (2010). Effects of Intermittent Hypoxia on Running Economy. *International Journal of Sports Medicine*, 31(9), 644-650.
- Casas, H. H., Casas, M. M., Ricart, A. A., Rama, R. R., Ibanez, J. J., Palacios, L. L. y ... Pages, T. T. (2000). Effectiveness of three short intermittent hypobaric hypoxia protocols: hematological responses. *Journal of Exercise Physiology Online*, 3(2).
- Chapman, R. F., Stray-Gundersen, J. y Levine, B. D. (2010). Epo production at altitude in elite endurance athletes is not associated with the sea level hypoxic ventilatory response. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 13(6), 624-629.
- Chapman, R., Stray-Gundersen, J. y Levine, B. (1998). Individual variation in response to altitude training. *Journal of Applied Physiology*, 85(4), 1448-1456.
- Debevec, T., Amon, M., Keramidas, M. E., Kounalakis, S. N., Pisot, R. y Mekjavic, I. B. (2010). Normoxic and Hypoxic Performance Following 4 Weeks of Normobaric Hypoxic Training. *Aviation, Space & Environmental Medicine*, 81(4), 387-393.
- Earle, R. W. y Baechle, T. R. (2007). *Principios del Entrenamiento de la Fuerza y del Acondicionamiento Físico* (2 ed.). Madrid: Panamericana.
- Faria, E. (2009). Recent advances in specific training for cycling. *International Sport Medicine Journal*, 10(1), 16-32.
- Faulhaber, M., Gatterer, H., Haider, T., Patterson, C. y Burtscher, M. (2010). Intermittent hypoxia does not affect endurance performance at moderate altitude in well-trained athletes. *Journal of Sports Sciences*, 28(5), 513-519.
- Ferliche, B. N., Delgado, M., Calderón, C., Lisbona, O., Chiroso, I. J., Miranda, M. T. y . . Álvarez, J. (2007). The effect of acute moderate hypoxia on accumulated oxygen deficit during intermittent exercise in nonacclimatized men. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 21(2), 413-418.
- Frese, F. y Friedmann-Bette, B. (2010). Effects of Repetitive Training at Low Altitude on Erythropoiesis in 400 and 800m Runners. *International Journal of Sports Medicine*, 31(6), 382-388.
- Gore, C., Clark, S. y Saunders, P. (2007). Nonhematological Mechanisms of Improved Sea-Level Performance after Hypoxic Exposure. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39(9), 1600-1609.

- Hamlin, M. J., Marshall, H. C., Hellemans, J. y Ainslie, P. N. (2010). Effect of intermittent hypoxia on muscle and cerebral oxygenation during a 20-km time trial in elite athletes: a preliminary report. *Applied Physiology, Nutrition & Metabolism*, 35(4), 548-559.
- Hamlin, M.J. y Hellemans, J. (2007). Effect of intermittent normobaric hypoxic exposure at rest on haematological, physiological, and performance parameters in multi-sport athletes. *Journal of Sports Science*, 25(4), 431-441.
- Heinicke, K., Prommer, N., Cajigal, J., Viola, T., Behn, C. y Schmidt, W. (2003). Long-term exposure to intermittent hypoxia results in increased hemoglobin mass, reduced plasma volume, and elevated erythropoietin plasma levels in man. *European Journal of Applied Physiology*, 88(6), 535-543.
- Hendriksen, I. y Meeuwssen, T. (2003). The effect of intermittent training in hypobaric hypoxia on sea-level exercise: a cross-over study in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 88(4/5), 396-403.
- Hinckson, E., Hopkins, W., Downey, B. y Smith, T. (2006). The effect of intermittent hypoxic training via a hypoxic inhaler on physiological and performance measures in rowers: a pilot study. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 9(1-2), 177-180.
- Hoppeler, H., Vogt, M., Weibel, E.R y Flück, M. (2003). Response of skeletal muscle mitochondria to hypoxia. *Experimental Physiology*, 88(1), 109-119.
- Katayama, K., Sato, Y., Ishida, K., Mori, S. y Miyamura, M. (1998). The effects of intermittent exposure to hypoxia during endurance exercise training on the ventilatory responses to hypoxia and hypercapnia in humans. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 78(3), 189-194.
- Levine, B. D. y Stray-Gundersen, J. (1997). Living high-training low: effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *Journal of Applied Physiology*, 83(1), 102-112.
- Levine, B. y Stray-Gundersen, J. (2005). Point: Positive effects of intermittent hypoxia (live high:train low) on exercise performance are mediated primarily by augmented red cell volume. *Journal of Applied Physiology*, 99(5), 2053-2055.
- López, J.A. (2008). Fisiología de la altitud y del ejercicio físico. En López, J. y Fernández, A., *Fisiología del Ejercicio* (pp.696-737). Madrid: Panamericana.
- Lozano, F. (2008, Febrero). Hypoxic stimulation in long distance runners. A necessity in high performance sport. *I Simposio Internacional de Entrenamiento en Altitud*, Granada, España.
- Martinez-Bello, V. E., Sanchis-Gomar, F., Nascimento, A. L., Pallardo, F. V., Ibañez-Sania, S., Olaso-Gonzalez, G. y . . . Viña, J. (2011). Living at high altitude in combination with sea-level sprint training increases hematological parameters but does not improve performance in rats. *European Journal of Applied Physiology*, 111(6), 1147-1156.

- Meeuwssen, T., Hendriksen, I. y Holewijn, M. (2001). Training-induced increases in sea-level performance are enhanced by acute intermittent hypobaric hypoxia. *European Journal of Applied Physiology*, 84(4).
- Millets, G., Roels, B., Schmitt, L., Woorons, X. y Richalet, J. (2010). Combining Hypoxic Methods for Peak Performance. *Sports Medicine*, 40(1), 1-25.
- Minvaleev, R. (2011). Comparison of the rates of changes in the lipid spectrum of human blood serum at moderate altitudes. *Human Physiology*, 37(3), 355-360.
- Moniaga, N. C. y Griswold, C. A. (2009). Loss of Consciousness and Seizure During Normobaric Hypoxia Training. *Aviation, Space & Environmental Medicine*, 80(5), 485-488.
- Mori, M., Kinugawa, T., Endo, A., Kato, M., Kato, T., Osaki, S. y ... Shigemasa, C. (1999). Effects of hypoxic exercise conditioning on work capacity, lactate, hypoxanthine and hormonal factors in men. *Clinical And Experimental Pharmacology & Physiology*, 26(4), 309-314.
- Mounier, R. m., Pialoux, V., Schmitt, L., Richalet, J.-P., Robach, P., Coudert, J. y . . . Fellmann, N. (2009). Effects of acute hypoxia tests on blood markers in high-level endurance athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 106(5), 713-720.
- Nishimura, A., Sugita, M., Kato, K., Fukuda, A., Sudo, A. y Uchida, A. (2010). Hypoxia Increases Muscle Hypertrophy Induced by Resistance Training. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 5(4), 497-508.
- Nishiwaki, M., Kawakami, R., Saito, K., Tamaki, H., Takekura, H. y Ogita, F. (2011). Vascular adaptations to hypobaric hypoxic training in postmenopausal women. *The Journal of Physiological Sciences: JPS*, 61(2), 83-91.
- Pialoux, V., Mounier, R., Rock, E., Mazur, A., Schmitt, L., Richalet, J. P. y . . . Fellmann, N. (2009). Effects of Acute Hypoxic Exposure on Prooxidant/Antioxidant Balance in Elite Endurance Athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 30(2), 87-93.
- Pialoux, V., Brugniaux, J. V., Rock, E., Mazur, A., Schmitt, L., Richalet, J.-P. y . . . Mounier, R. (2010). Antioxidant status of elite athletes remains impaired 2 weeks after a simulated altitude training camp. *European Journal of Nutrition*, 49(5), 285-292.
- Pialoux, V., Mounier, R., Brugniaux, J., Rock, E., Mazur, A., Richalet, J.-P. y . . . Fellmann, N. (2009). Thirteen days of "live high-train low" does not affect prooxidant/antioxidant balance in elite swimmers. *European Journal of Applied Physiology*, 106(4), 517-524.
- Robertson, E. Y., Saunders, P. U., Pyne, D. B., Gore, C. J. y Anson, J. M. (2010). Effectiveness of intermittent training in hypoxia combined with live high/train low. *European Journal of Applied Physiology*, 110(2), 379-387.
- Rodríguez, F., Casas, H., Casas, M., Pages, T., Rama, R., Ricart, A. Y ... Viscor, G. G. (1999). Intermittent hypobaric hypoxia stimulates erythropoiesis and improves aerobic capacity. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 31(2), 264-268.
- Rodríguez, F., Truijens, M., Townsend, N., Stray-Gundersen, J., Gore, C. y Levine, B. (2007). Performance of runners and swimmers after four

- weeks of intermittent hypobaric hypoxic exposure plus sea level training. *Journal of Applied Physiology*, 103(5), 1523-1535.
- Terrados, N., Melichna, J., Sylven, C., Jansson, E. y Kaijser, L. (1988). Effects of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*, 57(2), 203-209.
- Terrados, N., Mizuno, M. y Andersen, H. (1985). Efecto de altitudes moderadas (900, 1.200 y 1.500 m. sobre el nivel del mar) en el consumo máximo de oxígeno. *Apunts, Medicina de l'sport*, 86, 97-101.
- Truijens, M., Rodríguez, F., Townsend, N., Stray-Gundersen, J., Gore, C. y Levine, B. (2008). The effect of intermittent hypobaric hypoxic exposure and sea level training on submaximal economy in well-trained swimmers and runners. *Journal of Applied Physiology*, 104(2), 328-337.
- Villa, J., Lucía, A., Marroyo, J., Avila, C., Jiménez, F., García-López, J. y ... Cordova, A. (2005). Does Intermittent Hypoxia Increase Erythropoiesis in Professional Cyclists During a 3-Week Race? *Canadian Journal of Applied Physiology*, 30(1), 61-73.
- Vogt, M. y Hoppeler, H. (2010). Is hypoxia training good for muscles and exercise performance? *Progress in Cardiovascular Diseases*, 52(6), 525-533.
- Wenjun, R., Xudong, Y., Xiaogang, J., Zheng, L. y Zhenxi, Z. (2010). Chronic hypoxia and exercise training affect the NO content and NOS activity of rat skeletal muscle. *International Sport Med Journal*, 11(1), 244-257.
- Wiesner, S., Haufe, S., Engeli, S., Mutschler, H., Haas, U., Luft, F. C. y Jordan, J. (2010). Influences of Normobaric Hypoxia Training on Physical Fitness and Metabolic Risk Markers in Overweight to Obese Subjects. *Obesity* (19307381), 18(1), 116-120.
- Wilber, R. (2001). Current Trends in Altitude Training. *Sports Medicine*, 31(4), 249-265.

**Referencias totales / Total references: 52 (100%)**

**Referencias propias de la revista / References from the journal: 0 (0%)**