

# Efecto de un programa combinado de entrenamiento físico e hipoxia hipobárica intermitente en la mejora del rendimiento físico de triatletas de alto nivel

RODAS G.<sup>(1,2)</sup>, PARRA J.<sup>(1)</sup>, SITJÀ J.<sup>(1,3)</sup>, ARTEMAN J.<sup>(1)</sup> Y VISCOR G.<sup>(1,4)</sup>

(1) Excelent Center

(2) Dept. Mèdic.

Futbol Club Barcelona

(3) Consell Català de l'Esport

(4) Dept. Fisiologia. Facultat de Biologia. Universitat de Barcelona.

CORRESPONDENCIA:  
 Departament de Fisiologia,  
 Facultat de Biologia,  
 Universitat de Barcelona.  
 Av. Diagonal, 645  
 E-08028 Barcelona  
 E-mail: gviscor@ub.edu

APUNTS. MEDICINA DE L'ESPORT. 2004; 144: 5-10

**RESUMEN:** Este artículo presenta los resultados obtenidos por triatletas de alto nivel (participantes en el Ironman de Lanzarote'03) que fueron sometidos a un entrenamiento físico específico combinado de tres semanas de duración con una exposición intermitente a hipoxia hipobárica durante la primera y la tercera semana. El protocolo de la exposición a hipoxia hipobárica fue de dos ciclos de 6 sesiones por semana, con una sesión diaria de 3 horas de duración desde 4.000m (462 Torr; 616 hPa) hasta 5.500m (369 Torr; 492 hPa) de altitud simulada. Antes y después del protocolo estudiado, se realizaron sendas pruebas de valoración de rendimiento físico sobre cicloergómetro y los correspondientes perfiles hematopoyéticos. Los resultados muestran una ligera mejoría de los parámetros en la serie roja, así como incrementos en los indicadores de rendimiento físico: duración total de la prueba y velocidad máxima alcanzada (con incrementos del 6,5% y del 9% respectivamente).

Podemos concluir que un total de 36 horas de exposición junto a entrenamiento correctamente planificado resultan ser estímulo suficiente para inducir cambios en la eritropoyesis en triatletas de élite y que este tipo de protocolos breves de exposición intermitente a hipoxia pueden suplementar, junto a un entrenamiento cuidadosamente supervisado, un programa completo de mejora del rendimiento físico.

**PALABRAS CLAVE:** Triatlón, Hipoxia hipobárica, Cicloergómetro.

**SUMMARY:** This article presents the results obtained by tri-athletes of high level (participating in the Ironman of Lanzarote,03) who underwent a combined specific physical training of three weeks of duration with an intermittent exhibition to hipobarical hypoxia during the first and the third week. The protocol of the exposure to hypoxia hipobarical was of two cycles of 6 sessions a week, with a daily session of 3 hours of duration from 4.000 m (462 Torr; 616 hPa) at 5.500 m (369 Torr; 492 hPa) of simulated height. Before and after the studied protocol tests of physical performance appraisal was carried out about cicloergometer and the corresponding hematopoietics profiles. The results show a light improvement of the parameters in the red series as well as increases in the indicators of physical performance: total duration of the tetst and attained speed limit (with increases of the 6,5% and of the 9% respectively).

We can arrive at the conclusion that a total of 36 hours of exposure together with an increase correctly planned they work out a sufficient stimulus to induce changes in the eritropoiesis in tri-athletes of elite and that this type of brief protocols from intermittent exposure to hypoxia they can to replace together in a training carefully supervised, a complete program of improvement of the physical performance.

**KEY WORDS:** Triathlon, Hipobarical hypoxia, Cicloergometer.

## INTRODUCCION

Tanto el entrenamiento físico como la hipoxia son factores ambientales que inducen respuestas profundas, complejas e interrelacionadas en el organismo humano, desde alteraciones fisiológicas transitorias en algunos sistemas periféricos, hasta modulaciones en la expresión genética que determinan la intensidad y amplitud de la respuesta final.

Anteriormente, se ha demostrado la eficacia de protocolos de exposición intermitente a la hipoxia hipobárica (altitud simulada) para inducir respuestas de aclimatación a la gran altitud de alpinistas y para la mejora de la capacidad aeróbica en atletas<sup>(4;10),(3)</sup>. Estas aplicaciones están apoyadas por evidencias demostradas de que vivir en hipoxia y entrenar en normoxia es probablemente más efectivo que entrenar y vivir en hipoxia<sup>(7;14)</sup>. Es precisamente por ello que de todas las modalidades de programas combinados entre entrenamiento físico y hipoxia parecen ofrecer una nueva posibilidad de cubrir los estímulos que el organismo necesita para adaptarse rápidamente y mejorar significativamente su rendimiento.

Un grupo de triatletas de Excelent Center, durante la preparación del Ironman de Lanzarote'03 completaron su entrenamiento específico de 20 semanas de duración, con un programa de sesiones intermitentes de hipoxia en cámara hipobárica que se llevó a cabo entre las semanas 14 y 16, con un seguimiento específico tanto fisiológico como de rendimiento deportivo.

En su origen no se planteó esta experiencia como un estudio, por lo que en su diseño no se dispuso de un grupo control. Ahora bien, dado que se realizaron controles previos y posteriores al entrenamiento en cada deportista, es aceptable que las variaciones detectadas estén relacionadas con la acción combinada de hipoxia y entrenamiento.

Por otra parte, los resultados obtenidos pueden resultar de interés, por contribuir indudablemente a la progresión del estudio en este campo, ya que pueden complementarse con otros trabajos que ya se han llevado a cabo combinando entrenamiento e hipoxia, tanto en triatlón, como en otras disciplinas deportivas.

Por tanto, el objetivo del presente estudio se centró en comprobar la eficiencia de un protocolo combinado de entrenamiento físico con exposición intermitente a hipoxia hipobárica en la mejora del rendimiento físico.

## MATERIAL Y METODOS

### Sujetos

Un grupo de cuatro voluntarios (triatletas) con una edad media de  $32 \pm 6$  años, que dieron su conformidad para par-

ticipar en el estudio. El grupo presentó los siguientes valores medios de peso ( $74,5 \pm 3,4$  kg) y de talla ( $176 \pm 3$  cm).

Sus niveles de entrenamiento eran bastante altos, comprendiendo un corredor de talla internacional, otro de talla nacional y dos de nivel autonómico.

### Entrenamiento

Durante las tres semanas que duró el estudio, los voluntarios siguieron un programa de entrenamiento regular, diario, con un volumen semanal promedio de entre 12 y 18 horas. El entrenamiento durante estas tres semanas coincidía con una fase de ritmos para la mejora de la resistencia aeróbica, a velocidades entre la el umbral de lactato y el umbral anaeróbico (4 mmol/l) en las tres disciplinas: natación, ciclismo y carrera (ver Tabla 1), complementado con trabajo de fuerza resistencia especial en el gimnasio, así como una rutina de estiramientos musculares generales.

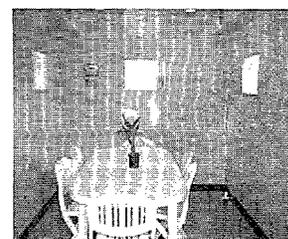
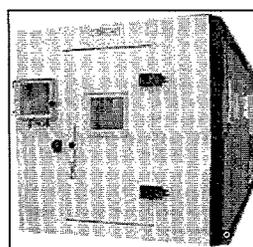
Tabla I

	Natación	Ciclismo	Carrera
<b>Semana 14</b>	4 sesiones	4 sesiones	4 sesiones
<b>Semana 15</b>	6 sesiones	3 sesiones	3 sesiones
<b>Semana 16</b>	3 sesiones	6 sesiones	3 sesiones

### Exposición intermitente a hipoxia hipobárica (EIHH)

Los participantes fueron sometidos a un programa de exposición a hipoxia en cámara hipobárica en dos fases, con una semana de duración en cada una de ellas (6 sesiones de lunes a sábado) con un periodo de descanso intermedio de una semana. Así pues los sujetos estuvieron sometidos a un total de 12 sesiones de 3 horas de duración (36 h de exposición acumulada).

Figura I y II



La cámara hipobárica (Moelco CH-1, Terrassa, España) tiene capacidad para unas ocho personas, dispone de un sistema computerizado de control de las variables ambientales (presión barométrica, humedad, temperatura y niveles de  $\text{CO}_2$ ) y dispone de diversos dispositivos de seguridad para que los cambios sean graduales y sigan con absoluta precisión los programas fijados de antemano (Fig. 1 y 2). La altitud simulada en la cámara hipobárica aumentó gradualmente a lo largo de los primeros días. Así la primera sesión se realizó a 4.000 m (616 hPa), la segunda a 4.500m (577 hPa) y la tercera y sucesivas a 5.500 m (492 hPa).

Para evaluar el efecto de la hipoxia intermitente y el entrenamiento, se llevaron a cabo al inicio (Pre) y al final (Post) del programa de exposición diferentes valoraciones que trataron de identificar la intensidad de las adaptaciones. Los parámetros evaluados comprendían entre otros, la frecuencia cardiaca, pruebas hematológicas y pruebas de rendimiento.

### Hematología

Se analizó la serie roja de los sujetos antes de iniciar el programa de exposición intermitente a hipoxia y se repitieron todos ellos al finalizar éste. Los análisis se realizaron en un laboratorio de referencia e incluyeron las siguientes determinaciones: a) recuento de eritrocitos; b) concentración de hemoglobina; c) hematocrito.

Su determinación se realizó mediante un contador Coulter Act-diff basado en el fenómeno de la impedancia.

### Suplementación farmacológica

Durante el transcurso del estudio se realizó un consejo especial a los participantes respecto a los suplementos que deberían de tomar. Se pautó el siguiente tratamiento médico, que se inició durante la semana 12 de entrenamiento, es decir dos semanas previas a la exposición a altitud.

- lactato ferroso, a dosis de  $100 \text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}$  en una toma diaria,
- ácido ascórbico (vitamina C),  $1.000 \text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}$  en una toma diaria;
- acetato de dl- $\alpha$ -tocoferol (vitamina E),  $400 \text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}$  en una toma diaria.

### Valoración del rendimiento físico

Así mismo, antes y después de las tres semanas periodo del estudio, se realizó un ensayo doble con objeto de evaluar la variación en el rendimiento físico. La prueba control se efectuó en un cicloergómetro Cardiogirus y consistió en la determinación del tiempo invertido en recorrer 5,4 km

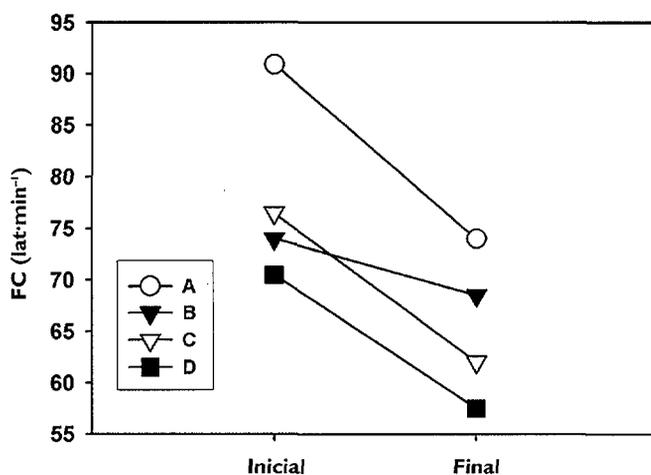
(equivalente a una etapa prólogo del Tour de Francia. La prueba elegida fue el Prólogo de Dublín), así como la velocidad media de pedaleo durante dicho periodo.

### RESULTADOS

Aunque la combinación de diferentes protocolos sobre el mismo individuo puede llegar a generar sobreentrenamiento y sensaciones de excesiva fatiga, en nuestro grupo no se presentó ningún individuo con dicha sintomatología.

La respuesta al entrenamiento combinado con hipoxia fue progresiva, y pudo ser cuantificada por la reducción de la frecuencia cardiaca en hipoxia en reposo como signo de aclimatación a la altura (Fig. 3).

**Figura III** Reducción de FC en reposo a 5.500 m durante el programa

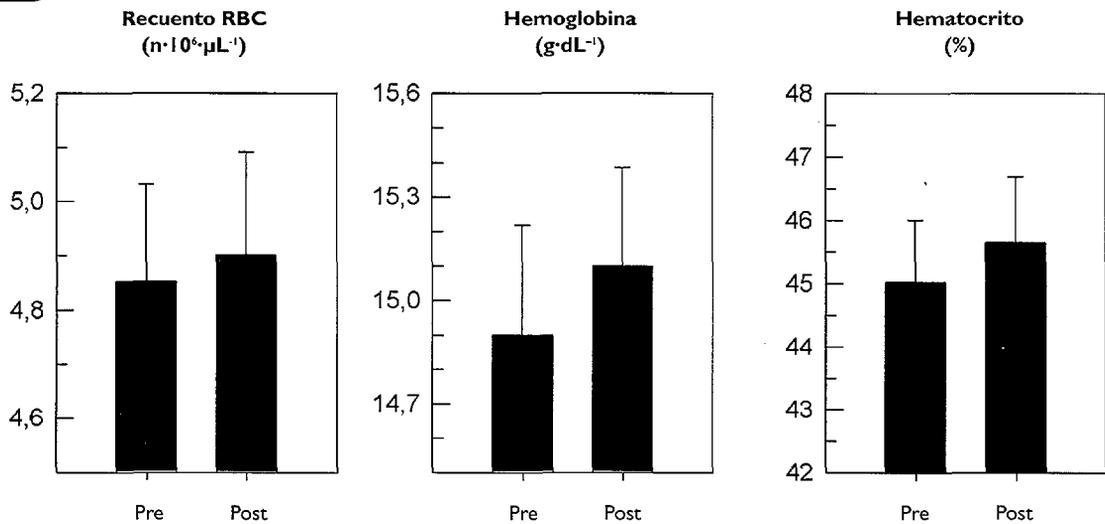


El descenso de la frecuencia cardiaca mostró variación significativa con un descenso medio en latidos por minuto durante el reposo en hipoxia (correspondiente a 5.500 m de altura equivalente) de  $12,5 \pm 3,7$ . Este descenso equivale a una reducción en el valor basal de pulsaciones en estas condiciones de aproximadamente un 16 % de promedio.

Conjuntamente con el descenso en las pulsaciones, se produjo un incremento significativo en determinados parámetros relacionados con la serie roja que nos indica la puesta en marcha de los procesos de eritropoyesis (Fig. 4).

En todos los voluntarios se observó aumento en los parámetros relacionados con el transporte de la oxígeno en sangre, aunque las variaciones de los valores no mostraron diferencias estadísticamente significativas debido al reducido número de voluntarios. Por otro lado, las alteraciones son considerables teniendo en cuenta el corto periodo de tiempo

Figura IV



estudiado ya que corresponden a incrementos del 1 % en el valor de número de hematíes (RBC), de cantidad de hemoglobina y de hematocrito.

Para determinar la eficacia del protocolo combinado de tres semanas de duración se compararon los resultados en las dos pruebas de rendimiento físico (Marcas en el Prologo de Dublín, Tabla 2). Los cuatro deportistas mostraron mejoras importantes en sus resultados de rendimiento, aunque las frecuencias de pedaleo no sufrieron modificaciones significativas.

Tabla II

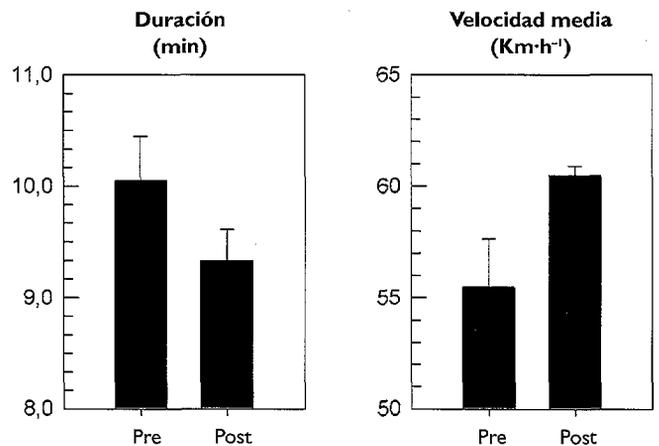
	Antes	Después
Sujeto 1	10:36	9:40
Sujeto 2	10:03	9:48
Sujeto 3	9:55	9:03
Sujeto 4	10:24	9:58

Resultados expresados en min:seg.

Los resultados se expresan en forma gráfica en la Figura 5.

Estas variaciones resultaron estadísticamente significativas ( $P < 0,02$  test de Wilcoxon) tanto en la duración de la prueba como en la velocidad media obtenida (variaciones del 6,5% y del 9 % respectivamente), con un incremento en la sensación subjetiva de potencia de los voluntarios.

Figura V



## DISCUSION

Hoy en día no cabe la menor duda de que el efecto de aclimatación a la altitud inducido mediante sucesivas sesiones breves de exposición intermitente a hipoxia es capaz de inducir un conjunto de respuestas adaptativas que son de interés para la mejora de la capacidad de esfuerzo. Este es un proceso que se denomina de pre-aclimatación a la altura y que viene modulado por una serie compleja de factores. Unos intervienen a corto plazo, como la descarga adrenérgica refleja inducida por los quimiorreceptores arteriales, que es responsable de ajustes rápidos pero poco eficaces a largo plazo como las conocidas respuestas de hiperventilación y las alteraciones cardiovasculares. Otros mecanismos proveen al organismo de efectos más a largo plazo, entre ellos destaca,

por su papel clave, la expresión del factor inducible por hipoxia (HIF-1 $\alpha$ ).

Las adaptaciones producidas no solamente permiten mejorar el rendimiento en deportes que se realizan en altura (deportes de montaña), sino que las adaptaciones tanto fisiológicas como bioquímicas desencadenadas podrán ser de utilidad en muchas otras situaciones deportivas.

Sin embargo, el uso de sesiones de hipoxia intermitente para la mejora de la capacidad aeróbica a nivel del mar sigue resultando controvertido. Tras un estudio pionero<sup>(15)</sup> en que se compararon los efectos del entrenamiento en hipoxia intermitente y normoxia, varios estudios han demostrado la eficiencia de la exposición a hipoxia intermitente en la mejora de la capacidad aeróbica en individuos entrenados<sup>(3,4;10)</sup>. Sin embargo muchos estudios son inconsistentes en la metodología y especialmente, en el diseño de los programas de exposición a hipoxia (altitud simulada, duración de las sesiones y de los programas) y de ahí la disparidad de datos obtenidos y la controversia generada<sup>(11)</sup>. Un ejemplo especialmente adecuado al caso que nos ocupa es la mejora que se detectó en triatletas entrenados en cámara hipobárica, pese a no apreciarse cambios en la eritropoyesis<sup>(16)</sup>.

Si al efecto de la hipoxia, combinamos el producido por el entrenamiento la complejidad para entender la secuencia causa – efecto se complica enormemente. En estas situaciones un mismo entrenamiento y periodos de hipoxia combinados de forma distinta, producirán efectos diversos en los individuos.

Por otra parte, hoy se conocen bien los mecanismos moleculares inducidos por la hipoxia (Fig. 6). El factor de transcripción inducible por la hipoxia (HIF-1 $\alpha$ ) es una molécula dimérica que juega un papel crucial dentro del programa de expresión génica que regula la homeostasis del oxígeno<sup>(12)</sup>. Este factor se expresa en todos los tejidos de forma constitutiva. Mientras la tensión de oxígeno a nivel subcelular se

mantiene en valores normales, HIF-1 resulta degradado por hidroxilación y su ulterior unión al complejo von Hipen-Lindau (VHL) que, a su vez forma parte de una asociación molecular compleja en que interviene un enzima capaz de conjugar la ubiquitina (Ub), que es en último término la responsable de convertir a HIF-1 en una molécula degradable. Por el contrario, en ausencia de oxígeno, la prolilhidroxilasa no es capaz de hidrolizar la molécula de HIF-1, por lo que ésta, en respuesta al estrés hipóxico, se acumula en el citoplasma, penetra en el núcleo celular y se une específicamente a determinados elementos del ADN celular (HRE: hypoxia-responsive recognition element).<sup>(5)</sup>

El factor HIF-1 actúa pues como un factor de transcripción responsable de un programa genético coordinado<sup>(12)</sup>, mediando en funciones diversas pero relacionadas estrechamente como: alteración del patrón ventilatorio, incremento de eritropoyesis, aumento de la glucólisis e intensificación de la angiogénesis. Estas respuestas fisiológicas están mediadas por proteínas específicas cuya tasa de transcripción está fuertemente incrementada por la presencia de HIF-1, especialmente los genes de la tirosina hidroxilasa<sup>(9)</sup>, eritropoyetina<sup>(1;2)</sup>, varios enzimas glucolíticos<sup>(6;13)</sup> y el factor angiogénico VEGF<sup>(8)</sup>. (Fig. 7)

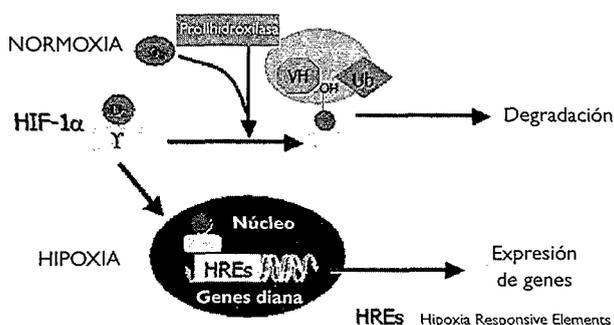
Aunque parecen claramente descritas las vías de modulación y adaptación del sistema del transporte de oxígeno, estos cambios suele ser siempre pequeños, ya que este es un sistema que difícilmente sufre alteraciones y éstas requieren de un determinado tiempo para alcanzarse y estabilizarse.

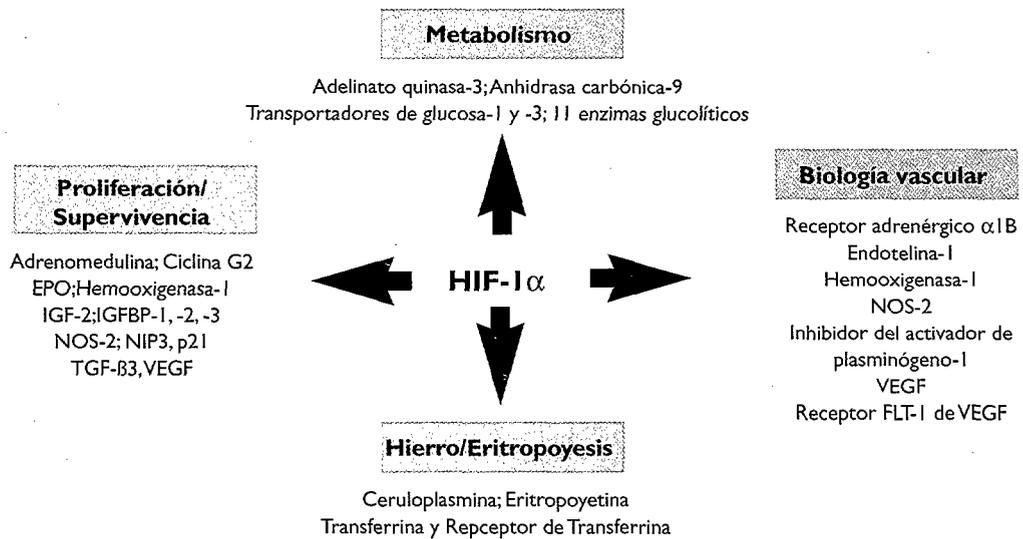
Es interesante destacar que la mejora en este sistema, no sólo afectará al rendimiento deportivo, sino que es igualmente favorable en los procesos de recuperación de esfuerzos interválicos o sucesivos, así como la asimilación de elevadas cargas de entrenamiento, favoreciendo la correcta hipertrofia de músculo.

Respecto al rendimiento físico, desafortunadamente unos elevados parámetros correspondientes al transporte sanguíneo del oxígeno no suelen ser referencia suficiente para obtener buenos resultados deportivos. El rendimiento de un atleta viene representado por una ecuación multifactorial donde afectan tanto elementos fisiológicos como bioquímicos y psicológicos entre otros.

En conclusión, la combinación de entrenamiento físico (con cargas preestablecidas) y sesiones intermitentes de hipoxia en cámara hipobárica mejora significativamente el rendimiento de triatletas de alto nivel. Este incremento en su rendimiento es resultado de la combinación de factores y no es posible distinguir entre lo aportado por el entrenamiento y lo correspondiente a la hipoxia.

**Figura VI** Activación de HIF por la hipoxia



**Figura VII** Vías activadas por la acción de HIF

Futuros estudios han de permitir la determinación del efecto de cada factor por separado y el efecto de las diferentes combinaciones posibles entre ambos.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al grupo de voluntarios por el interés mostrado durante el estudio.

#### Bibliografía

- Bunn, H. F., J. Gu, L. E. Huang, J. W. Park, and H. Zhu. Erythropoietin: a model system for studying oxygen-dependent gene regulation. *Journal of Experimental Biology* 201: 1197-1201, 1998.
- Bunn, H. F. and R. O. Poyton. Oxygen sensing and molecular adaptation to hypoxia. *Physiol Rev* 76: 839-885, 1996.
- Casas, H., M. Casas, A. Ricart, R. Rama, Ibáñez J., L. Palacios, F. A. Rodríguez, J. L. Ventura, G. Viscor, and T. Pagés. Effectiveness of three short intermittent hypobaric hypoxia protocols: hematological responses. *JEPonline* 3: 38-45, 2000.
- Casas, M., H. Casas, T. Pages, R. Rama, A. Ricart, J. L. Ventura, Ibáñez J., F. A. Rodríguez, and G. Viscor. Intermittent hypobaric hypoxia induces altitude acclimation and improves the lactate threshold. *Aviat.Space Environ.Med.* 71: 125-130, 2000.
- Harris, A. L. Hypoxia—a key regulatory factor in tumour growth. *Nat.Rev.Cancer* 2: 38-47, 2002.
- Jiang, B. H., E. Rue, G. L. Wang, R. Roe, and G. L. Semenza. Dimerization, DNA binding, and transactivation properties of hypoxia-inducible factor 1.
- Levine, B. D. and G. J. Stray. "Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J.Appl.Physiol.* 83: 102-112, 1997.
- Levy, A. P., N. S. Levy, S. Wegner, and M. A. Goldberg. Transcriptional regulation of the rat vascular endothelial growth factor gene by hypoxia. *J.Biol.Chem.* 270: 13333-13340, 1995.
- Millhorn, D. E., R. Raymond, L. Conforti, W. Zhu, D. Beitner-Johnson, T. Filisko, M. B. Genter, S. Kobayashi, and M. Peng. Regulation of gene expression for tyrosine hydroxylase in oxygen sensitive cells by hypoxia. *Kidney Int.* 51: 527-535, 1997.
- Rodríguez, F. A., H. Casas, M. Casas, T. Pages, R. Rama, A. Ricart, J. L. Ventura, Ibáñez J., and G. Viscor. Intermittent hypobaric hypoxia stimulates erythropoiesis and improves aerobic capacity. *Med.Sci.Sports Exerc.* 31: 264-268, 1999.
- Rodríguez, F. A. and J. L. Ventura. Intermittent hypoxia and training: Methods, Strategies and Results. In Viscor, G., A. Ricart, and C. Leal, eds., *Health & Height*. Barcelona, Publicacions UB. 2003, 107-113.
- Semenza, G. L. Transcriptional Regulation by Hypoxia-Inducible Factor 1. Molecular Mechanisms of Oxygen Homeostasis. *Trends in Cardiovascular Medicine* 6: 151-157, 2003.
- Semenza, G. L., B. H. Jiang, S. W. Leung, R. Passantino, J. P. Concordet, P. Maire, and A. Giallongo. Hypoxia response elements in the aldolase A, enolase 1, and lactate dehydrogenase A gene promoters contain essential binding sites for hypoxia-inducible factor 1. *J.Biol.Chem.* 271: 32529-32537, 1996.
- Stray, G. J. and B. D. Levine. "Living high and training low" can improve sea level performance in endurance athletes. *British Journal of Sports Medicine* 33: 150-151, 1999.
- Terrados, N., J. Melichna, C. Sylven, E. Jansson, and L. Kaijser. Effects of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists. *Eur.J.Appl.Physiol Occup.Physiol* 57: 203-209, 1988.
- Vallier, J. M., P. Chateau, and C. Y. Guezennec. Effects of physical training in a hypobaric chamber on the physical performance of competitive triathletes. *Eur.J.Appl.Physiol* 73: 471-478, 1996.