

# MODIFICACIONES HEMATOLÓGICAS PRODUCIDAS POR UN PROGRAMA DE EXPOSICIÓN A HIPOXIA INTERMITENTE DE OCHO SEMANAS DE DURACIÓN EN CICLISTAS

## HAEMATOLOGICAL CHANGES PRODUCED BY EIGHT WEEKS OF INTERMITTENT HYPOXIA EXPOSURE PROGRAM IN CYCLIST

### RESUMEN

**Introducción:** La exposición a hipoxia intermitente (IHE) es un frecuente complemento al entrenamiento del deportista de alto nivel para incrementar su rendimiento debido a las mejoras en índices hematológicos claves para el rendimiento en deportes de resistencia. El objetivo del estudio fue comprobar los cambios producidos por un programa de IHE normobárica en ciclistas entrenados.

**Metodología:** Formaron parte de este estudio 16 ciclistas de categoría élite y sub-23, divididos aleatoriamente en un grupo experimental (GH) (n=8) (Edad:  $23,38 \pm 3,3$  años; Talla:  $178,75 \pm 7,6$  cm; Peso:  $75,41 \pm 9,7$  Kg) y un grupo control (GC) (n=8) (Edad:  $27,13 \pm 4,6$  años; Talla:  $174,06 \pm 7,1$  cm; Peso:  $60,48 \pm 3,7$  Kg). Se midió a través de analítica sanguínea el hematocrito (%), la hemoglobina (g/dl), los hematíes ( $\times 10^6/\mu\text{l}$ ), la ferritina (ng/ml), los reticulocitos (%) la hemoglobina corpuscular media (HCM) (pg), la concentración de hemoglobina corpuscular media (CHCM) (g/dl), el volumen corpuscular medio (VCM) (fl), la sideremia (mcg/dl) y la hormona eritropoyetina (EPO) (mU/ml). Tras la realización de la analítica sanguínea se aplicó un tratamiento de IHE normobárica de 8 semanas de duración (40-60 min de duración, 4 días en semana, 11-14 %  $\text{FiO}_2$ ).

**Resultados:** Entre el momento pre y post-tratamiento, existe un mantenimiento en las variables hematíes, hemoglobina, reticulocitos, EPO y sideremia. Se produce un descenso en la variable hematocrito en el GH entre los momentos pre ( $46,02 \pm 1,4$  %) y post-tratamiento ( $43,02 \pm 1,3$  %) con una significación de  $p < 0,05$ . También se encuentran diferencias en la CHCM entre el GH ( $34,28 \pm 0,8$  g/dl) y GC ( $33,22 \pm 0,9$  g/dl) en el momento post-tratamiento a nivel de  $p < 0,05$ .

**Conclusiones:** La aplicación de este programa de IHE no incrementa las variables hematológicas determinantes para estimular la eritropoyesis en ciclistas entrenados.

**Palabras clave:** Ciclismo. Exposición a hipoxia intermitente. EPO. Hematocrito.

### SUMMARY

**Introduction:** Exposure to intermittent hypoxia (IHE) is a frequent complement for the high-level athlete to improve performance, due to improvements in hematologic key indices for performance in endurance sports. The aim of the study was to check the changes produced by a normobaric IHE in trained cyclists.

**Methods:** Included in this study 16 elite-sub23 cyclists. They were divided into an experimental group (GH) (n = 8) (Age:  $23,38 \pm 3,3$  years; Size:  $178,75 \pm 7,6$  cm, Weight:  $75,41 \pm 9,7$  Kg) and a control group (CG) (n = 8) (Age:  $27,13 \pm 4,6$  years, Size:  $174,06 \pm 7,1$  cm, Weight:  $60,48 \pm 3,7$  kg). Was measured through blood tests hematocrit (%), hemoglobin (g / dl), erythrocytes ( $\times 10^6/\mu\text{l}$ ), the ferritin (ng / ml), reticulocytes (%) mean corpuscular hemoglobin (MCH) (pg), the mean corpuscular hemoglobin concentration (CHCM) (g / dl), mean corpuscular volume (MCV) (fl), the serum iron (mcg / dl) and hormone erythropoietin (EPO) (mU / ml). Following the completion of the blood analytical was applied a 8 weeks normobaric IHE (40-60 min duration, 4 days a week, 11-14%  $\text{FiO}_2$ ).

**Results:** Between the time pre-and post-treatment, there is a maintenance variables erythrocytes, hemoglobin, reticulocytes, EPO and serum iron. Hematocrit decrease in GH between the time pre ( $46,02 \pm 1,4\%$ ) and post-treatment ( $43,02 \pm 1,3\%$ ) with significance of  $p < 0,05$ . It also found differences in CHCM between GH ( $34,28 \pm 0,8$  g/dl) and GC ( $33,22 \pm 0,9$  g / dl) in the time after treatment at the  $p < 0,05$ .

**Conclusions:** The implementation of this intermittent hypoxia program not increases hematological variables for stimulation of erythropoiesis.

**Key words:** Cycling. Intermittent Hypoxia Exposure. Erythropoietin. Hematocrit.

Domingo J. Ramos Campo

Fernando Martínez Sánchez

Paula Esteban García

Jacobo. A. Rubio Arias

Vicente J. Clemente Suárez

Susana Mendizábal Albizu

José F. Jiménez Díaz

Laboratorio de Rendimiento y Readaptación Deportiva. Facultad de Ciencias del Deporte de Toledo. UCLM. Grupo de Investigación DEPORSALUD

### CORRESPONDENCIA:

Domingo J. Ramos Campo  
Avda Carlos III s/n. Ed. 12.1. Campus Tecnológico Antigua Fábrica de Armas. 45071. Toledo  
E-mail: domingojesusramos@gmail.com

Aceptado: 09.06.2011 / Original n° 590

## INTRODUCCIÓN

El entrenamiento en altitud es un frecuente complemento del deportista de alto nivel para incrementar el rendimiento al nivel del mar<sup>1</sup>. En un intento de producir adaptaciones que deriven en un incremento del rendimiento en competición, numerosos deportistas de resistencia realizan concentraciones en altitud durante parte del año<sup>2</sup>. Sin embargo, la evidencia científica que confirma la eficacia de esta práctica es muy escasa, ya que los mecanismos responsables de producir las adaptaciones no han sido aclarados.

Históricamente, el entrenamiento en altitud hacía que los atletas vivieran y entrenaran en altitud durante 2-3 semanas<sup>3</sup>, sin embargo este tipo de programas reduce la intensidad del entrenamiento<sup>4</sup>, lo que reducía su rendimiento. Para evitar estas desventajas, en la década de los 90 en Escandinavia y EEUU, surgen nuevos métodos y dispositivos para la mejora del rendimiento a través del entrenamiento en altitud. En la actualidad, las diferentes estrategias de entrenamiento o exposición en altitud van desde el tradicional “live high-train high” (LHTH), al contemporáneo “live high-train low” (LHTL). Además se realiza la exposición a hipoxia intermitente en reposo (IHE) y la exposición a hipoxia intermitente durante el entrenamiento (IHT). A pesar de las sustanciales diferencias existentes entre cada uno de los métodos citados, todas las estrategias tienen la misma meta u objetivo, mejorar el rendimiento del deportista a nivel del mar.

El mecanismo subyacente de los efectos provocados por el entrenamiento en condiciones de hipoxia siguen debatiéndose en la actualidad. El incremento de la capacidad hematológica es la mejora más popular, pero quizás no sea el factor principal o el único que ayude a la mejora del rendimiento. Otros factores centrales (parámetros ventilatorios, hemodinámicos o adaptaciones neurales) o periféricos (capacidad muscular de almacenamiento o economía) juegan un rol importante.

La exposición a hipoxia intermitente (IHE) o periódica se define como la exposición a hi-

poxia con duración perdurable desde segundos hasta horas y una frecuencia desde días a semanas. Éstos periodos de hipoxia intermitente están separados por intervalos de retorno a normoxia o menor intensidad de hipoxia<sup>5</sup>. La IHE combinada con sesiones de entrenamiento en hipoxia es lo que se denomina entrenamiento de hipoxia intermitente (IHT)<sup>2,6</sup>. El entrenamiento interválico de hipoxia intermitente (IHIT) es un método en el que durante una sesión de entrenamiento se alternan periodos de hipoxia y normoxia<sup>6</sup>. En los diseños experimentales publicados con deportistas de resistencia, se observan gran variedad en el empleo de protocolos y duración, frecuencia e intensidad de éstos.

La utilización de IHT o IHE hace que se intente dilucidar la cuestión de la duración mínima de exposición para estimular la eritropoyesis. Tan sólo exposiciones o estímulos cortos son necesarios para estimular la producción de EPO<sup>7-11</sup>. Por lo tanto, podemos afirmar que la IHE y la IHT son métodos válidos para incrementar de forma significativa la segregación de EPO y de eritrocitos y como consecuencia el aumento del rendimiento y del VO<sub>2</sub>max en deportistas de resistencia, desapareciendo al mismo tiempo, todos los efectos negativos que produce la altitud natural prolongada en los deportistas, como es la fatiga, el descenso de masa muscular o la inmunodepresión.

En la literatura que estudia la aplicación de programa de IHE con aumento progresivo de hipoxia hipobárica de 90 min a 3 horas de duración, se observaban mejoras relacionadas con la estimulación de la eritropoyesis a través del aumento significativo del número de reticulocitos, eritrocitos, hemoglobina y hematocrito<sup>8</sup>, EPO<sup>12</sup> o mejoras en la respuesta ventilatoria durante un ejercicio hipóxico submáximo<sup>13</sup>.

Los estudios de IHE con hipoxia normobárica evidencian incrementos en EPO, reticulocitos (29%), hemoglobina (4%) y hematocrito (5%)<sup>11</sup>. Otros estudios<sup>14,15</sup>, no observan cambios en variables hematológicas después del programa en deportistas de fondo y en nadadores.

Si nos centramos en los hallazgos encontrados en relación a los efectos de IHE en el rendimiento en deportes de resistencia, observamos resultados contradictorios. Existen estudios en los que aumenta el rendimiento del deportista de resistencia aeróbica mejorando el tiempo de prueba<sup>11</sup> y en otros casos mejorando la potencia generada en el umbral anaeróbico<sup>8</sup> o el  $VO_2$ max y la ventilación pico en ejercicio<sup>16</sup>. Sin embargo, otros parámetros medidos en otros estudios no se modifican de forma significativa, como el  $VO_2$ max o la duración del test<sup>8</sup>. En otras investigaciones no se producen cambios en la respuesta del organismo a ejercicios máximos y submáximos en atletas<sup>14,16,17</sup> ni en esfuerzos anaeróbicos<sup>18</sup>.

Esta diversidad de resultados, hizo que nos planteáramos analizar los cambios hematológicos producidos en ciclistas de categoría elite y sub-23 tras un entrenamiento clásico complementado con un programa de exposición a hipoxia intermitente (IHE) normobárica, comparado con un entrenamiento clásico sin exposición a hipoxia. Por ello determinamos que la hipótesis de estudio es que un programa de entrenamiento clásico complementado con IHE modifica de forma significativa los valores hematológicos relacionados con la estimulación eritropoyética.

## MATERIAL Y MÉTODO

El estudio se realizó con ciclistas de categoría elite divididos en un grupo experimental (GH) y un grupo control (GC). El GH fue sometido a un programa de exposición a hipoxia intermitente normobárica de 8 semanas de duración que complementaba a su entrenamiento cotidiano, mientras que los sujetos del GC no fueron some-

tidos al tratamiento de IHE y tan solo realizaban su entrenamiento en carretera. Se llevó a cabo una primera evaluación antes del inicio del programa y otra al finalizar éste.

*Participantes:* Formaron parte de este estudio 16 ciclistas de categoría elite y sub-23, divididos aleatoriamente (a través de [www.randomizer.org](http://www.randomizer.org)) en grupo experimental (GH) (n=8) y en grupo control (GC) (n=8). Todos los sujetos formaban parte de un grupo deportivo de la región y realizaban el mismo programa de entrenamiento. Los criterios de inclusión para poder formar parte del estudio, fueron que los ciclistas debían tener al menos 5 años de experiencia en el deporte. Además, el carácter de la práctica deportiva debía ser competitiva y no debían presentar enfermedad o lesión previa al comienzo del estudio. Las características descriptivas de la muestra se observan en la Tabla 1.

*Variables:* Los parámetros obtenidos a través de analítica sanguínea fueron el hematocrito (%) o porcentaje de volumen de sangre que ocupa la fracción de los glóbulos rojos, la hemoglobina (g/dl), que es una heteroproteína que transporta el oxígeno desde los órganos respiratorios hasta los tejidos. También se cuantificaron los hematíes ( $\times 10^6/\mu\text{l}$ ) o glóbulos rojos, la ferritina (ng/ml), que es la principal proteína almacenadora de hierro en los vertebrados y los reticulocitos (%) o hematíes jóvenes cuya presencia en la sangre periférica indica una mayor actividad de la médula ósea. Además se midió la hemoglobina corpuscular media (HCM) (pg) o masa de hemoglobina contenida en un glóbulo rojo, y la concentración de hemoglobina corpuscular media (CHCM) (g/dl) calculada a partir del cociente entre la hemoglobina y el hematocrito.

	n	Edad (años)	Talla (cm)	Peso (Kg)	Grasa (%)	$VO_2$ max (ml/Kg/min)
GH	8	23,38 ± 3,3	178,75 ± 7,6	75,41 ± 9,7	11,57 ± 2,9	63,68 ± 4,4
GC	8	27,13 ± 4,6	174,06 ± 7,1	71,95 ± 8,5	10,87 ± 1,9	60,48 ± 3,7

**TABLA 1.**  
Características descriptivas de la muestra

Edad, talla, peso, grasa y  $VO_2$ max. Se muestra media ± desv. estándar

Por último, se calculó el volumen corpuscular medio (VCM) (fl) o volumen de los hematíes, la sideremia (mcg/dl) o concentración sérica de hierro y la hormona eritropoyetina (EPO) (mU/ml) u hormona encargada de la estimulación de la eritropoyesis.

*Instrumentos:* La analítica sanguínea se llevó a cabo en un laboratorio clínico, en el que las muestras fueron analizadas en un contador hematológico System 9000 Coulter Counter (Menarini Diagnósticos, Spain) siguiendo la metodología de calibraciones y controles propuestos por el fabricante.

Para llevar a cabo el programa se utilizó el hipoxicador GO<sub>2</sub> Altitude (Biomedtech Australia, Melbourne, Australia) para cuatro personas, que simula altitudes entre 2700 y 6500 m (9-15% de O<sub>2</sub>).

*Procedimiento:* Una vez los sujetos fueron seleccionados y aleatorizada la muestra, se diseñó el calendario informando a cada sujeto del lugar, fecha, hora de cada prueba y su naturaleza. Posteriormente, se obtuvo su consentimiento informado, en un documento firmado por el director del proyecto y cada sujeto, al amparo de las directrices éticas dictadas en la declaración de Helsinki de la Asociación Médica Mundial, para la investigación con seres humanos y actualizadas por la Sociedad Americana de Fisiología en 2008.

A continuación se realizó la analítica sanguínea en un laboratorio clínico para obtener las

variables hematológicas. Al día siguiente se comenzó con el programa de hipoxia intermitente de 8 semanas de duración, en las cuales el porcentaje de oxígeno del aire inspirado iba progresivamente disminuyendo y la duración de la sesión iba aumentando desde los 40 a los 60 min. Durante los dos meses, la frecuencia del programa de hipoxia era de 4 días semanales repartidos en Lunes, Martes, Jueves y Viernes. La exposición a hipoxia se llevó a cabo en el laboratorio de rendimiento y readaptación deportiva de la facultad de ciencias del deporte de Toledo. Los ciclistas acudían de forma estructurada en función de un horario preestablecido al laboratorio a realizar su sesión de hipoxia. En todo momento la sesión estaba supervisada por el personal de dicho laboratorio.

La saturación de oxígeno o factor de control de la carga interna del programa de hipoxia se ajustó en un ratio de 90 a 85%, disminuyendo progresivamente durante la duración del tratamiento. La saturación de oxígeno se monitorizaba a través de un pulsioxímetro colocado en el dedo índice de la mano derecha del participante.

Durante el tratamiento se utilizó el programa estándar de hipoxia intermitente, en el cual se intercalaban intervalos de 5 min de duración de inspiración de aire hipóxico, con intervalos de similar duración de inhalación de aire normóxico<sup>11,17,19-20</sup>. Este programa de entrenamiento en altura duró 8 semanas en las cuales se iban modificando el tiempo de la sesión, el porcentaje de oxígeno en el aire, y el porcentaje de saturación de oxígeno según se detalla en la Tabla 2.

Una vez finalizado el programa se volvió a realizar la analítica sanguínea siguiendo las pautas explicadas anteriormente.

*Programa de entrenamiento realizado por los ciclistas:* El programa de la temporada del grupo estudiado estaba dividido en 2 macrociclos. El primer macrociclo tuvo una duración de 34 semanas mientras que el segundo se extendía durante 21 semanas. El estudio se llevó a cabo durante el primer macrociclo de la temporada.

**TABLA 2.**  
Protocolo de  
Hipoxia  
Intermitente

Semana	Duración	%O <sub>2</sub> Aire	%Saturación de O <sub>2</sub>
1	40	14	90
2	50	14	90
3	50	13,5	88
4	50	13	88
5	60	12,5	87
6	60	12	86
7	60	11,5	85
8	60	11	85

El modelo de planificación utilizado fue el paralelo-complejo, que utiliza cargas de entrenamiento regulares, también denominadas lineales o diluidas. Este modelo de planificación se considera tradicional o clásico y tiene su máximo exponente en Matveiev<sup>21</sup>. La planificación se divide en un periodo preparatorio y un periodo competitivo. El entrenamiento llevado a cabo por los sujetos del estudio se encuadra en el periodo pre-competitivo del macrociclo I de la temporada, correspondiente a la fase invernal. En la Figura 1 se observa la planificación donde se contextualiza el estudio que se ha desarrollado en los mesociclos de perfeccionamiento III y pre-competición. Cada mesociclo ha estado compuesto de 4 microciclos. El mesociclo de perfeccionamiento III, cuyo objetivo principal era el desarrollo del Umbral Anaeróbico y que tenía como objetivos secundarios el desarrollo del Umbral Aeróbico, la Capacidad Aeróbica y la Resistencia a la Fuerza Aeróbica, estaba formado por tres microciclos de Carga y uno de Recuperación (C-C-C-R). Mientras que el mesociclo de pre-competición, cuyo objetivo principal era el trabajo del Ritmo de Competición, y que tenía como objetivos secundarios el mantenimiento del Umbral Anaeróbico y Aeróbico del deportista y el trabajo de Resistencia a la Fuerza Aeróbica, estaba compuesto por un microciclo de Ajuste, dos de Carga y uno de Recuperación. (A-C-C-R). Cada sujeto entrenaba de forma individualizada en las zonas establecidas en los test iniciales.

La cuantificación de la carga de entrenamiento se llevó a cabo mediante TRIMPS (Training Impulse), en el cual se tenía en cuenta la duración y la intensidad del ejercicio expresándose cuantitativamente el nivel de carga realizado<sup>22</sup>. Esta unidad ha sido utilizada para describir la carga

de ejercicio de las distintas modalidades de ciclismo, como etapas contrarreloj y etapas en línea en las grandes vueltas del ciclismo profesional<sup>23,24</sup>. La cuantificación de cada microciclo se observa en la Tabla 3.

A los deportistas se les entregó un diario de entrenamiento donde anotaban todos los datos correspondientes a sus entrenamientos, tiempo empleado, datos medios y máximos recogidos durante las sesiones de entrenamiento, sensaciones, así como las ayudas ergogénicas que ingerían cada día.

*Técnicas de análisis de datos:* Para el análisis de los datos obtenidos en el estudio se ha utilizado el paquete estadístico SPSS versión 17.0 para Windows. En primer lugar se hallaron los datos descriptivos de media, desviación estándar, máximo, mínimo y rangos de todas las variables estudiadas. Posteriormente se determinó la normalidad de las variables con la prueba de Shapiro Wilk para muestras inferiores a n=30. A continuación, en las variables paramétricas, se realizó un análisis multifactorial (MANOVA),

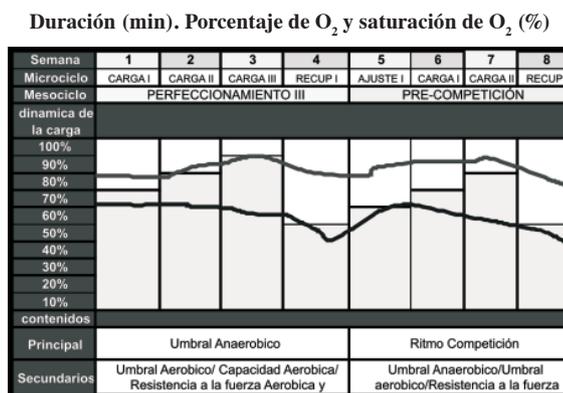


FIGURA 1. Planificación del periodo de entrenamiento donde se lleva a cabo el estudio

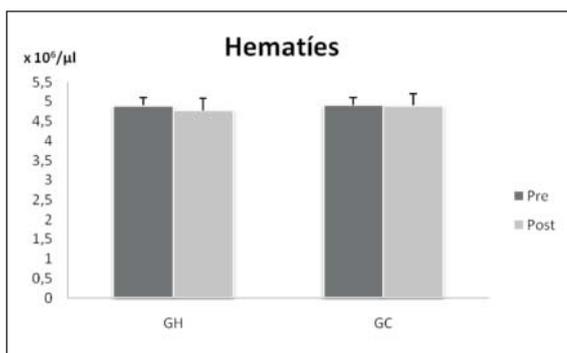
Mesociclo	Perfeccionamiento III				Precompetición I			
	Carga I	Carga II	Carga III	Recuper I	Ajuste I	Carga I	Carga II	Recuper I
Trimps (GH)	1678±18	1857±12	2056±24	1171±21	1598±34	1677±22	2211±16	1271±17
Trimps (GC)	1629±20	1851±16	2060±12	1198±8	1593±28	1703±30	2188±21	1202±23

TABLA 3. Cuantificación de los microciclos de entrenamiento en los que se realiza el programa

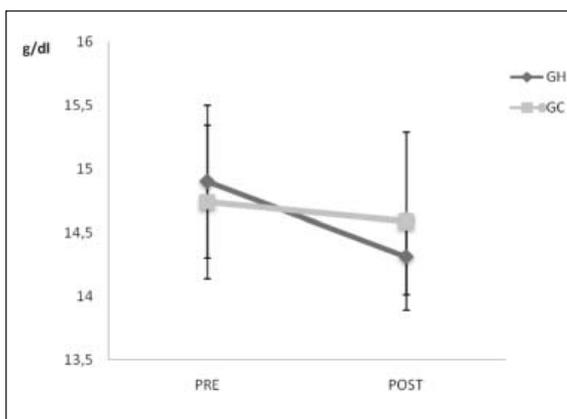
aplicando el post-hoc de Bonferroni, para determinar las diferencias intragrupo e intergrupo. Se utilizó una ANCOVA para determinar las diferencias intragrupo con el factor de la carga de entrenamiento aplicada, de esta forma eliminamos la heterogeneidad causada en las variables dependientes por la influencia del entrenamiento.

Las pruebas estadísticas aplicadas en las variables no paramétricas consistieron en primer lugar en una prueba para muestras independientes U de Mann-Whitney para establecer las diferencias intergrupos antes del programa y otra al finalizar éste. Posteriormente se aplicó una prueba de Wilcoxon para 2 muestras relacionadas para analizar las diferencias intragrupo antes del tratamiento y otra, cuando finalizó éste. El nivel de significación para todas las variables de estudio se estableció en  $p < 0,05$ .

**FIGURA 2.**  
Hematíes  
( $\times 10^6/\mu\text{l}$ ) en GH  
y GC en los  
momentos pre  
y post intervención



**FIGURA 3.**  
Dinámica de la  
variable  
hemoglobina  
(g/dl) en los  
diferentes  
momentos de  
medición en el GH  
y GC



## RESULTADOS

Las variables hemoglobina, hematíes, la HCM, el VCM, la CHCM, la ferritina, los reticulocitos, la eritropoyetina, y las variables descriptivas (edad, talla, peso y  $\text{VO}_2\text{max}$ ) seguían una distribución normal. Sin embargo, el hematocrito y la sideremia del GH eran variables no paramétricas.

Analizando las variables hematológicas, observamos que en la variable hematíes ( $\times 10^6/\mu\text{l}$ ), tal como observamos en la Figura 2, no existen diferencias significativas entre el GC y GH en el momento previo al tratamiento ( $p=1$ ), ni en el momento post-tratamiento ( $p=1$ ). Tampoco se encuentran diferencias intragrupo entre los diferentes momentos del estudio en esta variable.

Asimismo, tal como observamos en la Figura 3, en la variable hemoglobina (g/dl) no se observa variación en el GH (Pre:  $14,9 \pm 0,6$  g/dl Post:  $14,74 \pm 0,3$  g/dl) ni en el GC (Pre:  $14,31 \pm 0,6$  g/dl; Post:  $14,59 \pm 0,7$  g/dl) entre los diferentes momentos. Comparando al GH con el GC en el momento pre-tratamiento ( $p=0,228$ ) y posterior al tratamiento ( $p=1$ ) tampoco se encuentran diferencias en esta variable.

Los reticulocitos (%) se mantienen constantes entre los momentos anterior y posterior al programa, tanto en el GH (Pre:  $0,48 \pm 0,2$  %; Post:  $0,51 \pm 0,1$  %) como en el GC (Pre:  $0,51 \pm 0,3$  %; Post:  $0,8 \pm 0,6$  %), sin encontrar diferencias significativas en esta variable entre los momentos de evaluación (GH:  $p=1$ ; GC:  $p=0,622$ ) ni entre grupos (pretratamiento:  $p=1$ ; postratamiento:  $p=0,549$ ) (Figura 4).

Centrándonos en la hormona eritropoyetina (mU/ml), tal como observamos en la Figura 5, se produce un mantenimiento de los valores entre ambos momentos de medición (GH:  $p=1$ ; GC:  $p=1$ ) y en cada uno de los grupos de investigación (pretratamiento:  $p=1$ ; postratamiento:  $p=1$ ).

La variable sideremia (mcg/dl) no se modifica en ningún grupo ni momento de medición. Así, en el GH los valores en el momento previo al progra-

ma son  $71,71 \pm 37$  mcg/dl y  $72,59 \pm 34,4$  mcg/dl al finalizar éste. En el GC eran de  $96,67 \pm 42,1$  mcg/dl en el momento previo al tratamiento y de  $99,66 \pm 49$  mcg/dl al finalizar éste.

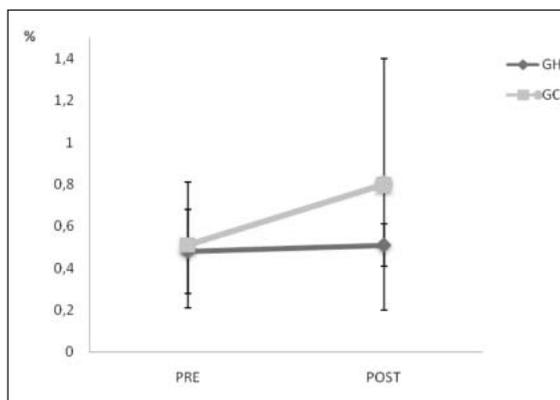
Además, observamos en la Figura 6, que en GH se produce un descenso en la variable hematocrito (%) entre los momentos pre ( $46,02 \pm 1,4\%$ ) y post-tratamiento ( $43,02 \pm 1,3 \%$ ) con una significación de  $p < 0,05$ . En el grupo control no se encuentran diferencias significativas entre los diferentes momentos de evaluación ( $p=1$ ). Tampoco se encuentran diferencias significativas entre el GH y el GC en los momentos pretratamiento ( $p=0,324$ ) ni postratamiento ( $p=1$ ).

En la variable concentración de hemoglobina corpuscular media (CHCM) (g/dl), observamos un aumento en el GH entre el momento previo al programa ( $32,37 \pm 0,5$  g/dl) y el momento posterior al programa ( $34,28 \pm 0,8$  g/dl) a nivel de  $p < 0,001$ . También se encuentran diferencias en esta variable entre el GH ( $34,28 \pm 0,8$  g/dl) y GC ( $33,22 \pm 0,9$  g/dl) en el momento posterior al tratamiento con una significación de  $p < 0,05$  (Figura 7).

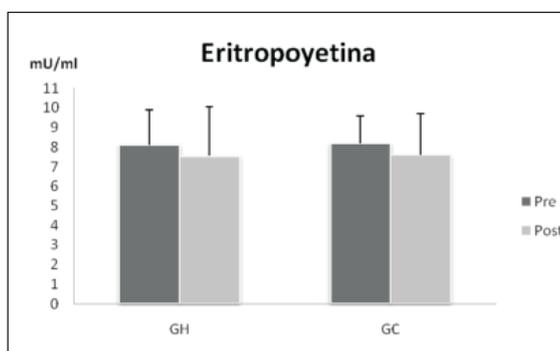
Por último, en la variable ferritina (ng/ml) existen diferencias en el momento previo al tratamiento entre ambos grupos (GH:  $66,04 \pm 40,5$  ng/ml; GC:  $137,69 \pm 41$  ng/ml) con una significación de  $p < 0,01$ . Estas diferencias se mantienen al finalizar el programa (GH:  $68,41 \pm 32,2$  ng/ml; GC:  $145,16 \pm 32,1$  ng/ml), lo que hace que no existan diferencias significativas entre los diferentes momentos de medición en el GH ni en el GC.

## DISCUSIÓN

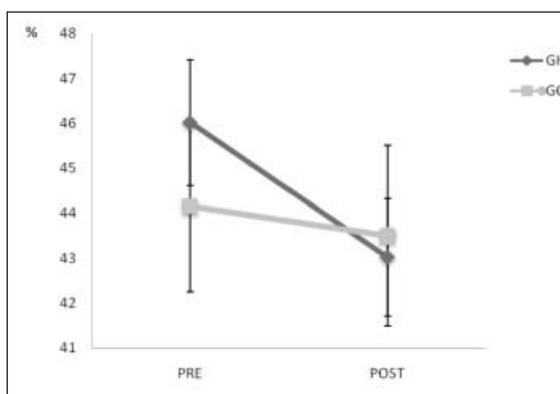
En el presente estudio no se ha observado una modificación hematológica favorable tras la aplicación de un programa de exposición a hipoxia intermitente de 8 semanas de duración con un porcentaje de oxígeno entre 14 y 11% y una saturación de  $O_2$  de 90 a 85%, en ciclistas de categoría élite y sub 23. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis de estudio formulada, por la cual un programa de entrenamiento clásico complementado con IHE no modifica de forma significativa



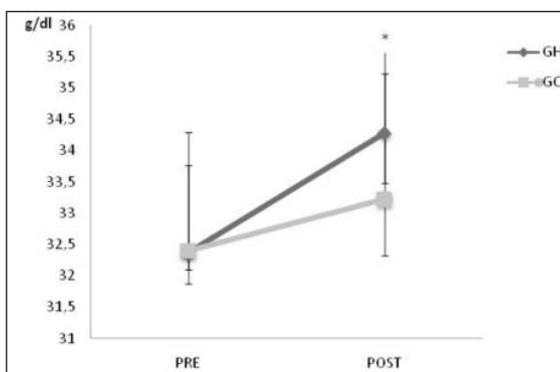
**FIGURA 4.** Dinámica de la variable reticulocitos (%) en los diferentes momentos de medición en el GH y GC



**FIGURA 5.** Eritropoyetina (mU/ml) en GH y GC en los momentos pre y post intervención



**FIGURA 6.** Dinámica de la variable hematocrito (%) en los diferentes momentos de medición en el GH y GC



**FIGURA 7.** Dinámica de la variable CHCM (g/dl) en los diferentes momentos de medición en el GH y GC

los valores hematológicos relacionados con la estimulación eritropoyética.

En los últimos años, el interés que suscita el entrenamiento en altitud en ciclistas ha incrementado<sup>25</sup>. Numerosas investigaciones muestran como la hipoxia intermitente estimula la eritropoyesis y produce beneficios en diferentes deportistas<sup>26-28</sup>. Esta afirmación no está en consonancia con los resultados obtenidos en nuestro estudio, ni en otros estudios de la literatura<sup>17,29-30</sup>, en los que no existen efectos positivos sobre las variables hematológicas medidas. Estas discrepancias sobre la efectividad de estos programas se deben fundamentalmente al tiempo de duración de la sesión en la que el sujeto se encuentra expuesto a hipoxia y su relación con la estimulación de la hormona eritropoyetina. Knaupp<sup>9</sup> observa un incremento del 50% en esta hormona 4 horas después de una sesión de exposición a hipoxia de 2 horas de duración.

Entre las investigaciones previas que observaban la eficacia de este tipo de medios está el estudio de Rodríguez, *et al*<sup>7</sup>, en la que obtienen aumentos significativos en el hematocrito (42,15 % a 45,1%), los hematíes ( $5,16 \times 10^6/\mu\text{l}$  a  $5,79 \times 10^6/\mu\text{l}$ ), los reticulocitos (0,5 % a 1,1 %) y la concentración de hemoglobina (14,2 g/dl a 16,7 g/dl) con un programa de hipoxia hipobárica intermitente de 9 días a 4000-5000 m de altura durante 3 horas al día.

En esta línea encontramos la investigación de Eckardt<sup>31</sup> quien expuso a sujetos activos a un programa de hipoxia hipobárica intermitente simulada a 3000 a 4000 m de altitud durante 5 horas y media al día, observando un aumento significativo en la eritropoyetina. En otro estudio, Klaursen, *et al*<sup>32</sup> encontraron un aumento del 28% en la hormona eritropoyetina con un programa de hipoxia al 10% de O<sub>2</sub> y una duración de 2 horas por sesión de hipoxia intermitente normobárica. Estos resultados no concuerdan con los encontrados en nuestro estudio, donde no se producen cambios en la hormona eritropoyetina.

Estos métodos también se utilizan como medio para la aclimatación en montañeros, como es el

caso del estudio de Casas, *et al*<sup>33</sup>, donde 6 alpinistas de élite fueron expuestos a 17 sesiones de 3 horas de duración a 4000 m de hipoxia hipobárica simulada, incrementando la concentración de hemoglobina de 14,8 g/dl a 16,4 g/dl. En consecuencia, parece justificado aplicar este tipo de medios para lograr una respuesta de aclimatación eritropoyética, la cual se podría comparar a la producida por la administración de eritropoyetina exógena<sup>34,35</sup>. Además, este estudio junto con el de Rodríguez, *et al*<sup>7</sup> logran incrementar la concentración de hemoglobina. Estos datos no los encontramos en nuestro estudio, donde la hemoglobina se mantiene constante a lo largo del estudio de investigación. Esto puede deberse a que la respuesta individual en los sujetos experimentales es muy variable en este tipo de estudios, donde numerosos participantes pueden responder o no a la altitud y sufrir respuestas de aclimatación a este tipo de programas<sup>8</sup>. Por último, Rodas, *et al* (2004)<sup>36</sup> encuentran un aumento de reticulocitos, hemoglobina y hematocrito, tras un programa de hipoxia hipobárica de 2 semanas, con 6 sesiones semanales y 3 horas de duración por sesión.

Estas mejoras obtenidas en la literatura con hipoxia hipobárica, no se obtienen con hipoxia normobárica, donde se mantienen los parámetros sanguíneos medidos<sup>14,17</sup> excepto en los estudios de Hellemans<sup>11</sup>. En nuestro estudio, tampoco obtenemos resultados similares a los que se obtienen con hipoxia hipobárica, produciéndose un mantenimiento similar a los encontrados en los estudios de hipoxia normobárica.

Por otro lado, en la bibliografía existen estudios como el de Katayama, *et al*<sup>30</sup> o el de Lundby, *et al*<sup>37</sup> que no encuentran modificaciones en parámetros hematológicos tras un programa de hipoxia hipobárica. En el primero de ellos, los autores utilizaron un protocolo de 90 min de duración a una altitud de 4500 m, con una frecuencia de tres veces por semana durante 21 días, no produciéndose cambios en la hemoglobina, el hematocrito, los hematíes, los reticulocitos, la eritropoyetina ni la ferritina. En el segundo de los estudios citados, se utilizó un protocolo de 2 horas de duración a 4100 metros de altura durante

14 días, sin observar cambios en los parámetros hematológicos medidos.

En esta línea encontramos otro estudio con hipoxia hipobárica intermitente de corta duración. La exposición era de una hora a 4000 m de altura combinada con entrenamiento físico en un grupo de triatletas de alto nivel. Los autores no encuentran signos de adaptación atribuidos a la hipoxia intermitente<sup>38</sup>.

La incidencia de la práctica deportiva sobre los parámetros hematológicos no se ha tomado en consideración en los diferentes estudios con hipoxia. De esta forma, los cambios en el hematocrito, la hemoglobina y las modificaciones en el volumen del plasma no han tenido en cuenta la carga de entrenamiento desarrollado durante el programa de hipoxia. La sobrecarga y el descenso de rendimiento persistente, con o sin el acompañamiento de otros síntomas psicológicos y físicos<sup>39</sup>, incide de forma directa en los marcadores sanguíneos, produciendo un descenso en el volumen del plasma<sup>40</sup>. Esto también origina un descenso en la hemoglobina, el hematocrito y una serie de cambios hormonales inducidos por el entrenamiento, y que a largo plazo pueden derivar en un descenso de la capacidad del organismo en la fijación de hierro, un descenso del mismo y por lo tanto una anemia<sup>41</sup>. Esta afirmación nos hace pensar en la posibilidad de que los ciclistas participantes en nuestro estudio, pudieran sufrir un proceso de sobrecarga o acumulación que justificaría los valores obtenidos en los parámetros sanguíneos. Estudios recientes muestran como en deportistas entrenados se producen descensos en diversas variables hematológicas a lo largo de las temporadas cuando la intensidad y el volumen de trabajo es elevado<sup>42</sup>, existiendo diferencias en dichos parámetros entre sujetos sedentarios y deportistas<sup>43</sup>. Más en concreto, en ciclistas daneses profesionales, se ha demostrado que desde el comienzo de la temporada existe un descenso en el hematocrito que sólo se revierte con el cese de los entrenamientos o periodos transitorios<sup>44</sup>, lo que justifica el descenso del hematocrito en los ciclistas de nuestro estudio derivado del proceso de entrenamiento.

Las divergencias entre los diversos resultados obtenidos, pueden atribuirse a las distintas altitudes utilizadas como estímulo, a la tecnología de simulación de altitud y a la diferencia en el tiempo de exposición utilizado por sesión. Autores como Katayama, *et al*<sup>30</sup> especulan sobre el tiempo óptimo de exposición a la hipoxia para que suponga un estímulo suficiente para incrementar la eritropoyesis. Además Rodríguez, *et al*<sup>8</sup> afirman que la dosis mínima para que la sesión de hipoxia sea un estímulo que supere el umbral de adaptación y produzca una reacción aguda o incremento de eritropoyetina es de 90 min.

Estudios de Katayama, *et al*<sup>28</sup> concluyen que la exposición a hipoxia intermitente en sesiones de una hora de duración, producen las mismas adaptaciones que sesiones de 3 horas de duración. Estudios como el de Hellemans<sup>11</sup> o Julian, *et al*<sup>17</sup> utilizan sesiones de 60 min de duración, aplicando protocolos similares al de nuestra investigación y obteniendo mejoras en variables hematológicas.

Con todos estos estudios podemos afirmar que la duración de la sesión es un factor clave. El aumento del tiempo de exposición a hipoxia, como estímulo para el incremento de la eficacia del transporte de oxígeno a los músculos, podría generar efectos positivos sobre los ciclistas de nuestro estudio, ya que la escasa duración de las sesiones no produce cambios aparentes en el sistema cardiorrespiratorio y metabólico<sup>7</sup>. Por otro lado, hay que tener en cuenta el nivel de entrenamiento de la muestra, ya que en sujetos poco entrenados aumenta el tiempo de adaptación a las condiciones de menor disponibilidad de oxígeno<sup>7</sup>, lo cual podría afectar de forma directa a los sujetos de nuestro estudio, los cuales estaban muy entrenados. Por lo tanto, el estímulo hipóxico no es suficiente para producir adaptaciones en los organismos de los ciclistas estudiados, lo que hace que encontremos resultados similares entre el GH y el GC.

Parecen claramente descritas las vías de modulación y adaptación del sistema de transporte de oxígeno, utilizado para incrementar el rendimiento a nivel del mar, por el aumento de la

capacidad de transportar oxígeno en la sangre<sup>4</sup>. Sin embargo, estos cambios suelen ser siempre pequeños, ya que éste 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 afecta a los parámetros hematológicos y al rendimiento deportivo, sino que es igualmente favorable en los procesos de recuperación de esfuerzos interválicos o sucesivos, así como en la asimilación de elevadas cargas de entrenamiento<sup>36</sup> a la vez que mejora la salud y calidad de vida de las personas que utilizan estos programas.

La aplicabilidad de este tipo de programas de hipoxia intermitente se orientan a la pre-aclimatación a altitudes extremas de alpinistas y a la mejora del rendimiento y capacidad física tal como se ha observado en estudios previos<sup>7,33,45-46</sup>. Además tiene una aplicación relacionada con la mejora de la condición física y la salud de sujetos sedentarios, activos y con diversas patologías<sup>47</sup>.

## CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los datos hematológicos obtenidos en la muestra investigada, la aplicación

de este programa de hipoxia intermitente no incrementa las variables hematológicas determinantes para la eritropoyesis y que derivan en un aumento del rendimiento en ciclistas entrenados. No existen diferencias significativas entre el GH y GC para determinar que el programa de IHE utilizado provoca efectos beneficiosos en los ciclistas en los que se aplica. El protocolo utilizado, el tamaño de la muestra y las diferencias individuales ante la aclimatación a la altura pueden interferir en estos resultados. Además, el programa descrito en el estudio no provoca en la muestra el estímulo necesario para provocar una adaptación que derive en un incremento de las variables hematológicas medidas.

También se observa que el entrenamiento exhaustivo y sistemático combinado con la exposición a hipoxia intermitente en este grupo de ciclistas incide de forma negativa sobre los parámetros sanguíneos de los deportistas, observando un descenso significativo en la variable hematocrito.

Por último, para próximos estudios sería interesante orientar este tipo de programas a otras poblaciones, como sujetos sedentarios o enfermos, para comprobar si este tipo de estímulos suponen un tratamiento efectivo para el control de procesos patológicos.

## B I B L I O G R A F Í A

1. Dick FW. Training at altitude in practice. *Int J Sports Med* 1992;13(Suppl 1):203-206.
2. Hahn AG, Gore CJ, and Martin, DT. An evaluation of the concept of living at moderate altitude and training at sea level. *Comp bioch and Phys* 2001; 128:777-789.
3. Billings CE, Bason R, Mathews DK, Fox EL. Cost of submaximal and maximal work during chronic exposure at 3,800 m. *J Appl Physiol* 1971;30(3):406-408.
4. Levine B, Stray-Gundersen J. A practical approach to altitude training: where to live and train for optimal performance enhancement. *Int J Sports Med* 1992;Suppl.1:209-212.
5. Powell FL, Garcia N. Physiological effects of intermittent hypoxia. *High Alt Med Biol* 2000;1(2):125-136.

6. **Wilber RL.** Altitude training and athletic performance: Champaign (IL): Human Kinetics, 2004.
7. **Rodríguez FA, Casas H, Casas M.** Intermittent hypobaric hypoxia stimulates erythropoiesis and improves aerobic capacity. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31:264-268.
8. **Rodríguez FA, Ventura JL, Casas M.** Erythropoietin acute reaction and haematological adaptations to short, intermittent hypobaric hypoxia. *Eur J Appl Phys* 2000;82(3):170-177.
9. **Knaupp W, Khilnani S, Sherwood J, Schraf S, Steinberg H.** Erythropoietin response to acute normobaric hypoxia in humans. *J Appl Phys* 1992;73(3):837-840.
10. **Eckardt KU, Boutellier U, Kurtz A, Schopen M, Koller EA, Bauer C.** Rate of erythropoietin formation in humans in response to acute hypobaric hypoxia. *J Appl Physiol* 1989;66(4):1785-1788.
11. **Hellems J.** Intermittent hypoxic training: a pilot study. Proceedings of the Second Annual International Altitude Training Symposium 1999:145-154.
12. **Abellan R, Remacha AF, Ventura R, Sarda MP, Segura J, Rodríguez FA.** Hematologic response to four weeks of intermittent hypobaric hypoxia in highly trained athletes. *Haematologica* 2005;90(1):126-127.
13. **Ricart A, Casas H, Casas M, Pages T, Palacios L, Rama R, et al.** Acclimatization near home? Early respiratory changes after short-term intermittent exposure to simulated altitude. *Wilderness Environ Med* 2000;11(2):84-88.
14. **Frey WO, Zenhausem R, Colmbani PC.** Influence of intermittent exposure to normobaric hypoxia on hematological indexes and exercise performance. *Med Sci Sports Exerc* 2000;Suppl 32(5):S65.
15. **Tan A, Urquhart G.** Changes in haematological indices and swimming performance after intermittent normobaric hypoxia exposure. *Br J Sports Med* 2010;44(14).
16. **Rodríguez FA, Murio J, Ventura JL.** Effects of intermittent hypobaric hypoxia and altitude training on physiological and performance parameters in swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 2003;35:115.
17. **Julian CG, Gore CJ, Wilber RL, Daniels JT, Fredericsson M, Stray-Gundersen J, et al.** Intermittent normobaric hypoxia does not alter performance or erythropoietic markers in highly trained distance runners. *J Appl Phys*. 2004;96:1800-1807.
18. **Tadibi V, Dehnert C, Menold E, Bartsch P.** Unchanged anaerobic and aerobic performance after short-term intermittent hypoxia. *Med Sci Sports Exerc* 2007;39(5):858-864.
19. **Ramos DJ, Martínez F, Rubio JA, Esteban P, Mendizábal S, Jiménez JF.** Modificaciones en parámetros fisiológicos tras un programa de hipoxia intermitente en sujetos entrenados y no entrenados. *J Sport Health Res* 2010;2(2):151-166.
20. **Ramos DJ, Rubio JA, Mendizábal S, Martínez F, Esteban P, Jiménez JF.** Efectividad de un programa de hipoxia intermitente de 8 semanas de duración en ciclistas elite. *Arch Med Deporte* 2009;26(131):202.
21. **Matveiev LP.** Fundamentos del entrenamiento deportivo. Moscú, 1985.
22. **Banister EW. Modeling elite athletic performance.** In: **Green HJ, McDougal JD, Wenger H, editors.** Physiological testing of elite athletes.: Champaign, IL. Human Kinetics., 1991:403-24.
23. **Padilla S, Mujika I, Orbañanos J, Angulo F.** Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling. *Med. Sci Sports Exerc.* 2000;32:850-856.
24. **Padilla S, Mujika I, Orbañanos J, Santisteban J, Angulo F, Goirena JJ.** Exercise intensity and load during mass-start stage races in professional road cycling. *Med. Sci Sports Exerc.* 2001;33:796-802.
25. **Rodríguez-Marroyo JA, García-López J, Ávila C, Jiménez JF, Córdova A, Villa-Vicente JG.** Influencia de la altitud moderada en el esfuerzo realizado por ciclistas profesionales. *Arch Med Deporte* 2002;19(90):289-295.
26. **Stray-Gundersen J, Chapman R, Levine B.** "Living high-training low" altitude training improves sea level performance in male and female elite runners. *J Appl Phys* 2001;91:1113-1120.
27. **Bonetti DL, Hopkins WG, Lowe TE, Boussana A, Kilding AE.** Cycling performance following adaptation to two protocols of acutely intermittent hypoxia. *Int J Sports Physiol Perform* 2009;4(1):68-83.
28. **Katayama K, Ishida K, Iwasaki K, Miyamura M.** Effect of two durations of short-term intermittent hypoxia on ventilatory chemosensitivity in humans. *Eur J Appl Physiol* 2009;105(5):815-821.
29. **Karlsen T, Madsen O, Rolf S, Stray-Gundersen J.** Effect of 3 weeks hypoxic interval training on

- sea-level cycling performance and haematological parameters. *Med. Sci Sports Exerc.* 2002;34(5):224.
30. **Katayama K, Matsuo H, Ishida K, Mori S, Miyamura M.** Intermittent hypoxia improves endurance performance and submaximal exercise efficiency. *High Alt. Med. Biol* 2003;4(3):291-304.
31. **Eckardt K, Boutellier U, Kurtz A, Schopen M, Koller E, Bauer C.** Rate of erythropoietin in humans in response to acute hypobaric hypoxia. *J Appl Phys.* 1989;66(4):1785-1788.
32. **Klaursen K, Robinson S, Micahel ED.** Effect of high altitude on maximal working capacity. *J Appl Phys* 1996;21(4):1191-1194.
33. **Casas M, Casas H, Pages T, Ventura JL, Ricart A, Ibañez J, et al.** Effect of intermittent exposure to hypobaric hypoxia and exercise on human physical performance. *J Physiol Biochem* 1997;53:160.
34. **Eklblom B, Berglund B.** Effect of erythropoietin administration on maximal aerobic power. *Scand J Med Sci Sports* 1991;1:88-93.
35. **Eklblom B.** Blood doping, erythropoietin and altitude. In: Reilly T, Orme M, editors. *The clinical pharmacology of sports and exercise.* Amsterdam: *Excerpta Medica.*, 1997:199-212.
36. **Rodas G, Parra J, Sitja J, Arteman J, Viscor G.** Efecto de un programa combinado de entrenamiento físico e hipoxia hipobárica intermitente en la mejora del rendimiento físico de triatletas de alto nivel. *Apunts.* 2004;144:5-10.
37. **Lundby C, Nielsen T, Dela F.** The influence of intermittent altitude exposure to 4100 m on exercity and blood capacity and blood variables. *Scand J Med Sci Sports* 2005;15:182-187.
38. **Vallier JM, Chateau P, Guezennec CY.** Effects of physical training in a hypobaric chamber on the physical performance of competitive triathletes. *Eur. J Appl. Physiol* 1996;21:73-80.
39. **Kreider RB, Fry AC, O'Toole ML.** Overtraining and overreaching in sport: terms, definitions, and prevalence. *Overtraining in Sport.*: Champaign, IL, Human Kinetics., 1998:VII-IX.
40. **Czajkowski W.** A simple method to control fatigue in endurance training,. In: Komi P, Nelson RA, Morehouse C, editors. *Exercise and Sport Biology.*: Human Kinetics Publishers., 1982:207-12.
41. **Barbeau P, Serresse O, Boulay MR.** Using maximal and submaximal aerobic variables to monitor elite cyclist during a season. *Med. Sci Sports Exerc.* 1993;25(9):1062-1069.
42. **Banfi G, Lundby C, Robach P, Lippi G.** Seasonal variations of haematological parameters in athletes. *Eur J Appl Physiol* 2011;111(1):9-16.
43. **Nuviala R, Abos D, González E, Giner A.** Valoración de las deficiencias de hierro en corredores de fondo y ciclistas. *Arch Med Deporte* 1988;5(17):11-16.
44. **Morkeberg JS, Belhage B, Damsgaard R.** Changes in blood values in elite cyclist. *Int J Sports Med* 2009;30(2):130-138.
45. **Burtscher M, Brandstatter E, Gatterer H.** Preacclimatization in simulated altitudes. *Sleep Breath* 2008;12(2):109-114.
46. **Rodríguez FA, Truijens M, Townsend N, Stray-Gundersen J, Gore J, Levine BD.** Performance of runners and swimmers after four weeks of intermittent hypobaric hypoxic exposure plus sea level training. *J Appl Phys.* 2007;103:1523-1535.
47. **Burtscher M, Pachinger O, Ehrenbourg I, Mitterbauer G.** Intermittent hypoxia increases exercise tolerance in elderly men with and without coronary artery disease. *Int J. Cardiol* 2004;96:247-254.