



Potenciales aplicaciones de la hipoxia intermitente: individualización del entrenamiento anaeróbico

Jesús Álvarez Herms

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



FACULTAT DE BIOLOGIA

DEPARTAMENT DE FISIOLOGIA I IMMUNOLOGIA

**POTENCIALES APLICACIONES DE LA
HIPOXIA INTERMITENTE:
INDIVIDUALIZACIÓN DEL
ENTRENAMIENTO ANAERÓBICO.**

TESIS DOCTORAL

Jesús Álvarez Herms

POTENCIALES APLICACIONES DE LA HIPOXIA INTERMITENTE: INDIVIDUALIZACIÓN DEL ENTRENAMIENTO ANAERÓBICO.

Memoria presentada por

Jesús Álvarez Herms

Para optar al Grado de

Doctor por la Universidad de Barcelona

Tesis realizada bajo la dirección del Dr. Ginés Viscor Carrasco del Departamento de Fisiología i Immunología, y del Dr. Francisco Corbi Soler INEFC Centre de Lleida.

Adscrita al programa de doctorado en Fisiología de la Universidad de Barcelona.

Ginés Viscor Carrasco

Francisco Corbi Soler

Jesús Álvarez Herms

Barcelona, 2014

AGRADECIMIENTOS

Los grandes éxitos no los debemos medir de manera cuantitativa porque la realidad de la que parte cada uno es distinta.

Independientemente de mis conocimientos adquiridos a través de este trabajo; he aprendido a valorar la motivación aferrándome a ella; coexistir con la duda razonable; aspirar a la ambición para ser mejor; disfrutar de la felicidad y la realización personal, sufrir la soledad de la ignorancia; desear huir de la impotencia. Todas estas sensaciones personales poco tienen que ver con la tremenda gratitud que siento al pensar en mis mentores: Ginés Viscor, Teresa Pagès y Francesc Corbi. Sin ellos habría sido imposible conseguir llegar a este punto.

Agradecer a mis padres, Mariano y Nuria, por ayudarme a crecer, ser y querer vivir feliz cumpliendo mis sueños. Ellos me han aportado el amor, la educación, el apoyo, y la disciplina necesaria para llegar a este fin. Son los verdaderos arquitectos de mí mismo.

No deseo olvidar a Julio Álvarez, entrenador, amigo y profesor que me puso en la senda del camino correcto. También a Ricard, por su amistad, ánimo, respeto y confianza.

Poco puedo expresar con palabras lo que significa para mí esa mujer, amiga y compañera en mí día a día. Mucho pueden decir los que la conocen y por ello, las palabras aquí sobran. A tí te quiero dedicar las últimas palabras de este texto. Son tuyas.

A todos aquellos que han seguido mis pasos, me han escuchado y se han dejado guiar por mi experiencia. Sin nombres pero con imágenes en mi memoria.

“- Si he llegado hasta aquí... ¿porqué no un poco más? “

ABREVIATURAS

En esta tesis doctoral se han utilizado acrónimos correspondientes a la terminología anglosajona con la finalidad de utilizar la nomenclatura internacional.

AMP: adenosinmonofosfato

AMPK: adenosinmonofosfato quinasa

ATP: adenosintrifosfato

CMJ: salto en contramovimiento

CMJ60: salto en contramovimiento durante 60 segundos

CO₂: dióxido de carbono

EPO: eritropoyetina

FC: frecuencia cardíaca

F_iO₂: fracción inspirada de oxígeno

HH: hipoxia hipobárica

HIF – 1: factor inducible por hipoxia

H₂: hidrógeno

H⁺: hidrogenión (protón)

IHE: exposición intermitente a hipoxia

IL1: interleuquina 1

JJOO: Juegos Olímpicos

LH- TH: Living High – Training High (vivir en altitud – entrenar en altitud)

LH-TL: Living High – Training Low (vivir en altitud – entrenar en baja altitud)

LL – TH: Living Low – Training High (vivir en baja altitud – entrenar en altitud)

mmHg: milímetros de mercurio

mmol/L: milimoles por litro

Mg: magnesio

mU/ml: miliunidades por mililitro

NH: hipoxia normobárica

NT: entrenamiento en normoxia

Pao₂: presión parcial de oxígeno arterial

PB: presión barométrica

pH: potencial de hidrógeno

O₂Hb: concentración de oxihemoglobina

p: valor estadístico que describe la probabilidad

PFK: fosfofructoquinasa

PGC - 1 α : receptor peroxisomaproliferador – activado gamma coactivador – 1 .alpha

PiO₂: presión inspirada de oxígeno

SaO₂: saturación arterial de oxígeno

VEGF: factor de crecimiento vascular endotelial

TNF α : factor de necrosis tumoral – alpha

VFC: variabilidad de la frecuencia cardíaca

VO₂max: consumo máximo de oxígeno

W: vatios (medida de potencia de fuerza)

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	3
ABREVIATURAS.....	5
CONTENIDO.....	7
INTRODUCCIÓN.....	9
CONTEXTO.....	11
PRINCIPIOS DEL ENTRENAMIENTO DEPORTIVO	12
HIPOTESIS DE ESTUDIO	14
PARTE 1: RENDIMIENTO ANAERÓBICO.....	15
RENDIMIENTO ANAERÓBICO: DEFINICIÓN Y MEDICIÓN	15
¿PORQUÉ REALIZAR EL ENTRENAMIENTO DE FUERZA EN HIPOXIA INTERMITENTE? INTERÉS E HIPÓTESIS DE ESTUDIO	16
PARTE 2: ¿POR QUÉ PUEDE CONTRIBUIR EL ENTRENAMIENTO DE LA FUERZA EN HIPOXIA INTERMITENTE PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO ANAERÓBICO?.....	20
1.1. DEFINICIÓN DE HIPOXIA Y TIPOS.....	21
1.2. INTERÉS CIENTÍFICO POR EL EFECTO DE LA HIPOXIA EN EL RENDIMIENTO FÍSICO HUMANO.....	23
1.3. RESPUESTA ORGÁNICA ANTE LA EXPOSICIÓN A HIPOXIA.....	25
1.3.1. Efectos de la hipoxia en la fatiga: central y periférica. ¿Como puede afectar en ella el entrenamiento intensivo en hipoxia?	26
1.3.2. Efecto de la hipoxia sobre los sistemas corporales.....	29
1.3.2.1. Sistema cardiorrespiratorio.....	30
1.3.2.2. Respuestas sanguíneas.....	32
1.3.2.3. Sistema muscular	34
1.3.2.4. Metabolismo	36
1.3.2.5. Cambios en la expresión de genes	37
1.3.2.6. Respuestas individuales frente a las condiciones de hipoxia.....	38

1.3.2.7. Rendimiento deportivo	41
OBJETIVOS.....	45
INFORME DEL DIRECTOR DE LA TESIS DOCTORAL SOBRE EL IMPACTO DE LAS PUBLICACIONES	47
PUBLICACIONES.....	55
DISCUSIÓN GENERAL.....	57
CONCLUSIONES	71
BIBLIOGRAFIA.....	75
ANEXOS	97
ANEXO 1	99
ANEXO 2:	108
ANEXO 3	111

INTRODUCCIÓN

CONTEXTO

La mayoría de los deportes involucran tanto el metabolismo aeróbico como el anaeróbico para generar energía. Sin embargo, considerando la intensidad del ejercicio realizado, los deportes con un predominio de rendimiento anaeróbico requieren una estructura de entrenamiento mucho más intensa y específica. Esta especialización incluye la programación del entrenamiento de fuerza como un factor determinante del rendimiento final en todos los deportes. Durante acciones muy breves e intensas se activa principalmente la vía de los fosfágenos (anaeróbica aláctica). Sin embargo, cuando estas acciones son constantes y repetidas en el tiempo (intervalos) se produce una acumulación de fatiga periférica (muscular) aumentando la activación de la glucólisis anaeróbica y reduciendo la intensidad de ejercitación y el rendimiento deportivo.

De este modo, el objetivo del entrenamiento en los deportes predominantemente anaeróbicos incluye: a) limitar en la medida de lo posible la influencia de la fatiga periférica (muscular) en la contracción muscular mejorando los procesos metabólicos y la capacidad de tolerancia a los metabolitos derivados de la glucólisis anaeróbica, b) mejorar la eficacia de las contracciones musculares máximas a través del entrenamiento de fuerza específica en cada disciplina, c) mantener un alto nivel de especificidad del entrenamiento que se asemeje lo máximo posible a la competición, incluyendo actividades máximas y supramáximas, d) individualizar al máximo la carga de entrenamiento en base a la propia respuesta y la recuperación de los entrenamientos de carácter intensivo y e) incrementar el nivel de estimulación sistémica y física a medida que el nivel y la experiencia del deportista aumentan.

En base a estos objetivos, este trabajo ha valorado la eficacia del entrenamiento de fuerza específica en condiciones de hipoxia intermitente y su influencia en el rendimiento anaeróbico. Para ello se comprobó:

- Si el entrenamiento de fuerza resistencia en condiciones de hipoxia intermitente puede ser válido para mejorar el rendimiento anaeróbico.
- Si el estímulo de entrenamiento en hipoxia provoca respuestas adaptativas a nivel metabólico (respuesta del lactato), cardiovascular (frecuencia cardíaca) y sobre el sistema nervioso autónomo (respuesta simpático-vagal).

- Si la intensidad realizada durante ejercicios de fuerza resistencia es equivalente en condiciones de hipoxia y normoxia.

PRINCIPIOS DEL ENTRENAMIENTO DEPORTIVO

La teoría del entrenamiento deportivo establece una serie de principios que ordenan y clarifican la aplicación del proceso de entrenamiento para maximizar el rendimiento deportivo (ver Tabla 1) ¹.

Principios del entrenamiento deportivo						
Unidad funcional	Especificidad	Sobrecarga	Supercompensación	Continuidad	Recuperación	Individualidad
Entrenamiento de todos los sistemas a la vez y su interacción.	Entrenamiento lo más parecido posible a la competición (física y fisiológicamente).	Cargas suficientemente adecuadas para crear variaciones en la homeostasis.	Equilibrio entre las cargas específicas, intensivas y de recuperación.	La aplicación de estímulos debe ser regular.	Para obtener los beneficios de los procesos de carga.	Las respuestas en cada persona son únicas. Los estímulos deben adaptarse a estas respuestas

Tabla 1. Principios básicos de la Teoría del Entrenamiento deportivo

En base a los principios descritos:

- a) El principio de especificidad deportiva describe como los estímulos soportados durante el entrenamiento deben producir respuestas positivas en base a ser suficientemente relevantes y adecuados a la propia disciplina deportiva ².
- b) A lo largo de la preparación anual y en la vida del deportista, la orientación de la carga de entrenamiento se incrementa desde objetivos generales a específicos respetando el principio de sobrecarga ².
- c) A medida que aumenta el nivel y la edad del deportista, su entrenamiento tiende a incrementarse en intensidad y especificidad con el objetivo principal de estimular en un rango máximo todos los sistemas corporales que ya tienen un umbral cada vez más alto de rendimiento.
- d) La programación del entrenamiento tiene que seguir una continuidad en sus estímulos respetando la recuperación y la individualidad.

e) Métodos que incrementan el nivel de especificidad e intensidad son útiles para mejorar las respuestas adaptativas sistémicas y física en los deportistas entrenados.

En referencia al punto e): la exposición a hipoxia en los abajeños, incrementa el estímulo soportado a nivel metabólico (anaeróbico) e implica un cambio en el nivel de especificidad de los sistemas: neuromuscular, cardiorrespiratorio y vascular ³. Además, en base a los principios expuestos de la teoría de entrenamiento este método respeta:

- *El principio de unidad funcional*; porque las condiciones de hipoxia incrementan la respuesta fisiológica simultánea en varios sistemas orgánicos (metabólico, cardiovascular, respiratorio, muscular).

- *El principio de especificidad*; porque a nivel metabólico se requiere una mayor participación del metabolismo anaeróbico para generar energía (tanto en reposo como en actividad) implicando respuestas específicas sobre dicho sistema.

- *El principio de sobrecarga*; porque la introducción de ciclos de entrenamiento en hipoxia pueden contribuir a crear un mayor ajuste a nivel homeostático que el propio entrenamiento en normoxia.

- *El principio de individualidad*; porque en base a la propia respuesta individual, el nivel deportivo y la edad, el entrenamiento intensivo en hipoxia puede tener potenciales beneficios en algunos sujetos respondedores a la hipoxia.

HIPOTESIS DE ESTUDIO

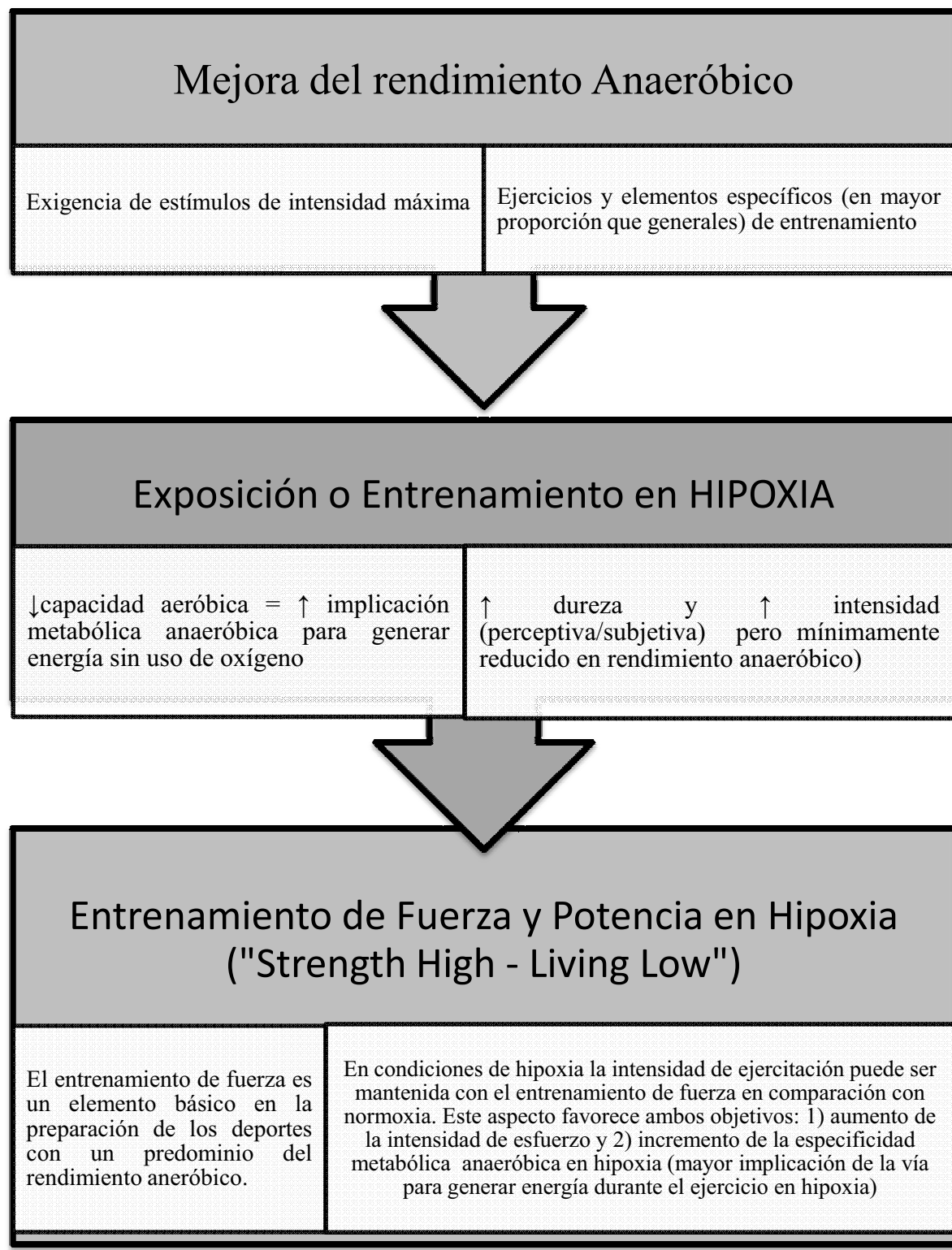


Figura 1. Esquema resumen de la hipótesis de estudio.

PARTE 1: RENDIMIENTO ANAERÓBICO

RENDIMIENTO ANAERÓBICO: DEFINICIÓN Y MEDICIÓN

El concepto anaeróbico hace referencia a la capacidad de vivir sin presencia de oxígeno libre o aire ⁴. Durante la actividad física, tanto en condiciones de hipoxia como en normoxia, se relaciona con las condiciones fisiológicas en las cuales los procesos de absorción y transporte de oxígeno están deteriorados provocando que la producción de energía a nivel muscular sea sin presencia de oxígeno. Precisamente el concepto de déficit de oxígeno fue el primer término atribuido a la definición de capacidad anaeróbica ⁵ y posteriormente modificado incluyendo los componentes láctico y aláctico ⁶ como residuo metabólico asociado a la glucólisis. Sin embargo, desde estos estudios iniciales hasta el presente, muchos investigadores han definido la capacidad anaeróbica desde visiones diferentes ⁷ sin llegar a una definición universalmente aceptada por todos e incluso poniendo en duda que el substrato energético sea el principal factor limitante del rendimiento físico ⁸⁹.

El proceso de medición del rendimiento anaeróbico incluye la valoración de la potencia o la capacidad máxima en función de la intensidad y la duración del trabajo realizado. Estas mediciones pueden realizarse en test de laboratorio (en condiciones estables) o en trabajo de campo, midiendo específicamente el rendimiento de cada deporte ⁷. Estos test incluyen ¹⁰:

- Los *test de potencia anaeróbica* incluyen la medición de la fuerza-velocidad a través de test de valoración indirecta (carrera de 30 metros, test salto vertical - horizontal, test de lanzamientos con balón medicinal, en cicloergómetro, escaleras, etc.). Los resultados que aportan diferentes medidas pero se ha descrito que correlacionan bien entre ellos.
- Por el contrario, para medir *la capacidad anaeróbica* se valora: el déficit de oxígeno acumulado, test ergométricos máximos o en rendimiento estable midiendo el lactato acumulado. Estos test son menos concluyentes y sus resultados correlacionan menos entre sí que los de potencia anaeróbica. Además están influenciados por la efectividad del rendimiento aeróbico que participa durante su ejecución pudiendo no dar exclusivamente mediciones de la capacidad anaeróbica.

En función de la intensidad (máxima o supramáxima) y la duración de las acciones (menor o mayor de 10 segundos), el metabolismo anaeróbico puede solicitar la activación de la vía láctica o aláctica. La vía láctica utiliza casi exclusivamente glucosa como fuente de energía y su degradación se realiza sin presencia de oxígeno en el interior de la célula (glucólisis anaeróbica). En cambio, la vía aláctica utiliza prioritariamente fuentes de ATP o fosfágenos (creatina o fosfato inorgánico) siendo estas limitadas a un período muy breve (6-8 segundos), sin presencia de oxígeno (dentro del sarcoplasma de las células) y con una producción mínima de metabolitos ¹¹.

En base al principio de especificidad e intensidad, anteriormente descrito (ver Tabla 1), en condiciones de hipoxia, la menor capacidad de absorción y utilización de oxígeno en condiciones de hipoxia incrementa la intensidad relativa de esfuerzo ¹² y aumenta la degradación de los depósitos de glucógeno ¹³. Todo este proceso aumenta el grado de desequilibrio en la producción de energía muscular ¹⁴ debido posiblemente a un efecto directo sobre el hígado ¹⁵ o a los niveles plasmáticos más altos de epinefrina. También aumenta el flujo sanguíneo ¹⁶ y el transporte de glucosa hacia el músculo para su almacenamiento ¹⁷.

¿PORQUÉ REALIZAR EL ENTRENAMIENTO DE FUERZA EN HIPOXIA INTERMITENTE? INTERÉS E HIPÓTESIS DE ESTUDIO

La fuerza es la capacidad física condicional más determinante en el rendimiento deportivo porque está involucrada en el desarrollo de todos los movimientos ¹⁸. Komi et al ¹⁹ definió la fuerza en base a todos aquellos cambios o tendencias que afectan al estado de reposo, al movimiento o al cambio de movimiento a reposo. El trabajo físico realizado es equivalente a la fuerza expresada a través del desplazamiento sin limitación en el tiempo y se define por la intensidad de sus acciones y su duración. Estos parámetros (intensidad y duración) definen metabólicamente la energía obtenida para producir un tipo u otro de fuerza ²⁰. Como ejemplo; la potencia muscular es la manifestación directa de la fuerza explosiva y la energía se genera mayoritariamente a través de fuentes de energía anaeróbicas. Las fibras involucradas en este tipo de contracciones son mayoritariamente de contracción rápida, mostrando una alta actividad de la miosina para la liberación de ATP y una baja densidad de mitocondrias y sarcoplasma. Este tipo de acciones se repiten constantemente en los deportes colectivos (acciones como aceleraciones máximas, cambios de dirección, saltos verticales,

acciones de remate, etc.) favoreciendo la acumulación de fatiga por la recuperación incompleta entre ellas y la acumulación de metabolitos ²¹.

Distinguimos diferentes manifestaciones de la fuerza ¹⁹:

- *Fuerza máxima*; cuando la fuerza a vencer sea alta y la acción única o no repetida en breve tiempo (p.ej. una máxima repetición en una prueba de halterofilia).

- *Fuerza explosiva o potencia*; la resistencia a vencer es moderada, con duración corta pero a altas velocidades de ejecución (p.ej. saltos repetidos, lanzamientos o elementos gimnásticos) y comprende a su vez 3 tipos: potencia explosiva, máxima potencia y potencia resistencia.

- *Fuerza resistencia*; cuando el tiempo de mantenimiento de la contracción en oposición a la fuerza sea largo con una carga a vencer baja, se manifestará la fuerza resistencia.

El entrenamiento de la fuerza en el deporte debe ser lo más específico posible en relación al tipo de deporte y a las acciones realizadas. La mejora de los parámetros de fuerza específica implica una mejora en la eficacia de las acciones porque la influencia de la fatiga es proporcionalmente menor. Se ha demostrado cómo la mejora de la fuerza explosiva correlaciona directamente con la mejora en el rendimiento específico deportivo incluso en pruebas de resistencia aeróbica ²².

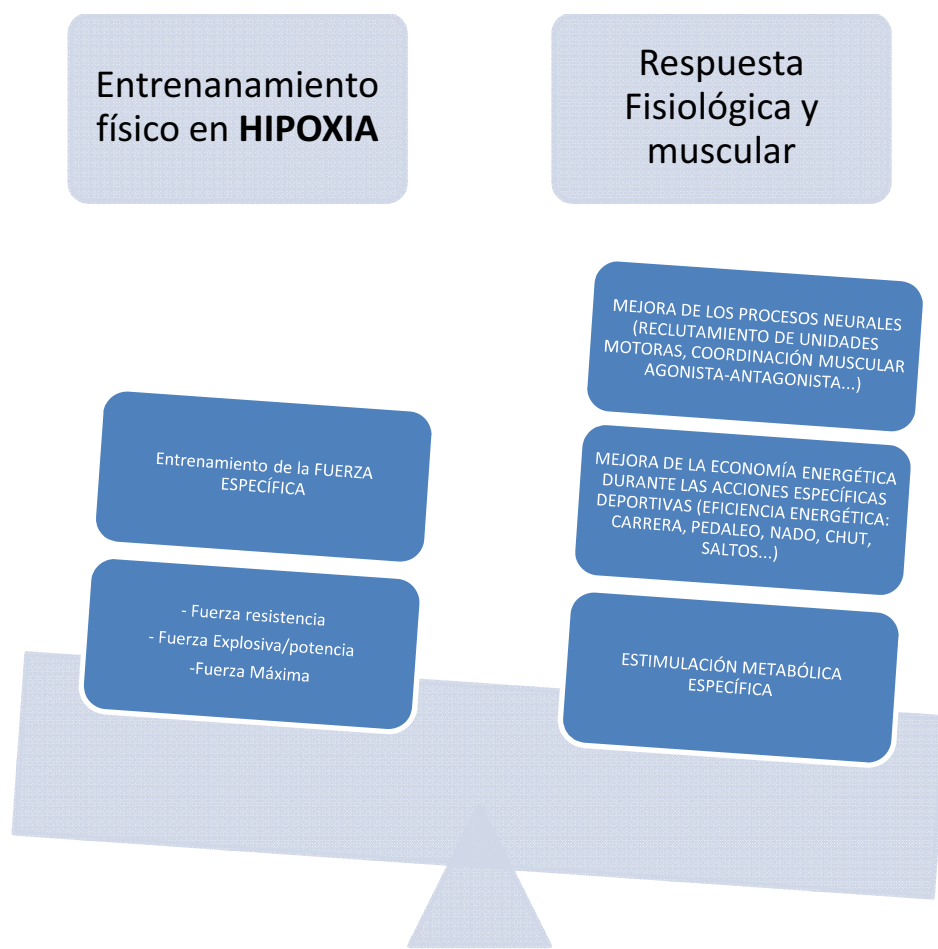


Figura 2. Esquema descriptivo del entrenamiento de fuerza en hipoxia y los objetivos fisiológicos implicados.

Cuantitativamente, Bailey ²³ describió la evolución del número de estudios existentes sobre el rendimiento deportivo y la hipoxia, destacando marcadamente el interés creciente desde 1990 hasta la actualidad. Existen 3 métodos bien descritos y aplicados con rigor científico diferenciando entre la hipoxia crónica (estancias de larga duración, viviendo y entrenando) e intermitente (periodos cortos viviendo o entrenando) ²⁴:

- “Live High-Training High” (hipoxia crónica en altitud natural)
- Métodos de exposición y entrenamiento en altitud simulada:
 - o 1) “Live High-Training Low” ²⁵.
 - o 2) “Live Low-Training High” ²⁶.

En base al trabajo planteado, la utilización de un protocolo de entrenamiento de fuerza en hipoxia intermitente nos puede aportar un aumento de la intensidad relativa de esfuerzo y un incremento en el nivel de estimulación sistémica a varios niveles. Además, los protocolos de entrenamiento en hipoxia intermitente tienen el beneficio de evitar los

inconvenientes de las estancias prolongadas (deficiencias cognitivas, atrofia muscular, pérdida de peso, fatiga, alteraciones en el sueño, estrés oxidativo, etc.) ²⁷. Para reproducir las condiciones de la altitud simulada intermitente se utilizan las cámaras hipobáricas y normobáricas. Estudios previos han descrito beneficios con este tipo de entrenamiento en el rendimiento anaeróbico ^{28,29} pero no con métodos de entrenamiento de fuerza específica. La realización de este trabajo ha pretendido dar respuesta a diferentes cuestiones importantes para validar el uso de este método:

- ¿Diferentes condiciones de hipoxia afectan el rendimiento físico anaeróbico? ¿Existe una reducción de la potencia de fuerza generada en hipoxia en comparación con normoxia?
- ¿El entrenamiento de fuerza tiene una transferencia real al rendimiento específico en base a la mayor estimulación fisiológica soportada en hipoxia?
- A nivel metabólico, ¿que ocurre con la respuesta láctica, cardíaca o neural?

Con el objetivo de dar respuesta a estas preguntas se han diseñado una serie de estudios llevados a cabo durante la realización de esta tesis doctoral (Figura 2).

PARTE 2: ¿POR QUÉ PUEDE CONTRIBUIR EL ENTRENAMIENTO DE LA FUERZA EN HIPOXIA INTERMITENTE PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO ANAERÓBICO?

El entrenamiento intermitente en hipoxia puede contribuir a potenciar el metabolismo anaeróbico siempre que la intensidad realizada sea equivalente a las condiciones de normoxia³⁰. Esta mejora se base en³¹:

- Un aumento de la intensidad relativa de esfuerzo que contribuye a crear respuestas adaptativas específicas a nivel del músculo esquelético.
- Un incremento de la especificidad del estímulo metabólico soportado (anaeróbico) que favorece la utilización de glucógeno como fuente energética y una mayor tolerancia a los residuos producidos.

Diferentes estudios han concluido como el rendimiento anaeróbico puede ser mantenido o ligeramente reducido en condiciones de hipoxia moderada en comparación con normoxia³²⁻³⁵. En un meta-análisis realizado durante su tesis doctoral, Wortman³⁶ concluye que el entrenamiento máximo y supramáximo (de carácter anaeróbico) realizado en condiciones de hipoxia intermitente es un método válido para mejorar el rendimiento anaeróbico. Para ello se debería aplicar un método de entrenamiento con las siguientes pautas:

- Realizar un ciclo mínimo de 15 días de entrenamiento.
- Altitud de entrenamiento entre 2500-3000 metros (simulada o real).
- Duración mínima de 97 minutos por sesión durante 6 días a la semana.
- La intensidad mínima del ejercicio debe ser superior al 60-65% del VO₂max. Menor intensidad no causa efecto. Pre-requisito que se mantenga intensidad idéntica o similar a las condiciones de normoxia.
- El rendimiento máximo se alcanzaría a los 8 días posteriores al último entrenamiento en condiciones de hipoxia.

1.1. DEFINICIÓN DE HIPOXIA Y TIPOS

El término **hipoxia** se define como cualquier combinación de presión reducida barométrica (PB) y / o una reducción de la fracción inspirada de oxígeno (FIO₂) que finalmente resulta en una presión inspirada de oxígeno (PiO₂) menor de 150 mmHg³⁷. Ante estas condiciones el organismo responde desencadenando mecanismos de aclimatación³⁸ pudiendo ser eficientes o no. Se pueden generar condiciones de hipoxia artificial a través de la hipoxia hipobárica (HH; FIO₂ = 20,9%; PB <760 mmHg) y normobárica (NH; FIO₂ <20%; PB = 760 mmHg)³⁹ (Figura 3). No existe un consenso claro sobre las posibles diferencias existentes entre ambas en relación con la altitud natural. Recientes investigaciones que han valorado: la ventilación, el balance de fluidos, el metabolismo del óxido nítrico y el rendimiento deportivo, han concluido que la hipoxia hipobárica produce un estímulo más intenso que la normobárica provocando respuestas fisiológicas más agresivas⁴⁰.

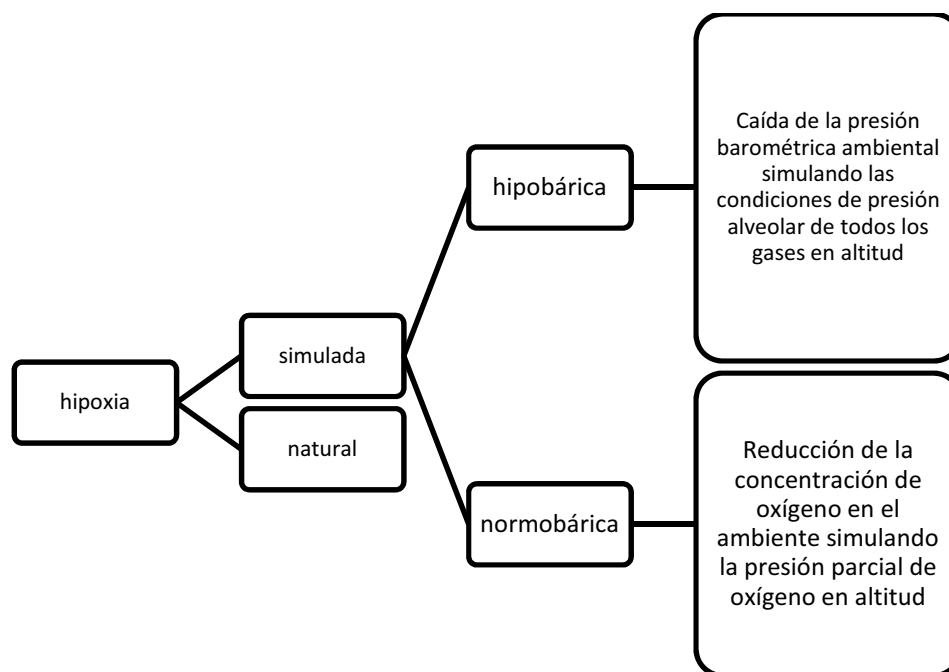


Figura 3. Tipos de hipoxia (real y simulada)

A medida que las condiciones de hipoxia aumentan se reduce la capacidad de absorción de oxígeno y existe proporcionalmente un descenso en el rendimiento físico humano de manera global. Esta reducción en la eficacia del metabolismo aeróbico en condiciones de hipoxia contribuye a requerir una mayor implicación del metabolismo anaeróbico para generar energía tanto en condiciones de reposo ⁴¹ como durante ejercicio físico ⁴² (Figura 4). Wehrlin and Hallen et al ⁴³ describieron este proceso fijando esta reducción en un 6,3% menos en el máximo consumo de oxígeno y un descenso de la saturación de oxígeno de 5,5% cada 1000 metros. La propia variabilidad y respuesta individual a la hipoxia puede reducir o aumentar estos niveles en base a los mecanismos de aclimatación desencadenados.

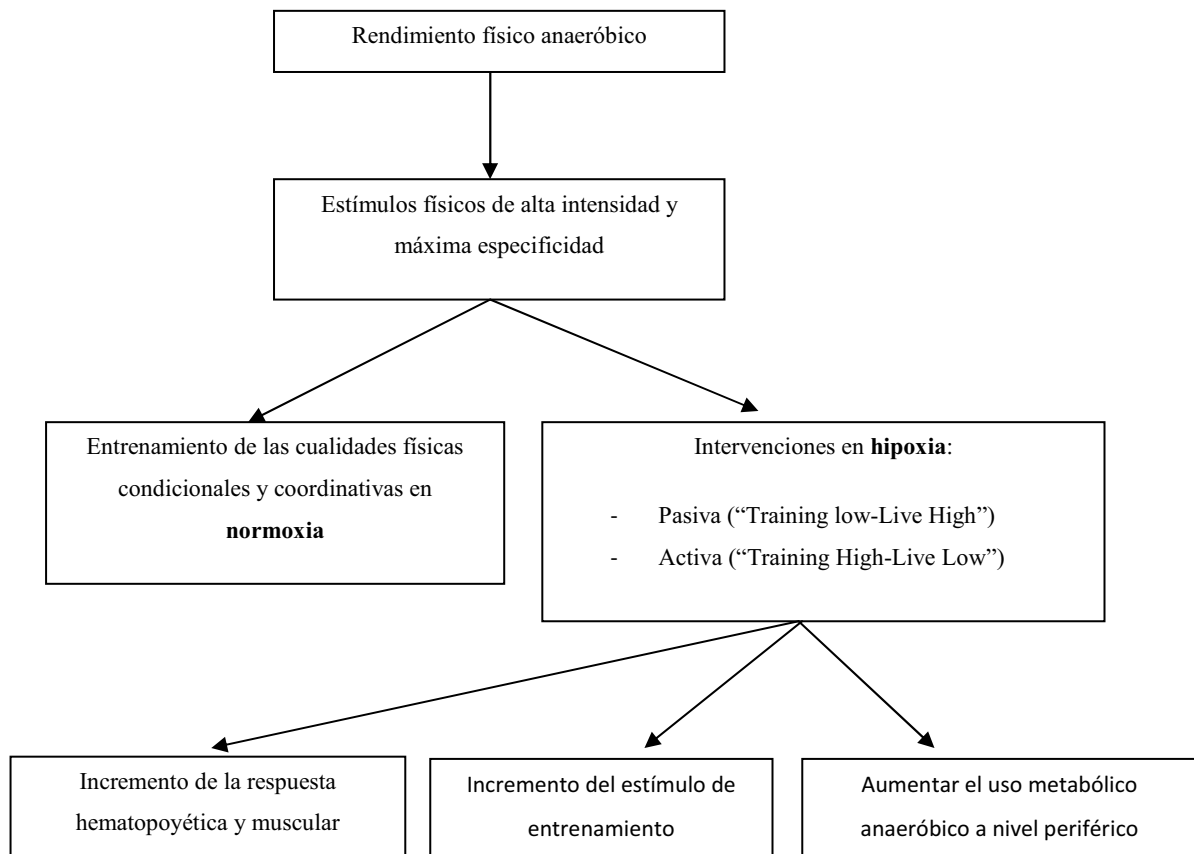


Figura 4. Objetivos del entrenamiento anaeróbico en condiciones de hipoxia.

Puntos clave:

- Las condiciones de hipoxia dificultan la capacidad fisiológica de absorber oxígeno ambiental y pueden ser sufridas de manera natural o artificial (hipobárica y normobárica).
- A medida que las condiciones de hipoxia aumentan, existe un gradual descenso de la capacidad aeróbica máxima y la saturación arterial de oxígeno lo cual limita el rendimiento físico de resistencia (principalmente aeróbica).
- Las condiciones fisiológicas desencadenadas por este proceso son más específicas para estimular el rendimiento anaeróbico, pudiendo ser utilizadas para mejorar el rendimiento vía mayor estimulación metabólica, muscular y psicológica.
- Recientes estudios en esta línea pueden popularizar el método de entrenamiento intenso, interválico e intermitente en condiciones de hipoxia.

1.2. INTERÉS CIENTÍFICO POR EL EFECTO DE LA HIPOXIA EN EL RENDIMIENTO FÍSICO HUMANO

Una destacable población de aproximadamente 150 millones de personas viven en altitudes iguales o superiores a 2500 metros ⁴⁴. En estas condiciones, sus habitantes son más susceptibles de generar altos niveles de radicales libres y oxidantes en comparación con los abajeños ⁴⁵. Debido a ello y a las actividades que se realizan en estas condiciones, ha existido un interés científico por valorar y entender las respuestas fisiológicas desencadenadas en estas condiciones.

Encontramos las primeras referencias hace 2000 años, cuando en expediciones montañistas se citaban casos de mala tolerancia a altitud y se describían los efectos que provocaba ⁴⁶. En 1913, Ravenhill fue el primero en describir el mal agudo de montaña y las causas de la formación de los edemas de pulmón y de cerebro ^{47,48}. Pese a estas dificultades de aclimatación, las diferentes poblaciones residentes en condiciones de altitud han desarrollado mecanismos fisiológicos de compensación para reducir estos

efectos adversos ⁴⁹. Por el contrario, los abajeños necesitan un proceso de aclimatación cuando se exponen a condiciones de hipoxia moderada o severa ⁵⁰.

En el campo de la investigación ha habido un crecimiento exponencial (desde la década de 1990 hasta la actualidad) en el número de estudios centrados en valorar el efecto de la exposición y entrenamiento en condiciones de hipoxia sobre el rendimiento físico ²³. Durante este proceso se ha generado amplio campo de investigación especializado que incluye terminología y conceptos propios. Durante la realización de esta tesis doctoral, se ha realizado un análisis minucioso utilizando bases de datos científicas como: www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed, incluyendo todos los estudios publicados desde 1900 hasta la actualidad. En el Anexo 1 se adjunta una lista completa de las palabras clave generadas (*keywords*) y una lista de estudios relevantes en cada época relacionados con los objetivos de este estudio (ver Anexo 2).

Puntos clave:

- Incremento exponencial en el número de estudios desde mediados del siglo XX hasta la fecha, describiendo un creciente interés.
- En condiciones de hipoxia existe un mayor estrés soportado a nivel sistémico generalizado: cardiovascular, circulatorio, metabólico y muscular que directamente están relacionados con el rendimiento físico.
- Mejora de programas de entrenamiento utilizando hipoxia con la aparición de aparatos que simulan altitud.
- Incremento de estudios científicos que describen respuestas fisiológicas específicas (hormonales, genéticas...) debido al incremento de métodos de valoración científica.
- Incremento de los estudios que valoran la especificidad de la exposición y entrenamiento en hipoxia para la mejora del rendimiento físico anaeróbico.
- Crecimiento del lenguaje científico y especializado que contribuye a crear un campo de investigación específico sobre la fisiología de la altitud

1.3. RESPUESTA ORGÁNICA ANTE LA EXPOSICIÓN A HIPOXIA

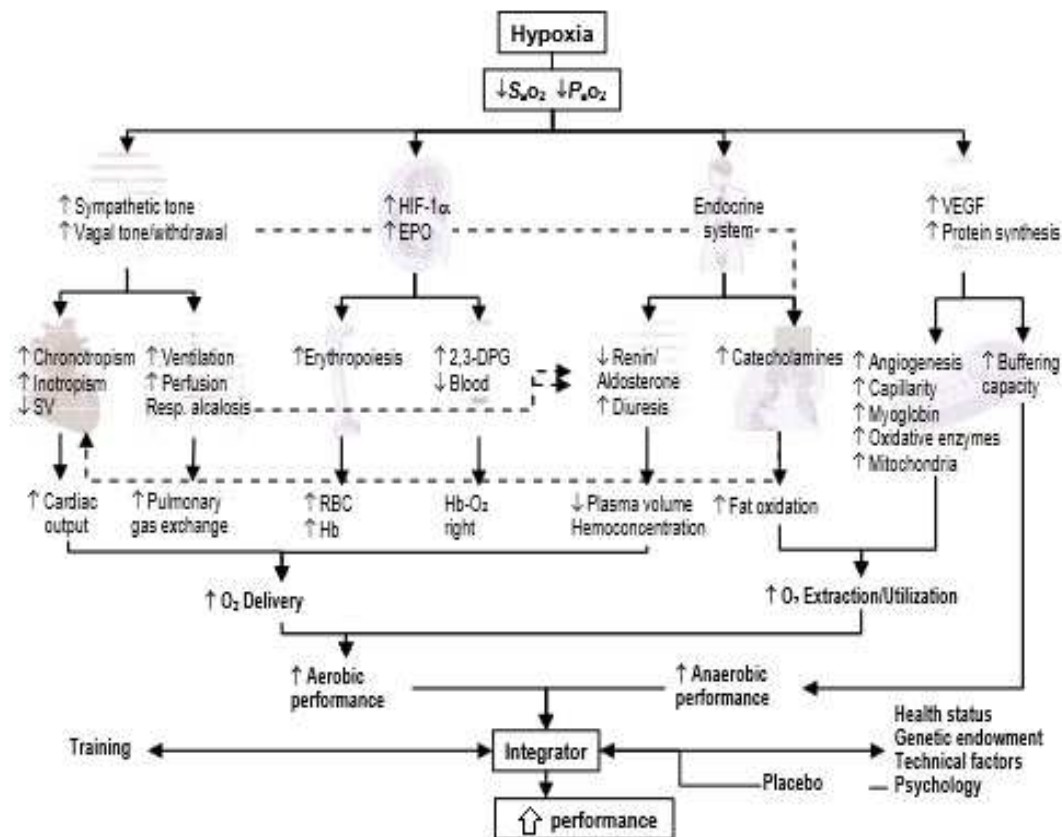


Figura 5. Resumen de los mecanismos de respuesta fisiológica a la hipoxia para la mejora del rendimiento deportivo. Adaptado de Truijens⁵¹

Pese a estas respuestas generales, el efecto producido por las condiciones de hipoxia en cada sujeto es diferente y depende de diversos factores²³:

- La respuesta individual.
- El tiempo de exposición o entrenamiento.
- La aclimatación previa.
- La altitud de exposición.
- El tipo de actividad realizada en altitud.
- El tipo de exposición activa o pasiva.
- Del nivel deportivo del sujeto.

Es importante señalar los cambios que pueden inducir las condiciones de hipoxia en la fatiga y en los sistemas orgánicos durante la exposición y entrenamiento (Figura 5). Los métodos de entrenamiento que utilizan la hipoxia intermitente buscan reducir los efectos adversos de la exposición y entrenamiento crónico. Pese a ello, se han descrito cambios

fisiológicos que sería importante describir. A continuación se exponen los principales efectos de la hipoxia sobre la fatiga y los sistemas corporales.

1.3.1. Efectos de la hipoxia en la fatiga: central y periférica. ¿Como puede afectar en ella el entrenamiento intensivo en hipoxia?

El ejercicio físico, tanto en hipoxia como en normoxia, provoca fatiga a nivel global afectando el rendimiento central y periférico. La *fatiga* es un término que hace referencia a la imposibilidad de mantener un estado estacionario entre aporte-demanda de nutrientes y oxígeno debido a una depleción de substratos, generalmente relacionada con ejercicios de larga duración y baja intensidad de fuerza ⁵², o por una acumulación de metabolitos, como ocurre en ejercicios de máxima intensidad, duración corta y máxima exigencia de fuerza ⁵². Cuando esta fatiga afecta al cerebro, puede existir una limitación en la transmisión de información periférica (Figura 6) ⁸.

Durante la actividad física, el efecto de la fatiga puede incidir en 2 niveles interrelacionados entre sí (Figura 6):

- *Fatiga periférica*; que se relaciona con un descenso en la capacidad de mantener la aplicación de fuerza en la misma intensidad debido a la menor eficiencia de la contracción muscular ⁵³ llegando al fracaso en la acción de contracción-relajación ⁵⁴.
- *Fatiga central*; que se relaciona con procesos fisiológicos en los que participa el sistema nervioso central. Esto incluye el fallo en el control de las tareas (motricidad) debido a un deterioro en la transmisión de la orden hacia las motoneuronas ⁵⁵.

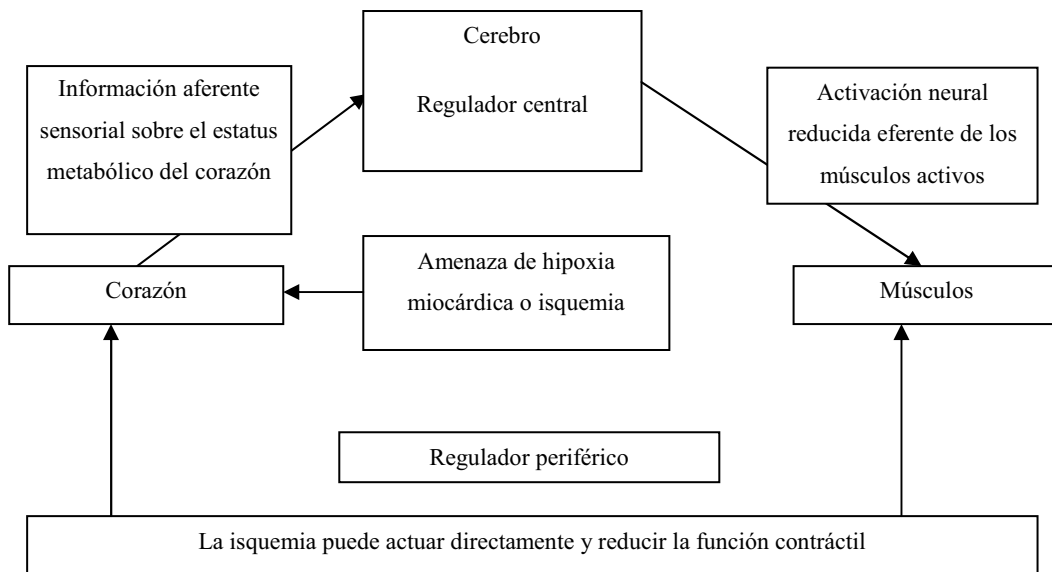


Figura 6. Esquema que representa la teoría del control central. Esta teoría describe como la información aferente informa al cerebro sobre cualquier amenaza que la hipoxia o la isquemia pueda afectar en los órganos. En respuesta a ello, el control central a través de la corteza motora, reduciría la información eferente hacia los músculos reduciendo la masa muscular reclutada y por lo tanto la intensidad de ejercicio a ejercer. (Modificado de Noakes TD, 2001⁵⁶).

A medida que la fatiga muscular aumenta (periférica), existe un deterioro en la transmisión nerviosa y con ello una reducción en la precisión de las contracciones y de la eficacia de las acciones motrices⁵⁵. Durante este proceso existe una mayor actividad cortical (central) y en base al nivel de fatiga percibida y procesada por el cerebro, este puede incrementar su participación inhibiendo la acción de sistemas como el cardiovascular para descender el nivel de exigencia física⁵⁵. En deportes con elementos técnicos determinantes para competir, este fenómeno puede tener mucha importancia en el rendimiento final debido a que las acciones técnicas pierden eficiencia y precisión. La fatiga no es el único elemento que puede comprometer el rendimiento físico, aspectos ambientales como el frío o la altitud también pueden producir que el sistema nervioso central limite las acciones de los sistemas periféricos para mantener la homeostasis interna y asegurar la propia supervivencia del sistema nervioso central⁵⁷. En condiciones de hipoxia, el efecto de la fatiga se acentúa⁵⁸ y puede entenderse:

- Que tiene efectos de inhibición en el control autónomo y la conducción motora⁵⁹.
- Que este efecto puede ser el principal causante del descenso en la intensidad o el cese de la actividad física (Figura 7)^{56,58}.

- Amman et al ⁶⁰, tomando como dato la saturación arterial de oxígeno para la influencia de la hipoxia en el organismo, describió como por encima del 70% de saturación arterial de oxígeno, la fatiga influía en el rendimiento periférico y por debajo de estos niveles se producía un efecto de autodefensa del sistema nervioso central. Sin embargo, para alcanzar estos niveles de SaO₂ es necesario un ejercicio de moderada duración. ⁶⁰
- Que en contraste a lo que ocurre a nivel cerebral, el decremento de oxihemoglobina a nivel muscular es similar en condiciones de normoxia e hipoxia ⁶¹.

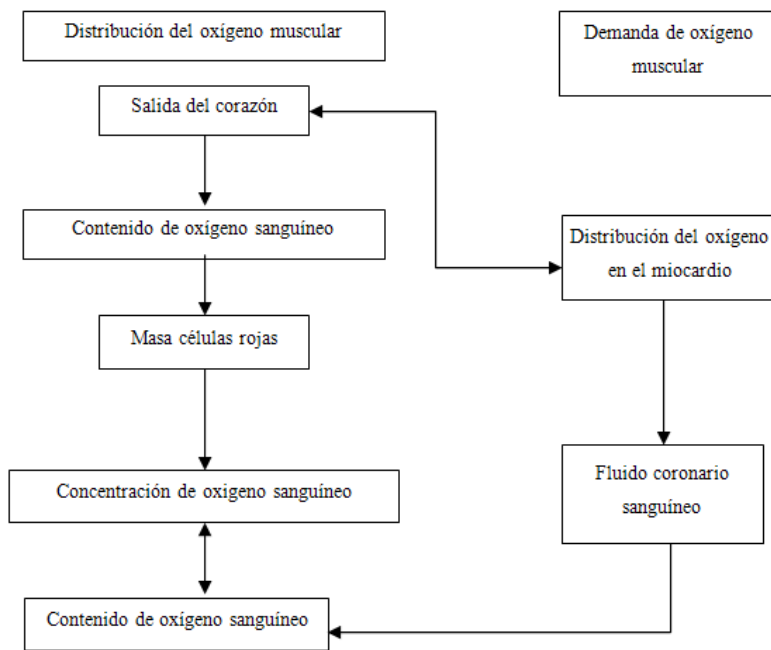


Figura 7. Fuente: Modificado de Noakes⁵⁶. Esquema que muestra como cambios en la concentración de oxígeno en sangre reducen el suministro de oxígeno arterial tanto a los músculos esqueléticos como al corazón. Si el corazón es dependiente de los músculos, como predice la teoría clásica, la salida de oxígeno del corazón debe aumentar durante la hipoxia para garantizar que el suministro de oxígeno a los músculos esqueléticos se mantenga. En contraste, la teoría del “gobernador central” predice que el gasto cardíaco caerá durante la hipoxia en proporción a la reducción de suministro de oxígeno al corazón, específicamente para evitar daño hipóxico al corazón y otros órganos vitales incluso, tal vez, el cerebro y las vías respiratorias musculares.

El efecto de la desoxigenación a nivel cerebral es mucho más marcado en hipoxia que en normoxia y limita a la vez la respuesta motora y el rendimiento deportivo (Figura 7). La velocidad de recuperación de oxigenación cerebral parece ser igual en ambas condiciones pero a niveles diferentes (más bajos siempre en hipoxia). Sin embargo, se ha descrito como esta respuesta tiene gran variabilidad individual, pudiendo ser un método de valoración de la respuesta a hipoxia ⁶².

1.3.2. Efecto de la hipoxia sobre los sistemas corporales

En condiciones de hipoxia, los abajeños desencadenan una respuesta fisiológica de respuesta ante la ineficacia aguda sufrida ⁶³. Esta dinámica no es diferente, e incluso puede ser más acentuada, en los deportistas de élite que en los no élite, debido a la gran sensibilidad percibida ante los cambios provocados por situaciones que afectan el descenso en el rendimiento ⁶⁴. Los cambios fisiológicos se aprecian a diferentes niveles en los sistemas cardiorrespiratorio, muscular, metabólico, de expresión de genes y sanguíneos. En condiciones de hipoxia crónica es importante que el deportista genere respuestas adaptativas para mantener un equilibrio orgánico y poder ser eficiente durante el ejercicio físico. Sin embargo, incluso siendo buenos respondedores a estas condiciones, los abajeños descienden su rendimiento físico (aeróbico) debido al descenso en la capacidad de absorción y transporte de oxígeno. Esta situación no ocurre cuando se realiza ejercicio máximo de corta duración (anaeróbico) en hipoxia intermitente sin necesidad de aclimatación ³².

El término *aclimatación* se usa para describir las alteraciones fenotípicas que hay en respuesta a la hipoxia ⁶⁵. Los mecanismos compensatorios desencadenados en un primer momento (respuesta aguda) se manifiestan, incluso en reposo, con un aumento de la ventilación, el ritmo cardíaco y la diuresis renal. Los ajustes en la ventilación vienen determinados por una respuesta a la menor presión parcial de oxígeno que reduce la presión parcial de CO₂ en la sangre y aumentando así el pH arterial (alcalosis respiratoria). Se produce una taquicardia acoplada a la hiperventilación. Además, el cuerpo intenta excretar bicarbonato a través de los riñones para recuperar el equilibrio del pH sanguíneo y compensar la alcalosis respiratoria. La respuesta de diuresis incrementada tiene efectos favorables ya que induce un cambio en la curva de disociación de la hemoglobina y también hemoconcentración por la reducción del volumen plasmático, pero también mayor riesgo de deshidratación. Esta respuesta aguda se puede traducir en un aumento de viscosidad sanguínea y una mayor dificultad en el transporte de oxígeno en los pulmones y tejidos ³.

Las ventajas e inconvenientes que puede aportar el entrenamiento o la exposición a hipoxia dependen individualmente de las condiciones de entrenamiento, del nivel físico de los deportistas y de la susceptibilidad individual ^{23,66-70}. Estudios que comparan nativos de altura y abajeños, describen como los nativos de altitud tienen una mayor

adaptación a la situación de déficit de oxígeno persistente con una mayor capacidad amortiguadora del pH muscular, mayor capacidad de consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2\text{max}$), mejor intercambio gaseoso y una saturación arterial de oxígeno más alta durante el ejercicio en condiciones de hipoxia. A nivel muscular no se encuentran diferencias en la distribución de fibras, capilares o enzimas oxidativas^{68,71}. Estas conclusiones reafirman la idea de que los deportistas nativos en altitud tienen ventajas durante la realización de actividad física en condiciones de hipoxia frente a los abajeños. No requieren un proceso de aclimatación previa, realizan entrenamientos de mayor calidad, tienen procesos de recuperación adecuados, respuestas adaptativas crónicas en todos los sujetos. Por el contrario, los abajeños sufren los efectos contrarios.

Puntos clave:

- El efecto que provoca la hipoxia sobre los sistemas corporales es individual (en cada sujeto) y dependiente del tipo, tiempo y ejercicio durante la exposición a hipoxia.
- De modo general existe consenso respecto a que la altitud de 2200-2500 metros genera las condiciones mínimas para inducir una respuesta hematopoyética positiva para el rendimiento físico de resistencia (92% de SaO₂).
- El ejercicio físico en hipoxia agrava estas respuestas fisiológicas pudiendo ser favorables o desfavorables en función del tipo de entrenamiento seguido, el tiempo de exposición y la propia respuesta individual.

A continuación se describen las principales respuestas producidas a nivel sistémico en respuesta a la exposición y ejercicio en hipoxia. Muchas conclusiones son descritas a nivel genérico (no individual).

1.3.2.1. Sistema cardiorrespiratorio

La respuesta cardiorrespiratoria frente a la exposición y ejercicio en condiciones de hipoxia engloba principalmente una reducción del rendimiento aeróbico y principalmente remite las siguientes conclusiones:

- Las condiciones de hipoxia reducen la eficacia del sistema cardiorrespiratorio durante el ejercicio aeróbico pero no afecta a nivel anaeróbico. Se ha descrito como a 610 metros de altitud ya existe una reducción en el consumo máximo de oxígeno en atletas de élite ^{72,73} mostrando una mayor sensibilidad a la hipoxia o a cambios en el rendimiento ⁷⁴. Los mecanismos desencadenantes de esta reducción en la capacidad aeróbica incluyen la hipoventilación, una inadecuada ventilación-perfusión y una limitada difusión alveolar-capilar ²³.
- El mayor esfuerzo durante el ejercicio en hipoxia provoca respuestas adaptivas a nivel cardíaco que explicarían una mejora en el consumo de oxígeno a través de la mayor capacidad de eyección cardíaca. Svedenhag et al ⁷⁵ describió como un mes de entrenamiento a 1900 metros de altitud en esquiadores de fondo aumentaba la masa muscular ventricular izquierda entre un 9 y 10%.
- El aumento de la frecuencia respiratoria se asocia a una reducción del tono vagal ⁷⁶. Además, el diafragma sufre una fatiga aumentada descrita por los mayores niveles de flujo sanguíneo y lactato asociados ⁷⁷.
- El aumento de la frecuencia cardíaca basal en situación de reposo durante periodos de entrenamiento en hipoxia puede ser un indicador de mala adaptación a la hipoxia y de fatiga física acumulada ^{78,79}.
- Existe una relación directa entre la formación de EPO y el aporte de oxígeno al organismo. Por ello la formación de EPO está conservada cuando el aporte de oxígeno es suficiente o ligeramente reducido, pero aumenta bruscamente en caso contrario cuando la tensión de oxígeno es tan reducida que existe una señal de alarma en el deterioro de las funciones vitales del organismo ⁸⁰.

Puntos clave:

La respuesta individual puede aumentar o disminuir estas respuestas:

- Descenso del VO_2max en hipoxia (\uparrow en deportistas de élite).
- Efectos: hipoventilación (inadecuada ventilación perfusión y limitada difusión alveolocapilar), \uparrow trabajo diafragma asociada a fatiga (\uparrow trabajo anaeróbico; \uparrow lactato).
- Posibilidades de un incremento de la masa muscular ventricular izquierda con entrenamiento en hipoxia.
- \downarrow del tono vagal. \uparrow frecuencia cardíaca submáxima. Recuperación dificultada.
- \uparrow regulación cardíaca a través del sistema nervioso autónomo.
- Relación entre \downarrow presión alveolar y \uparrow formación de EPO.

1.3.2.2. Respuestas sanguíneas

Cuando el tiempo de exposición a hipoxia es suficientemente largo, existen modificaciones en las variables hematológicas que pueden expresar la buena o mala respuesta individual. Pese a la controversia en algunos aspectos analizados, se ha descrito que existe una relación entre la presión parcial de oxígeno arterial (PaO_2) y la masa de las células rojas, con un punto de inflexión crítico de la PaO_2 a 67mmHg, equivalente a una saturación arterial de oxígeno (SaO_2) de 92% (equivalente a una altitud de 2200-2500 metros). Esta saturación (92%) es el punto en el cuál se inicia el estímulo eficiente de la eritropoyesis⁶³ y de manera específica se describen las siguientes respuestas sanguíneas en respuesta a la exposición a condiciones de hipoxia:

-La EPO es una hormona glucoproteica que regula la proliferación y diferenciación de las células rojas⁸¹. Su producción está regulada por la reducción del contenido arterial de oxígeno mediada a su vez por anemia o hipoxia. Cuando el ser humano se expone a condiciones de hipoxia, se desencadena un aumento en la formación de EPO. Blerglund et al⁸², describió incrementos del 1% semanal con estancias entre 1829 y 3048 metros. Sin embargo, durante estancias largas o intermitentes pero constantes (3-4 semanas), la demanda orgánica de hierro aumenta y la posible deficiencia puede impedir una correcta

respuesta hematopoyética ²⁵. Esta variable medida individualmente puede aportar información sobre buena o mala adaptación a hipoxia ⁸³, estando disminuida marcadamente en sujetos no respondedores.

- Aunque la respuesta hematopoyética es inmediata frente a la exposición a hipoxia (24 primeras horas), se considera óptima para el rendimiento deportivo aeróbico después de 4 semanas de exposición y entrenamiento ⁸⁴ en condiciones de hipoxia moderada equivalente a 2100-2500 m ⁸¹.

- Ge describió como después de 24 horas a 2800m existió una respuesta individual muy amplia (41% a 400%) especulando que podría ser debida a la propia variabilidad genética en relación con la tolerancia a la presión de oxígeno en el tejido renal ⁸¹.

- Durante el ejercicio en condiciones de hipoxia los valores de lactato son más elevados y se alcanzan antes que durante el mismo ejercicio (intensidad) en normoxia. Amann ⁶⁰ describió como frente a una misma intensidad de ejercicio en hipoxia y normoxia, los valores máximos alcanzados en normoxia (8 minutos) se alcanzaban a los 2 y 4 minutos en hipoxia severa y moderada respectivamente. Esta mayor acidosis metabólica puede favorecer la inhibición de la eritropoyesis y describir la menor respuesta en los valores hematológicos con entrenamientos máximos utilizando hipoxia intermitente ⁸⁰.

- Aunque podría ser considerado que el entrenamiento de alta intensidad en hipoxia puede afectar el sistema inmunitario debido al mayor estrés soportado ²³, ésto no ha sido demostrado claramente ⁸⁵. Sin embargo, algunos estudios describen descensos en el nivel de glutamina plasmática después de 20 días de entrenamiento a 1640 metros ²³. El descenso en los niveles de glutamina se asocia con un aumento de la inmunosupresión y un descenso en el rendimiento ⁸⁶. Por el contrario, otros parámetros como los niveles de interleuquina 1 (IL1), factor de necrosis tumoral – alpha (TNF α), glucosa, glicerol, ácidos grasos libres, epinefrina, norepinefrina y cortisol no descienden significativamente en comparación con ejercicio en normoxia a una intensidad submáxima ⁸⁵.

Puntos clave:

- Exposiciones y entrenamientos óptimos: 4 semanas, altitud umbral para generar respuestas mínimas (2100-2500m).
- ↑producción y concentración EPO (1% semanal) entre 1800-3000m.
- Gran variabilidad en las concentraciones sanguíneas de EPO, Fe, lactato.
- ↑ niveles sanguíneos de metabolitos.
- ↓descensos niveles de hierro y glutamina (↑inmunosupresión).
- Niveles de IL1, glicerol, cortisol, epinefrina, noreprinefina y TNF α no se han reportado diferentes significativamente frente a normoxia.

3.1.2.3. Sistema muscular

El ejercicio físico en condiciones de hipoxia puede provocar respuestas musculares positivas sobre el rendimiento físico ⁸⁷. Estas pueden ser debidas principalmente a:

- **A nivel estructural**; el déficit de oxígeno acumulado a nivel muscular favorece la mayor activación de diferentes respuestas siempre y cuando exista un estímulo de esfuerzo equivalente en condiciones de hipoxia y normoxia ^{65,88}. Durante este proceso se ha descrito que existe una mayor vascularización del tejido muscular ⁸⁹ favoreciendo el aumento en el número de capilares y el tamaño de las fibras ⁶⁸. Estas respuestas adaptativas mejoran la capacidad de tamponamiento del pH muscular y el aclaramiento de residuos metabólicos ⁶⁶.

- **La respuesta metabólica**, derivada de trabajar muscularmente en condiciones más anaeróbicas, se asocia a soportar niveles más altos de estrés. En respuesta a estas condiciones (acumulación constante de metabolitos fruto de una mayor degradación de glucógeno por vía anaeróbica) puede existir un incremento de los depósitos de bicarbonato musculares y con ello una mejora en la capacidad de tamponamiento muscular ⁹⁰. También se ha descrito como después de realizar protocolos de entrenamiento en hipoxia hay una mayor activación de la citrato sintetasa ^{66,69} resultando en una mayor concentración de mioglobina en el tejido muscular ⁶⁷. A nivel mitocondrial, existe un incremento en el control respiratorio de la creatina, aportando una mejor integración entre la demanda y el aporte de ATP ⁹¹. Esto incidiría sobre la mejora de la vía aláctica (fosfágenos) para generar energía anaeróbicamente.

Este proceso genera un mayor estrés oxidativo con una influencia negativa sobre la integridad de las membranas celulares ²³. A este respecto, se ha descrito como ingestas diarias de 300-400 mg de vitamina E podrían ayudar a limitar el daño oxidativo en los tejidos ²³.

- Las condiciones de hipoxia aumentan *la expresión de genes* a nivel tisular que viene inducida por una mayor activación de genes dependientes de la señal de HIF-1. Esta cascada de señalización estimula la correspondiente síntesis proteica en diferentes vías: eritropoyetina (eritropoyesis), factor de crecimiento endotelial vascular (angiogénesis), sintetasa del óxido nítrico (vasodilatación), enzimas glucolíticas (activación del metabolismo anaeróbico), hidroxilasa tiroxina (síntesis de catecolaminas) ^{92,93}.

- Desde un punto de *vista mecánico*, se ha descrito como existe una mayor activación electromiográfica durante el ejercicio intenso de corta duración (2 a 4 minutos) en condiciones de hipoxia en comparación con normoxia. La activación electromiográfica en hipoxia severa es igual a los 2 minutos que a los 5 minutos en normoxia ⁶⁰. Sin embargo, a medida que la fatiga aumenta, se reduce proporcionalmente esta activación y desciende el nivel de reclutación de unidades motoras. Estas conclusiones enlazan con la teoría descrita por Noakes (punto 1.3.1. ; fatiga periférica), en la cuál se describe como el cerebro puede reducir la activación motora en base al feedback recibido.

Puntos clave:

En condiciones de hipoxia y ejercicio:

- ↑ estrés oxidativo soportado por las membranas celulares.
- ↑ actividad eléctrica (EMG) de las fibras musculares durante ejercicio de corta duración pero menor con fatiga (moderada y larga duración).
- ↑ número de capilares.
- ↑ capacidad tampón del pH muscular y mejora del aclaramiento de metabolitos.
- Mitocondria = ↑ control respiratorio.
- ↑ activación citrato sintetasa = ↑ concentración de mioglobina en músculo.
- La mayoría de respuestas tisulares están inducidas por la activación de genes dependientes de la señal HIF-1 producida por hipoxia.

1.3.2.4. Metabolismo

Las condiciones de hipoxia incrementan el uso prioritario de glucógeno como sustrato energético pudiendo favorecer el rendimiento anaeróbico. De un modo específico podemos apuntar las siguientes conclusiones:

- En condiciones de hipoxia, incluso en reposo, la menor capacidad de absorción de oxígeno aumenta la participación del metabolismo anaeróbico para generar energía aumentando el estrés celular y la acumulación de metabolitos fruto de la glucólisis anaeróbica ^{94,95}. Este proceso se describe como “estresor” del metabolismo por un aumento del ratio AMP/ATP incrementando la señalización sobre AMPK ⁹⁶. La proteína quinasa sérica AMPK (AMP-proteína quinasa activada) responde ante el estado energético de la célula, inhibiendo el consumo de ATP y activando las vías de producción de ATP ⁹⁷.

- Diferentes estudios describen como existe una mayor utilización de carbohidratos en detrimento de grasas como sustrato energético durante el ejercicio en hipoxia en comparación con normoxia ^{98,99}. En respuesta, estas condiciones favorecen los procesos de oxidación y metabolización de la glucosa ¹⁰⁰, incrementando la captación de glucógeno por la célula muscular y favoreciendo el rendimiento anaeróbico ^{101,102}. Puede contribuir a ello el incremento de la acción de los transportadores de membrana GLUT4, mejorando su afinidad con la insulina ¹⁰³ o el incremento significativo de la acción de las enzimas oxidativas como la PGC-1 α ⁹¹.

- La mayor descomposición de glucógeno muscular en condiciones de hipoxia y ejercicio ¹⁴ produce un mayor desequilibrio energético (a nivel muscular) ^{104,105} que se asocia a mayores niveles de lactato plasmático y muscular ^{16,98,106,107}. Esto implica haber rebasado esa capacidad de utilización en estado estacionario y supone una incapacidad fisiológica de aclaramiento muscular y de regulación del pH intrafibrilar pudiendo provocar una limitación de la contracción y una reducción de la intensidad de ejercicio. Es aquí donde Noakes discrepa porque argumenta que es el cerebro a través del sistema nervioso el que limita esta acción para proteger el sistema del fallo orgánico total (teoría del comando central). Este proceso vendría determinando por toda una serie de procesos de memoria aferente y eferente que vía feedback inmediato y recurrente ajustarían las respuestas motoras (ver Figuras 6 y 7) ¹⁰⁸.

- El concepto de lanzadera de lactato propone que el lactato puede ser reconvertido a piruvato y oxidado a CO₂ y H₂O en tejidos con metabolismo aeróbico, o incorporado al glucógeno, causando que los niveles de lactato disminuyan ¹⁰⁹. Este hallazgo no debe confundirse con la denominada “paradoja del lactato”, que hace referencia a la menor capacidad de alcanzar un nivel máximo de lactato en sangre que se ha descrito en sujetos residentes o aclimatados a la gran altitud (por encima de 4000m).

Puntos clave:

En condiciones de hipoxia (pasiva y activa) se producen cambios metabólicos:

- ↑ generación de energía anaerómicamente (↑ utilización de glucosa en detrimento de grasas).
- ↑ estrés celular y ↑ desequilibrio energético muscular.
- ↑ acumulación de metabolitos fruto de la glucólisis anaeróbica.
- ↑ incremento activación de enzimas oxidativas.
- ↑ consumo de glucosa ↑ activación de AMPK ↑ acción de los transportadores GLUT4 ↑ afinidad a la insulina (membrana celular).

1.3.2.5. Cambios en la expresión de genes

La exposición a hipoxia genera cambios en la expresión de genes que involucran respuestas principalmente a nivel metabólico, hematológico y estructural:

- A **nivel metabólico** se incrementa la expresión de proteínas de estrés relacionadas con la señal sensible a la hipoxia tisular (HIF-1) produciendo cambios desde la fosforilación oxidativa a la glucólisis anaeróbica. Existe un incremento en el metabolismo de la glucosa debido a la mayor activación de genes de enzimas glucolíticas y de la glucosa ¹¹⁰.

- La proteína HIF-1 es un factor de transcripción que se expresa universalmente en todos los tejidos y está involucrada en la sensibilidad al oxígeno. En condiciones de normoxia se degrada rápidamente, pero en hipoxia pasa del citoplasma al núcleo celular modificando la expresión de genes ¹¹¹ y de manera aumentada con el ejercicio físico independientemente de la intensidad ¹¹⁰. El factor transcripcional de genes HIF-1 desencadena una cascada de señales de control de síntesis de las proteínas involucradas

en el transporte de oxígeno (eritropoyetina y factor de crecimiento vascular endotelial (VEGF)).

- Relacionado con el rendimiento deportivo, provoca *cambios estructurales* debido a que HIF-1 aumenta la densidad y el volumen mitocondrial, la mioglobina, la activación de la fosfofructoquinasa (PFK) y el factor de crecimiento vascular endotelial (VEGF)¹¹⁰. En la práctica, el aumento de capilaridad aumenta el aporte de oxígeno y los nutrientes a las células favoreciendo a la vez la eliminación de desechos de la combustión anaeróbica. El incremento de mioglobina mejora la capacidad de transporte y el consumo de oxígeno celular y puede reducir el tiempo de recuperación.

Puntos clave:

- ↑ transcripción de señal HIF-1 provocando:
 - ↑ densidad mitocondrial.
 - ↑ mioglobina.
 - ↑ activación de PFK, VEGF, genes de enzimas glucolíticas.
 - ↑ activación del metabolismo anaeróbico para generar energía.

1.3.2.6. Respuestas individuales frente a las condiciones de hipoxia

La respuesta fisiológica es diferente en nativos de altitud (highlanders) y abajeños (residentes en condiciones de normoxia o baja altitud). Tanto en reposo como durante ejercicio, los highlanders son más eficientes energéticamente que los abajeños (reportando menores valores de lactato y consumo de glucógeno) y más competentes físicamente (con un mayor desarrollo de potencia generada en intensidades más altas de ejercicio) (ver Figura 8).

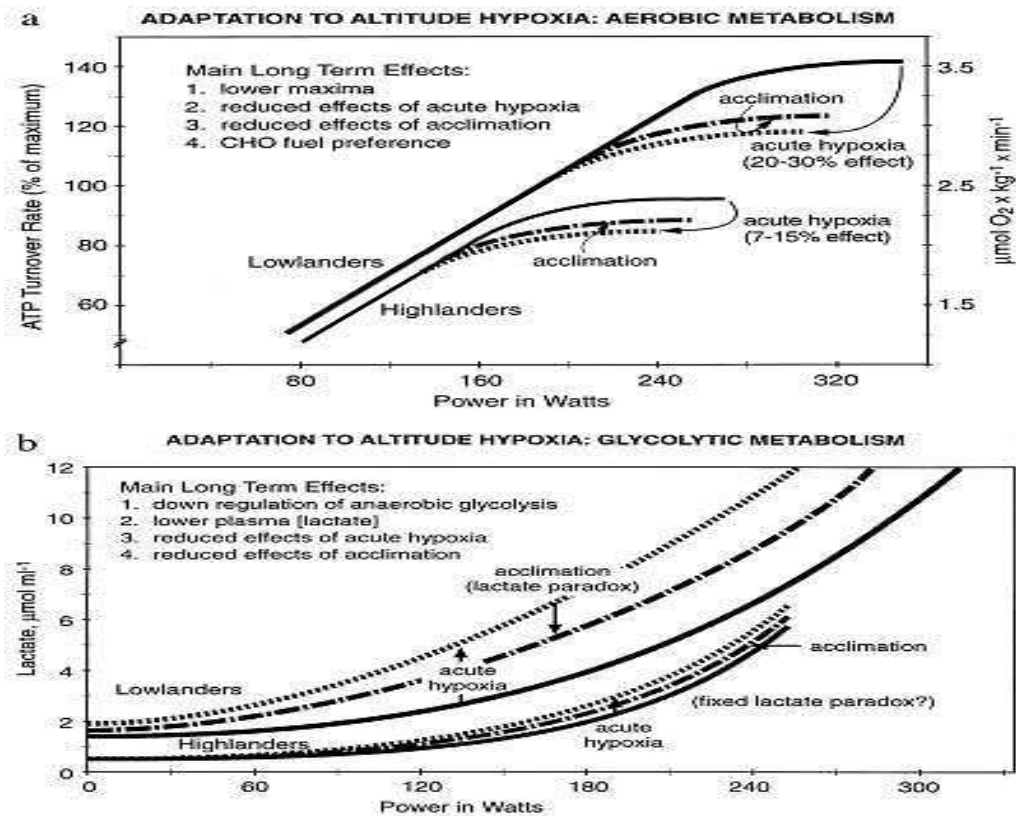


Figura 8. Efecto del efecto agudo y la aclimatación en ejercicio físico en hipoxia en residentes en altitud de modo permanente y a nivel del mar. (b) Efecto del efecto agudo y la aclimatación durante ejercicio en hipoxia en la respuesta del lactato en nativos de altitud y nivel del mar. Fuente: Hochachka PW et al 1998¹¹².

Para ser considerado un método útil para utilizar dentro del plan de entrenamiento, debe existir una valoración individual de las respuestas fisiológicas y físicas¹¹³. Los sujetos no respondedores a hipoxia son aquellos que en comparación con los buenos respondedores presentan rendimientos físicos y variables fisiológicas más reducidas o negativas en los siguientes niveles¹¹⁴: hematológico, muscular, cardiorrespiratorio, de expresión de genes y metabólico. Debe considerarse que el nivel deportivo no influye en la tolerancia a la hipoxia, pudiendo ser incluso peor en deportistas por su mayor nivel de percepción subjetiva del esfuerzo y la fatiga¹¹⁴. Los cambios inducidos por la hipoxia son perceptibles casi inmediatamente (30 horas de exposición crónica) en la respuesta hematopoyética. Dichos cambios pueden ser medidos durante la fase de aclimatación o cuantificando el rendimiento físico en hipoxia¹¹⁴. Sin embargo, independientemente de su análisis es importante señalar:

- Que estas respuestas de aclimatación son revertidas a su descenso al nivel del mar.
- Que los buenos respondedores tienden a mantener estos valores altos prolongados durante más tiempo, por ejemplo, no presentan descensos en los

niveles de hierro tan acentuados durante los procesos de aclimatación a hipoxia ¹¹⁵.

Se ha propuesto específicamente la medición de esta respuesta a través de dos opciones:

- La valoración del propio rendimiento físico medido en condiciones de hipoxia y valorando el deterioro en comparación con normoxia ¹¹³.
- La realización de pruebas de laboratorio en condiciones de exposición aguda ¹¹⁶ a hipoxia y comparando las respuestas en diversos parámetros fisiológicos (valores hematológicos, respuesta ventilatoria, cardiorrespiratoria y eficiencia de ambas a través de la saturación arterial de O₂, recuperación de la frecuencia cardíaca...).

Puntos clave:

Existe una variabilidad individual en respuesta a la exposición y entrenamiento a la hipoxia, pudiendo apuntar que:

El efecto placebo puede influir en ella.

- La condición de deportista no es una ventaja.
- Puede medirse la respuesta individual comparando respuestas:
 - o Hematológica (EPO, hierro, metabolitos...)
 - o Durante ejercicio físico específico (test de campo)
 - o Respuesta muscular (actividad eléctrica).
 - o Respuesta cardíaca y respiratoria (fatiga)
 - o Percepción individual de tolerancia a las condiciones de hipoxia (mejor en nativos).
 - o Metabólicamente (\uparrow eficiencia energética, \uparrow potencia generada en altas intensidades en comparación con no nativos). Mejores percepciones subjetivas.
- Existencia de sujetos Respondedores y No respondedores.
- Nativos = respuestas crónicas favorables (\uparrow eficiencia):

1.3.2.7. Rendimiento deportivo

Pese al gran número de estudios, existen discrepancias entre los beneficios en el rendimiento aeróbico y anaeróbico. Diferencias en la confección de los estudios, los parámetros medidos, diferentes deportes, etc. han contribuido a dar resultados ambiguos²⁴. En deportes de resistencia (aeróbicos), se ha considerado que la mayor respuesta hematopoyética tiene una transferencia positiva sobre el rendimiento deportivo aeróbico¹¹⁵. Sin embargo, como se ha apuntado en el punto 1.3.1.5 (respuesta individual a la hipoxia), existe la posibilidad de que esta premisa no se cumpla e incluso se deteriore el nivel deportivo cuando el sujeto no responde bien a hipoxia¹¹⁴. Con el fin de evitar los efectos negativos de la hipoxia crónica (infecciones de las vías respiratorias, problemas gastrointestinales¹¹⁷, descensos en el volumen muscular y el tamaño de las fibras^{118,119} e incluso un mayor riesgo de trombosis por un aumento sustancial de la viscosidad de la sangre) se han utilizado métodos de hipoxia intermitente como el "Living High-Training Low" o el "Living High-Training Low" utilizando cámaras hipobáricas y normobáricas.

Por el contrario, ha existido menos investigación sobre los posibles beneficios del entrenamiento en hipoxia para la mejora del rendimiento anaeróbico. En el Anexo 2 se describen los estudios más relevantes que han valorado el rendimiento anaeróbico y el uso de hipoxia como método de entrenamiento de los cuales podemos extraer las siguientes conclusiones generales:

La mayoría de estudios concluyen que el entrenamiento intensivo/intermitente en hipoxia mejora del rendimiento en pruebas anaeróbicas. Esta mejora se asocia a cambios en:

- La mejora de la capacidad de mantener la intensidad hasta el agotamiento.
- El incremento de los umbrales metabólicos a ritmos máximos (Umbral anaeróbico).
- Mejoras de la capacidad de mantener e incrementar la fuerza específica durante el ejercicio específico (ciclismo, kayak, carrera).

En resumen, los diferentes estudios que han analizado la respuesta anaeróbica después de ciclos de entrenamiento en hipoxia describen que:

- a) La intensidad de entrenamiento durante la exposición a hipoxia debe ser como mínimo del 60-70% de la frecuencia cardíaca máxima ¹²⁰.
- b) Con este entrenamiento no se describen mejoras en el VO₂max, salvo un estudio de Dufour, pero sí posiblemente mejoras en el tiempo hasta la fatiga ^{121,122}.
- c) Existen mejoras en el rendimiento incluso después de ciclos de exposición pasiva ^{121,123,124}. A día de hoy, existen todavía relativamente pocos estudios que analicen el rendimiento en especialidades puramente anaeróbicas incluyendo en método de TH-LL durante su programación de entrenamiento.
- d) Como punto negativo, en la mayoría de estudios no se valora individualmente la intensidad de entrenamiento en ambos grupos (hipoxia y normoxia) como un factor determinante de la pérdida de estimulación de entrenamiento.
- e) Los métodos más eficaces para mejorar el rendimiento anaeróbico son los protocolos TH-LH y TH-LL con un incremento del rendimiento descrito de ~4% ²⁶.

En referencia al punto d, Truijens ³⁰ apuntó la necesidad de entrenar a una misma intensidad de ejercicio en hipoxia y normoxia para que el efecto del entrenamiento fuera similar. Para apoyar sus conclusiones, mostró como a nivel metabólico los deportistas que entrenaron en hipoxia se ejercitaron a una intensidad marcadamente inferior en el grupo hipoxia (grupo normoxia: 91,8 % y grupo hipoxia: 71,5 % del Vo₂max). Este trabajo efectivo se correlaciona con un menor desarrollo de potencia y con ello una limitación de las respuestas a nivel muscular (p.e. síntesis de miosina). De esta manera, aunque entrenar en condiciones de hipoxia pueda aportar una mayor especificidad metabólica y de "dureza" percibida, si la intensidad ejecutada no es equivalente a la que se realizaría en normoxia, se tiende a entrenar "menos" desde un punto de vista absoluto. Este aspecto es importante para el posible desentrenamiento y pérdida de respuestas fisiológicas adquiridas.

Puntos clave:

Rendimiento anaeróbico después de protocolos de exposición/entrenamiento en hipoxia:

- Mayor capacidad de trabajo hasta el agotamiento.
- Discrepancias en la mejora de la capacidad aeróbica ($VO_2\text{max}$).
- Mejora en la capacidad de aumentar el tiempo de trabajo hasta el agotamiento.
- Mejora de la capacidad de tamponamiento muscular (descrito hasta el 6%).
- Mejora del rendimiento anaeróbico específico en diferentes deportes (hasta un 17% reportado).
- Mayores niveles de lactato soportados durante ejercicio en hipoxia.
- El descenso del rendimiento aeróbico en hipoxia influye en la recuperación durante ejercicios anaeróbicos interválicos.
- Mejora de procesos específicos musculares (densidad mitocondrial, capilarización, capacidad oxidativa, etc.).
- No incrementos debidos a mejoras en la capacidad de oxigenación (EPO).
- Mantenimiento de la intensidad de ejercitación anaeróbica en comparación con normoxia.
- Algunos estudios reportan discrepancias y dudan de su beneficio. Pese a ello, no existen estudios que reporten aspectos negativos para el rendimiento anaeróbico.

OBJETIVOS

1. Comprobar y comparar la eficacia del programa de entrenamiento de fuerza (resistencia y potencia) en condiciones de hipoxia hipobárica intermitente y normoxia en deportistas entrenados. Valorar el efecto de dicho programa sobre el rendimiento anaeróbico.
2. Analizar la respuesta metabólica obtenida con la medición del lactato al finalizar los test maximales después de aplicar el programa de entrenamiento.
3. Estudiar si este programa de entrenamiento tiene efecto en el control simpatico-vagal del sistema nervioso autónomo a través de la recuperación y la variabilidad de la frecuencia cardíaca.
4. Comprobar el efecto que produce el entrenamiento de potencia de fuerza en la saturación arterial de oxígeno a diferentes condiciones de hipoxia. Analizar si la influencia de la menor capacidad de absorción de oxígeno afecta la capacidad de rendimiento máximo (anaeróbico).

**INFORME DEL DIRECTOR DE LA TESIS DOCTORAL SOBRE EL
IMPACTO DE LAS PUBLICACIONES**

Los doctores Ginés Viscor Carrasco y Francisco Corbi Soler, como directores de la Tesis Doctoral presentada por Jesús Álvarez Herms, hacen constar que el doctorando ha participado activamente en los artículos que forman esta memoria, tal como queda reflejado en el orden y composición del equipo de autores de cada uno de ellos. El doctorando ha jugado un papel fundamental en el diseño experimental y el tratamiento de los datos. También ha tenido el protagonismo principal en el proceso de difusión y publicación de los resultados y conclusiones, es decir, en la redacción de los manuscritos y en el proceso de revisión por pares.

Los índices de impacto (IF) de las publicaciones que se han aceptado o se han enviado los artículos que conforman esta tesis son los siguientes:

1. Título de la publicación: Changes in heart rate recovery index after a programme of strength/endurance training in hypoxia

Autores (p.o. de firma): Álvarez-Herms, J; Julià-Sánchez, S; Corbi, F; Pagès, T; Viscor G

Revista: Apunts de Medicina de l'Esport **Volumen:** 47 **Número:** 173 **Páginas, Inicial:** 23 **final:** 29 **Año:** 2012 **ISSN:** 1886-6581

Participación del doctorando: Participación en el protocolo de exposición intermitente en hipoxia hipobárica de los deportistas. Realización de los entrenamientos, test y medidas descritas en el manuscrito.

I.F. (2013): **SJR:** 0,12 **5 Years I.F.** (2013): no aplicable

Eigenfactor Score (2013): no aplicable Article Influence Score (2013): no aplicable

Times Cited: 4 (a 5 de mayo de 2014)

2. Título de la publicación: Potenciales aplicaciones del entrenamiento de hipoxia en el fútbol

Autores (p.o. de firma): Álvarez-Herms, J; Julià-Sánchez, S; Urdampilleta, A; Corbi, F; Viscor, G

Revista: Apunts de Medicina de l'Esport **Volumen:** 48 **Número:** 179 **Páginas, inicial:** 103 **final:** 108 **Año:** 2013 **ISSN:** 1886-6581

Participación del doctorando: Participación en la búsqueda y revisión de la bibliografía sobre la temática del uso de métodos de entrenamiento en hipoxia en el fútbol.

I.F. (2013): **SJR:** 0,12 **5 Years I.F.** (2013): no aplicable

Eigenfactor Score (2013): no aplicable Article Influence Score (2013): no aplicable

Times Cited: 1 (a 5 de mayo de 2014)

3. Título de la publicación: Lactic anaerobic capacity enhancement by explosive-strength endurance training under simulated altitude conditions

Autores (p.o. de firma): Álvarez, J; Julià S; Pagès, T; Viscor, G and Corbi, F

Revista: Sleep & Breath Volumen: 16 Páginas, inicial: 247 final: 268 Año: 2012 **ISSN:** 1886-6581

Participación del doctorando: Participación en la búsqueda y revisión de la bibliografía sobre la temática del uso de métodos de entrenamiento en hipoxia en el fútbol.

I.F. (2013): SJR: 2,26

5 Years I.F. (2013): 2,26

Eigenfactor Score (2013): no aplicable

Article Influence Score (2013): 0,63

Times Cited: 1 (a 5 de mayo de 2014)

4. Título de la publicación: Physical rehabilitation in football by mechanical vibration and hypoxia

Autores (p.o. de firma): Urdampilleta, A; Álvarez-Herms, J; Martínez Sanz, JM; Corbi, F; Roche, E

Revista: Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte **Volumen:** 14 **Número:** 53 **Páginas, inicial:** 119 **final:** 134 **Año:** 2014 **ISSN:** 1577-0354

Participación del doctorando: Participación en el protocolo de exposición intermitente en hipoxia hipobárica de los deportistas. Realización de los entrenamientos, test y medidas descritas en el manuscrito.

I.F. (2012): SJR: 0,22

5 Years I.F. (2013): no aplicable

Eigenfactor Score (2013): no aplicable

Article Influence Score (2013): no aplicable

Times Cited: 0 (a 5 de mayo de 2014)

5. Título de la publicación: Anaerobic performance after endurance strength training in hypobaric environment

Autores: (p.o. de firma): Álvarez-Herms, J.; Julià-Sánchez, S; Corbi, F; Pagès, T; Viscor, G

Revista: Science & Sports journal (in press)
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scispo.2013.11.002> **ISSN:** 0765-1597

Participación el doctorando: Participación en el protocolo de exposición intermitente en hipoxia hipobárica de los deportistas. Realización de los entrenamientos, test y medidas descritas en el manuscrito.

I.F. (2013): 0,490

5 Years I.F (2013): 0,411

Eigenfactor Score (2013): 0,000396

Article Influence Score (2013): 0,0792

Times Cited: No aplicable

6. Título de la publicación: Different degrees of acute hypoxia does not influence the maximal anaerobic power capacity

Autores (p.o. de firma): Álvarez-Herms, J; Julià-Sánchez, S; Gatterer, H; Viscor, G; Burtscher, M

Revista: Wilderness & Environmental Medicine (en proceso de revisión editorial)

Participación del doctorando: Participación en el protocolo de exposición intermitente en hipoxia hipobárica de los deportistas. Realización de los entrenamientos, test y medidas descritas en el manuscrito.

I.F. (2013): 1,490 **5 Years I.F.** (2013): 1,139

Eigenfactor Score (2013): 0,000866 Article Influence Score (2013): 0, 34

Times Cited: 0 (a 5 de mayo de 2014)

7. Título de la publicación: A program of circuit strength training under hypobaric hypoxia conditions improves the anaerobic performance of athletes

Autores (p.o. de firma): Álvarez-Herms, J; Julià-Sánchez, S; Corbi, F; Pagès, T; Viscor, G

Revista: Science & Sports Journal (en proceso de revisión editorial)

Participación del doctorando: Participación en el protocolo de exposición intermitente en hipoxia hipobárica de los deportistas. Realización de los entrenamientos, test y medidas descritas en el manuscrito.

I.F. (2013): 0,492 **5 Years I.F.** (2013): 0,411

Eigenfactor Score (2013): 0,000396 Article Influence Score (2013): 0,0792

Times Cited: 0 (a 5 de mayo de 2014)

8. Título de la publicación: Heart Rate Variability after one session of power strength exercise performed at different hypoxic conditions

Autores (p.o. de firma): Álvarez-Herms, J; Julià-Sánchez, S; Gatterer, H; Corbi, F; Pagès, T; Viscor, G; Burtscher, M

Revista: Wilderness & Environmental Medicine (en proceso de revisión editorial)

Participación del doctorando: Participación en el protocolo de exposición intermitente en hipoxia hipobárica de los deportistas. Realización de los entrenamientos, test y medidas descritas en el manuscrito.

I.F. (2013): 1,490 **5 Years I.F.** (2013): 1,139

Eigenfactor Score (2013): 0,000866 Article Influence Score (2013): 0,34

Times Cited: 0 (a 5 de mayo de 2014)

Otras publicaciones adicionales que no forman parte de la tesis:

1. **Título:** Monitorización de la SaO₂ en ejercicio físico máximo a diferentes altitudes
Autores: Álvarez-Herms, J; Julia-Sánchez, S; Gatterer, H; Corbi, F; Viscor, G
Revista: Archivos de Medicina del Deporte Vol.: 27 Núm.:145 Pág.:362-363 Año: 2011
2. **Título:** La deshidratación en el deportista
Autores: Julia-Sánchez, S; Álvarez-Herms, J; Corbi, F; Pages, T; Viscor, G
Revista: Archivos de Medicina del Deporte Vol.: 27 Núm.:145 Pág.:367 Año: 2011
3. **Título:** Importancia de la salud bucodental en el deportista
Autores: Julia-Sanchez, S; Álvarez-Herms, J; Corbi, F; Pages, T; Viscor, G
Revista: Archivos de Medicina del Deporte Vol.: 27 Núm.:145 Pág.:346 Año: 2011
4. **Título:** Análisis de un entrenamiento de fuerza resistencia en hipoxia y normoxia en la variabilidad de la frecuencia cardíaca
Autores: Álvarez-Herms, J; Julia-Sanchez, S; Urdampilleta, A; Pages, T; Corbi, F; Viscor, G
Revista: Archivos de Medicina del Deporte Vol.: 27 Núm.:145 Pág.:363. Año: 2011
5. **Título:** Parámetros bioquímicos sanguíneos y la interpretación de los mismos ante las variaciones inducidas por el ejercicio físico-deportivo.
Autores: Gomez-Zorita, S; Urdampilleta, A; Martínez-Sanz, JM; López-Grueso, R; Álvarez-Herms, J; Julià-Sánchez, S; Vicente-Salar N
Revista: Nutrición Clínica y Dietética Hospitalaria. Volumen: 32. Supl.1 Pág.:36. Año: 2012
6. **Título:** El consumo máximo de oxígeno, saturación arterial de oxígeno y rendimiento físico a altitudes elevadas
Autores: Urdampilleta, A; Álvarez-Herms, J; Julia-Sánchez, S
Revista: Educación Física y Deportes, Revista digital Núm.: 173 Año: 17 Octubre 2012
7. **Título:** La preparación física para el alpinismo: nuevos métodos de precondicionamiento físico
Autores: Urdampilleta, A; Álvarez-Herms, J
Revista: Educación Física y Deportes, Revista digital Núm.: 165 Año: 16 Febrero 2012
8. **Título:** Preparación física mediante estímulos de hipoxia en el deporte.

- Autores:** Urdampilleta, A; Álvarez-Herms, J; Julià-Sánchez, S
Revista: Educación Física y Deportes, Revista Digital. Año 17, Núm.: 174, Año: 2012 <http://www.efdeportes.com/>
9. **Título:** Effectiveness of strength (high repetition-moderate load) training program in normobaric intermittent hypoxia to increase cardiac reserve and performance
Autores: Lopez-Grueso, S; Urdampilleta, A; Alvarez-Herms, J; Julia-Sanchez, S; Gomez-Zorita, S; Martinez-Sanz, JM; Corbi, F; Pages, T; Viscor, G
Revista: Proceedings of the Physiology Society (Poster communication) 26, PC 5. Año: 2012
10. **Título:** Efecto del ejercicio anaeróbico láctico sobre el ph salival
Autores: Julià-Sánchez, S; Álvarez-Herms, J; Urdampilleta, A; Corbi, F; Pagès, T; Viscor G
Revista: Apunts de Medicina de l'Esport Vol.: 48 Núm.: 179 Pág.: 83-88 Año: 2013 ISSN: 1886-6581
11. **Título:** Protocolo de hidratación antes, durante y después de la actividad físico-deportiva.
Autores: Urdampilleta, A; Martínez-Sanz, JM; Julià-Sánchez, S; Álvarez-Herms, J
Revista: Motricidad. European Journal of Human Movement. Volumen: 31. Pág: 57-76. Año: 2013 ISSN: 0214/0071
12. **Título:** Salivary pH increases after jump exercises in hypoxia
Autores (p.o. de firma): Julià-Sánchez, S; Álvarez-Herms, J; Gatterer, H; Burtscher, M; Pagès, T; Viscor, G
Revista: Science & Sports Journal **in press**
13. **Título:** Consideraciones dietéticas y nutricionales en situaciones climatológicas específicas (Capítulo 10)
Autores: Urdampilleta, A; Álvarez-Herms, J
Libro: Nutrición y dietética para la actividad física y el deporte Páginas: 101-113 ISBN: 978-84-9745-517-6 Año: 2013

PUBLICACIONES



apunts

MEDICINA DE L'ESPORT

www.apunts.org



ORIGINAL ARTICLE

Changes in heart rate recovery index after a programme of strength/endurance training in hypoxia

Jesús Álvarez-Herms^a, Sonia Julià-Sánchez^a, Francisco Corbi^b, Teresa Pagès^a, Ginés Viscor^{a,*}

^a *Departamento de Fisiología e Inmunología, Facultad de Biología, Universidad de Barcelona, Barcelona, Spain*

^b *Instituto Nacional de Educación Física de Catalunya (INEFC), Centro de Lleida - Universidad de Lleida (UdL), Lleida, Spain*

Received 22 June 2011; accepted 21 July 2011

Available online 22 September 2011

KEYWORDS

Hypoxia;
Heart rate;
Strength training

Abstract

Objective: To determine whether twelve sessions of resistance training on lower limbs at simulated altitude (2500 m) were efficient to elicit an improvement in heart rate recovery index in the first 3 min of recovery to a maximal jump test.

Materials and methods: Twelve young physically active subjects were divided in two balanced groups for training in hypoxia (HYP) and normal oxygen (NOR). The subjects were assigned to each group based on previous test results in the 60 s counter-movement jump test (CMJ60).

Results: Both groups performed identical strength training (volume, intensity, character and effort conditions) on the lower limbs (squats, half-squats and jumps) for 4 weeks. Both groups improved the measured parameters in all cases. We analyzed the time course of heart rate during the CMJ60 test and the subsequent 3 min recovery period. HYP group ($n=5$) improved the heart rate recovery index as compared to NOR group (Student's t -test) at minute 2 ($P=0.03$) and minute 3 ($P=0.05$).

Conclusions: We conclude that a protocol of resistance training on lower limbs (12 sessions in 4 weeks) at a simulated altitude could improve heart rate recovery index compared to the same training performed at sea level.

© 2011 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

PALABRAS CLAVE

Hipoxia;
frecuencia cardiaca;
entrenamiento de
fuerza resistencia

Valoración de la Frecuencia Cardíaca de Recuperación después de un programa de entrenamiento de fuerza resistencia en hipoxia

Resumen

Objetivo: Doce sujetos jóvenes físicamente activos se dividieron en dos grupos equilibrados para entrenar en hipoxia (HYP) y normoxia (NOR).

* Corresponding author.

E-mail address: gvisor@ub.edu (G. Viscor).

Material y métodos: Los sujetos fueron asignados a cada grupo en base a los resultados en una prueba previa de salto en contramovimiento de sesenta segundos (CMJ60). Ambos grupos realizaron durante 4 semanas un entrenamiento idéntico de fuerza (volumen, intensidad, carácter y condiones de esfuerzo) en las extremidades inferiores (squat, half-squat y saltos). **Resultados:** Ambos grupos mejoraron en todos los casos. Se analizó la evolución temporal de la frecuencia cardiaca durante la prueba CMJ60 y el posterior período de recuperación de tres minutos. El grupo HYP (n=5) refleja una mejoría del índice de recuperación de la frecuencia cardiaca en comparación con el grupo NOR (prueba t de Student) después de 2 (p=0,03) y 3 (p=0,05) minutos de finalizar el test de saltos.

Conclusiones: Concluimos que un protocolo de entrenamiento de fuerza resistencia (12 sesiones en 4 semanas) de las extremidades inferiores en altitud simulada podría mejorar el índice de recuperación de la frecuencia cardiaca en comparación con el mismo entrenamiento realizado a nivel del mar.

© 2011 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Introduction

Monitoring the evolution of heart rate in the recovery phase after physical exertion is a simple and non-invasive method for assessing the cardiovascular health and physical condition of subjects.^{1,2} A direct relationship has been reported between a more rapid decline from maximum heart rate to values below 130 beats per minute and improved cardiovascular adaptation.³ This improvement has been associated with various internal physiological adjustments in such a way that a lower heart rate in the recovery phase would be due to decreased venous return and systemic needs.⁴ The increase in heart rate in response to exercise is accompanied by a reduction in vagal tone that is further increased over basal level after exercise has ended⁵ through the activation of the autonomic nervous system immediately after cessation of maximum activity.⁶

In addition to its use to evaluate physical condition, heart rate recovery (HRR) from maximal exercise in the first few minutes after ceasing the activity is also a valid indicator of risk of sudden death during exercise.⁷ Given the relatively large number of cases and the notoriety of this type of death, HRR monitoring has gained importance as a useful non-invasive tool to evaluate cardiovascular health and fitness.⁸

To the best of our knowledge, no previous studies have analyzed or evaluated the evolution of HRR following a protocol of simulated altitude strength endurance training on lower limbs, neither has the impact of training stimulus on the cardiovascular system been addressed.

Scientific research on the benefits of training and acute, chronic or intermittent exposure to hypoxia is extensive in real and simulated altitude conditions.^{9,10} Interest in this topic was aroused because of the excellent results in endurance events (with predominant aerobic metabolism) achieved by African athletes residing at moderate altitudes.¹¹ It was the incursion of these athletes at the 1968 Mexico Olympics, and their subsequent overwhelming dominance in these events that spurred studies into finding explanations for these quantitative differences in physical performance.^{12,13}

Altitude training (real or simulated) is widely reported to favour aerobic performance,^{9,10} but there is also some evidence of improved anaerobic capacity.¹⁴⁻¹⁶ Hypoxic training has become available to more people in recent years through altitude chambers (hypobaric hypoxia) and hypoxic tents (normobaric hypoxia). No health risks have been associated with these practices.¹⁷

Haematological changes and muscular adaptations are the main benefits of time spent at moderate altitude,^{18,19} thus subsequently performance. The increase in red cell mass, and subsequently in oxygen transport and aerobic capacity,²⁰ and the improved specific adaptations of skeletal muscle to the hypoxic environment could also favour anaerobic endurance²¹ since enhanced anaerobic metabolism at rest may increase buffer capacity and clearance of lactate from the muscle.²²

Here we studied the response of the cardiovascular system after a maximal anaerobic test following a protocol of lower limb resistance training under an intermittent simulated altitude exposure programme. We evaluated the decrease in heart rate for 3 min after the end of the test. Tests comprised a 60-s continuous countermovement jump^{23,24} and was conducted at sea level. HRR was considered an indicator of improved fitness. HRR heart rate recovery index (HRRi) was calculated by applying the formula described by Lamiel-Luengo.^{1,3}

Materials and methods

The design of this study resembles that of a clinical trial. The training programme was conducted at two centres. Subjects were aged between 19 and 33 years of age (see Table 1).

Table 1 Antropometric data from subjects (n=12).

Age (years)	24.1 ± 4.21
Height (cm)	174.3 ± 7.47
Body mass (kg)	68.9 ± 7.4
Body mass index	22.4 ± 1.81

All were physical education students or teachers that did not practice elite sport but were in an acceptable physical condition. All were non-smokers and were presumably healthy. All subjects voluntarily consented to participate in the study. Subjects attended two informative sessions prior to the start of the study. During the first they were informed about the objectives of the study, the nature and risks of the training and the evaluation tests to be applied. The study was designed in accordance with the ethical standards of the University of Barcelona's Ethical Committee and the principles of the Helsinki Declaration of 1975, revised in 1983. In the second session subjects were familiarized with the training procedures. On the basis of the results of the initial test (PRE), they were assigned to the hypoxia (HYP, $n=5$) or normoxia (NOR, $n=7$) group in order to homogenise gender and fitness status.⁶ Both groups trained in equal terms of timing and schedule, workload volume and the materials used, with the only difference being exposure to a hypoxic and normoxic environment respectively. All the subjects were subjected to 12 specific training sessions in which the characteristics of the effort were maintained throughout all the programme with a fast execution level but without reaching muscle failure. Each session included additional exercises with compensatory stretching (hamstrings, iliopsoas, quadriceps, lower back, abdomen, etc.). The training protocol for the HYP group was conducted in a hypobaric chamber located on the campus of Bellvitge (Barcelona) at a barometric pressure of 760 hPa (570 mmHg), equivalent to 2500 m above sea level corresponding to the geographic barometric pressure in most altitude training centres.^{17,27} The NOR group trained in the Montjuïc Centre (Barcelona) of the Catalonia National Institute of Physical Education (INEFC) (75 m above sea level).

Specific strength training of lower limbs was scheduled with the aim to improve their lactic anaerobic capacity and thus jumping ability and retention time.^{24,25} The training programme included 12 sessions (3 days per week; 4 weeks) oriented to specifically train lower extremity strength endurance through half-squats, jump-squats and jumps. All subjects did a standardised warm-up in which they performed 4–5 min of aerobic exercise (mostly static cycling) followed by static stretching and dynamic activity. This was followed by a series of warm-up exercises with a lower work load than those individually prescribed for each training session. The main training was of high intensity (full individually prescribed workload) and designed to be suitable for the nature of the performance assessment test proposed (a series of countermovement jumps for 60 s). Workload volume was slightly increased in the first 2 weeks but did not reach the maximal level. The execution speed was controlled and subjects did not lift their heels off the ground. The recovery time between the sets of exercises was incomplete, in order to induce fatigue and muscle accumulation of metabolites (lactate, H^+ , etc.). The purpose was to improve lactic anaerobic capacity, muscular buffer capacity and blood clearance. This training can be described as a succession of short intense intervals. During the last 2 weeks of the programme, main intervals were performed at supramaximal intensity but with a marked reduction of the volume in comparison to the first two weeks. The maximum speed of execution was for loaded (week 3) and unloaded (week 4) jumps. Recoveries between series were

also longer. The approximate volume was 350–380 repetition/week ((week 1), 500–530 rep/week (week 2), 300–320 rep/week (week 3) and 200–220 rep/week (week 4)). An example of sessions for a representative individual was: Week 1, A series of 15 repetitions of 3 sets with 1 min of recovery between sets. The whole session consisted of 3 of this series with an intermediate recovery of 6 min. Week 2, Two series, with 8 min of intermediate recovery, comprising 4 sets (25 repetitions) with 90 s of recovery between sets. Week 3, 3 series, with 5 min recovery between them, composed of 5 repetitions of 10 sets with 45 s of recovery between sets. Week 4, 3 series, with 6 min recovery between them, consisting of 2 sets of 10 jumps with 2 min of recovery between sets.

The material used for training sessions consisted of Olympic bars and free weights. Metronomes were used to control the rhythm of execution and intensity.²⁶ The execution speed varied from fast controlled explosive, to fast, following the paradigm of cross training as the most appropriate method for improving jumping ability.²⁵

To study changes in lactic anaerobic capacity, a continuous jump test for 60 s (CMJ60 s) was performed. A contact platform (Chronojump) was used following Bosco's^{23,24} protocol to assess the average height and time in the air of each jump. Heart rate was monitored with standard cardiometers (Polar S810i and RS800) during the test and the recovery period and data were transferred via infrared port to a PC. Data were processed with Polar software (Polar Protrainer 5.0). Data were collected from the highest intensity of implementation, and the HRR from maximum heart rate reached at the end of the CMJ60 s test was examined. After ending the tests, the subjects lay immediately on an examination couch and rested for 15 min until recovery.

To assess the HRR, the following formula was applied³:

$$HRR I = \frac{HR_{\max} - HR_i}{HR_{\max \text{ theor}} / HR_{\max}}$$

where HR_{\max} is the maximum heart rate achieved in the test, HR_i is the heart beat frequency at min 1, 2 and 3 of the recovery period respectively, and $HR_{\max \text{ theor}}$ is the theoretical maximum heart rate for each subject using the following calculations: Men: $220 - \text{age in years}$; and Women: $(226 - \text{age in years})$.

A monitoring form was completed for each subject daily during the training programme. Subjects were asked to conduct a daily check on their waking basal heart rate (waking, resting) for 60 s. Also, in an attempt to associate individual stress perception with the possible effect of training on quantifiable physiological variables, subjects were also asked to provide a subjective analysis of the perception of accumulative fatigue and the feeling of recovery from the previous training session.

Statistical analysis

The HRR I was compared between the two experimental groups using Student's t -test for paired samples (pre-post results into each group) and t -test between groups. $P < 0.05$ was considered to denote significance. Sample means and standard errors are presented by the acronym \pm SE.

Table 2 Individual values for body mass and basal (BHR) and peak (PHR) heart rates in normoxia and hypoxia.

Subject code	Age	Body mass	BHR	PHR
<i>Normoxia group</i>				
NOR 1	20	70.6 (−0.8)	81 (−6)	182 (+1)
NOR 2	24	71 (−0.4)	77 (−6)	179 (+11)
NOR 3	24	64.6 (+0.6)	91 (−22)	186 (−1)
NOR 4	19	61 (−1.9)	73 (−7)	180 (+4)
NOR 5	33	74.3 (−0.9)	54 (−1)	176 (−1)
NOR 6	26	85.2 (−0.8)	71 (−13)	175 (+7)
NOR 7	25	79.0 (−0.5)	59 (+2)	188 (+7)
NOR mean	24.4 ± 4.6	72.2 ± 8.2	72.3 ± 12.7	179.8 ± 4.8
<i>Hypoxia group</i>				
HYP 1	29	70.8 (0)	46 (−4)	149 (+13)
HYP 2	24	70.2 (−0.2)	56 (+8)	160 (+5)
HYP 3	22	59.2 (−1.8)	81 (−9)	184 (−1)
HYP 4	18	66 (+0.6)	74 (−11)	186 (−19)
HYP 5	27	59.0 (+1)	59 (−5)	161 (+1)
HYP mean	24.0 ± 4.3	65.0 ± 5.7	63.2 ± 14.1	168 ± 16.2

Values are pre-training, parentheses show the difference at the post-training test.

Results

The anthropometric data of the subjects participating in the study are shown in Table 1.

Table 2 shows the individual changes in body mass and in the basal and peak heart rates when comparing the two tests before and at the end (when comparing in parentheses relative to the previous test) of the training programme. Table 3 presents the HRRI values for the first 3 min after completion of the jump test. Table 4 shows the statistical analysis of HRRI data and the corresponding *P* values and statistical significance (Fig. 1).

Body mass changes

The NOR group registered a decrease in body weight after the training programme (1.08 ± 0.74%). A reverse trend was found in the HYP group, which showed a slight increase in body weight (0.5 ± 1.07%). However, these differences were not statistically significant.

Basal and peak heart rate values

With some individual variability, the basal heart rate showed a decrease after the training programme in both groups. In the NOR group a statistically significant (*P* = 0.045) decrease of −11.5% from PRE to POST was found, whereas for HYP a non-statistically significant change (*P* = 0.273) of −5.2% was detected. Peak heart rate (PHR) in these two groups did not show relevant or statistically significant changes when comparing PRE vs. POST data.

HRRI

Table 4 shows the statistical significance when comparing HRRI values for PRE and POST training conditions between the NOR and HYP groups (upper panel). No statistical differences in PRE condition was detected between NOR and HYP groups. However, there was a significant improvement in minutes 2 (*P* = 0.03) and 3 (*P* = 0.05) in the HYP group in the POST training test in comparison to NOR.

Table 3 Heart rate recovery index (HRRI) for the first 3 min after finishing the test. Values are presented for the normoxia and hypoxia groups. Pre- and post-training protocols.

	NOR		HYP	
	Pre	Post	Pre	Post
BHR	72.2 ± 12.7	64 ± 6.76	63.2 ± 14.1	59 ± 10.2
PHR	179.8 ± 4.8	183.5 ± 10.21	168.0 ± 16.2	167.8 ± 8.8
HRRI 1 min	19.7 ± 0.5	32.55 ± 6.2	23.8 ± 7.0	37.4 ± 7.5
HRRI 2 min	35.7 ± 2.0	45.6 ± 0.2	33.7 ± 12.6	63.2 ± 10.5*
HRRI 3 min	43.5 ± 2.5	56 ± 2.2	46.88 ± 14.9	75.6 ± 14.6*

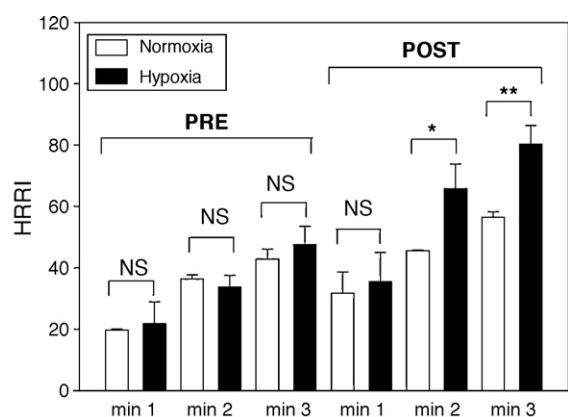
BHR (basal heart rate); PHR (peak heart rate); HRRI 1 min, HRRI 2 min, HRRI 3 min (Heart Rate Recovery index at minutes 1, 2 and 3 after completion of the test). NOR: normoxia group; HYP: hypoxia group.

* Statistical significance between NOR and HYP for post-training data.

Table 4 Statistical analysis (student's *t*-test) between groups on the basis of pre- and post-training data. Statistical (significance (SS)) level was taken at $P < 0.05$.

<i>t</i> -test Pre-training NOR vs HYP			<i>t</i> -test Post-training NOR vs HYP		
Time (min)	<i>P</i> value	SS	Time (min)	<i>P</i> value	SS
1	0.22	NO	1	0.38	NO
2	0.46	NO	2	0.03	YES
3	0.41	NO	3	0.02	YES

Paired <i>t</i> -test PRE vs POST into normoxia group			Paired <i>t</i> -test PRE vs POST into hypoxia group		
Time (min)	<i>P</i> value	SS	Time (min)	<i>P</i> value	SS
1	0.07	NO	1	0.04	YES
2	0.01	YES	2	0.005	YES
3	0.02	YES	3	0.005	YES



* statistical significances between groups post-training minute 2' heart rate recovery Index. $P=0,03$

** statistical significances between groups post-training minute 3' heart rate recovery Index. $P=0,02$

Figure 1 Statistical significances between groups post-training.

Both (normoxic and hypoxic) training protocols improved the HRRI (lower panel). In the HYP group this enhancement was statistically significant during the first 3 min, but only for minutes 2 and 3 in the NOR group.

Discussion

The individuals were suitably assigned to the two groups in order to homogenise the sample, as can be seen when examining initial fitness values (comparison of PRE data between the two groups). Furthermore, our strength/endurance training protocol (12 sessions, 4 weeks, 3 days per week) improved the HRRI in NOR and HYP subjects. On the basis of our findings, we conclude that the endurance strength of lower limbs improved in hypoxia and normoxia, thus enhancing the jump capacity for all subjects. However, this improvement was greater for those who trained under hypoxia. Our results indicate that the HRRI of the HYP group was better than that for the control group (NOR). Statistically significant differences were detected between groups at minutes 2 ($P=0.03$) and 3 ($P=0.05$) post-training. The HYP group showed higher recovery values, reaching

almost basal values in minute 3. This finding indicates improved cardiovascular adaptation to exercise and thus better fitness.^{2,7,14}

Altitude training induces greater intensity of the training baseline, particularly during changes of specific muscle enzymes, and thus results in increased run-intensity training.^{24,26} We propose that the improvement in HRRI observed is due to a higher training stimulus at simulated altitude despite applying the same relative intensity workload as at sea level. Thus, with the same degree of effort as at sea level, training in a hypoxic environment increases the intensity of the exercise, both from subjective and from objective points of view. The additive stimulus of hypoxia may elicit more intense adaptive responses at muscular level by increasing the relative intensity of the effort. Thus, according to our findings, a strength/endurance training programme performed in moderate hypoxia could be useful to improve the fitness and HRR of athletes than equal training in normoxia. Therefore, we must consider that sample size was too low to establish definitive conclusions and more studies are needed.

Physical exercise in hypoxia involves a number of cardiovascular changes. There is an increase in resting heart rate and greater hyperventilation in order to compensate for the reduced availability of oxygen.²⁸ Thus, at least in part, high intensity exercise does not achieve such high heart rates as at sea level.²⁹ Hypoxia directly affects the vascular tone of the pulmonary and systemic resistance vessels and increases ventilation and sympathetic activity via stimulation of peripheral chemoreceptors.³⁰ As a result of acute hypoxia, the heart increases its beat rate (both at rest and during exercise), myocardial contractility, and output. The increase in heart rate is directly related to enhanced sympathetic activity and vagal withdrawal. Thus, heart rate is higher at altitude, although the maximum heart rate is reduced compared to normoxia. Enhanced parasympathetic neural activity accounts for the diminished heart rate during exercise. Moreover, during acute hypoxia, epicardial coronary arteries dilate and cardiac contractility increases suddenly.³¹

The improved cardio-respiratory response observed in the HYP group could be due to the greater relative intensity of the same workload than in NOR group.

The decrease in the post-exercise heart rate is typically exponential.³²

The decrease during the first minute is marked by variables such as parasympathetic blockade. In contrast, in the second phase (after the first minute), it is believed to be mediated by the gradual withdrawal of sympathetic activity and steady plasma clearance of metabolites (epinephrine, lactate, H⁺, etc.) caused by the high intensity exercise.³³ On the basis of this rationale, the training protocol significantly changed the decline HRR HYP group versus the NOR group during post-training. This observation could be attributable to distinct sympathetic activity and increased removal of plasma metabolites, as reflected in the HYP group by an improved HRRI over time. Thus, plasma metabolite clearance and sympathetic activity was altered after twelve sessions of intermittent hypoxia.

Assessment of HRR from maximal exercise in the first few minutes after exercise is a valid estimate of the risk of sudden death. Given the increasing numbers of sudden death cases, this approach provides a useful non-invasive tool to assess the health and fitness of subjects.⁸

Several protocols have been reported in order to measure perceived exertion closely related to the physiological effects of training. In fact, it has been shown that physiological factors have a greater influence than psychological ones on the perception of fatigue, because training changes the way stress is perceived.³⁴

In our case, the subjective perception of exertion was higher in the HYP group (unpublished data), thereby supporting the hypothesis described above. Since it is not possible to assess the effect of self-suggestion or placebo and a double-blind experimental design is also impossible (subjects know if they are training into the chamber or not), we can only compare two different groups.²⁷

An important negative effect of training in altitude on certain sport modalities is the limitation on workload intensity (relative to sea level) and the difficulty of maintaining high intensities of motor execution. Both factors can prevent the achievement of valid specific workouts in hypoxia. It has been argued that the difficulty involved in motor execution, at real or simulated altitude, impairs the efficiency of the motor coordination needed for the implementation of specific technical measures (stride, stroke, cadence, etc.) because of the difficulty of maintaining the same intensities as at sea level.³⁵ In our case, the execution of squat jumps were technically maintained and performed equally by both groups.

We conclude that a high intensity (strength/endurance) physical training programme (4 weeks, 3 days per week) performed in hypoxia improves the HRRI in first 3 min after exercise has ended compared to the same training at sea level. Our training protocols in hypoxia have allowed a better recovery from maximal stimulation and also have improved fitness and performance opportunities. In addition, individual subjective perception of effort (higher in HYP than in NOR) supports the hypothesis of an increased relative intensity of effort in the group training at simulated altitude.

The physiological and psychological effects of training in a hypobaric chamber could explain the enhanced improvement in the performance of the HYP group compared with same training in NOR group. Also, the possible increase in

the relative intensity of the effort performed under hypoxia should be taken into account to objectively evaluate the improvement in performance. We consider that our findings may contribute to new applications in the field of high performance training for athletes.

Presentation

The heart rate data in the recovery phase were presented at the VI International Congress of the Spanish Association of Sports Science in Elche, on October 6, 2010. There was a poster presentation of 10 min, with open questions, from 11 to 11.15 am.

Conflicts of interest

The authors have no conflicts of interest to declare.

Acknowledgements

This study would not have been possible without the generous collaboration of all the volunteers. The authors also thank Dr. Casimiro Javierre (Faculty of Medicine, UB) and Rubén Martínez (HUB) for their help and medical supervision. The authors also thank Mr. Ignacio Montoya (ZR Barcelona) and Mr. Santiago Blázquez (Fibre Medic) for their cooperation and for the loan of material.

References

- Calderon FJ, Cruz E, Montoya J. Estudio comparado de la recuperación de la frecuencia cardíaca en deportistas de fondo: triatletas, atletas, nadadores y ciclistas. Área de fisiología del ejercicio-Rendimiento deportivo, 261. I Congreso de la Asociación deportiva de Ciencias del deporte. Universidad de Extremadura.
- Darr K, Basset B, Morgan B, Thomas D. Effects of age and training status on heart rate recovery after peak exercise. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 1988;254:H340-3.
- Calderón Montero FJ, Brita Paja JL, González C, Machota V. Estudio de la recuperación de la frecuencia cardíaca en deportistas de élite. *Revista Española de la Medicina de la Educación Física y el Deporte.* 1997;6:101-5.
- Savin WM, Davidson DM, Haskell WL. Human contribution to heart rate recovery from exercise in humans. *J Appl Physiology.* 1982;53:1572-6.
- Imai K, Sato H, Hori M. Vagally mediated heart rate recovery after exercise is accelerated in athletes but blunted in patients with chronic heart failure. *J Am Coll Cardiol.* 1994;24:1529-35.
- Arai Y, Saul JP, Albrecht P. Modulation of cardiac autonomic activity during and immediately after exercise. *Am J Physiol.* 1989;256:H132-41.
- Cole C, Blackstone E, Pashkow F, Snader C, Lauer M. HRR immediately after exercise as a predictor of mortality. *Hellenic Endocr Soc.* 1999;341:1351-7.
- Jouven X, Empana JP, Schwartz P, Desnos M, Courbon D, Ducimetiere P. Heart rate recovery during exercise as a predictor of sudden death. *N Engl J Med.* 2005;352:1951-8.
- Levine BD. Intermittent hypoxic training: fact and fancy. *High Alt Med Biol.* 2002;3:177-93.
- Martino M, Myers K, Bishop P. Effects of 21 days training at altitude on sea-level anaerobic performance in competitive swimmers. *Med Sci Sports Exerc.* 1996;27:55.

11. Weston AR, Mbambo Z, Myburgh KH. Running economy of African and Caucasian distance runners. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;32:1130-4.
12. Frisancho AR, Martinez C, Velasquez T, Sanchez J, Montoye H. Influence of developmental adaptation on aerobic capacity at high altitude. *J Appl Physiol.* 1973;34:176-80.
13. Kollias J, Powers SK, Thompoms D. Work capacity of long-time residents and newcomers to altitude. *J Appl Physiology.* 1968;64:1486-92.
14. Bayley, Davies. Physiological implications of altitude training for endurance performance at sea level: a review. *Br J Sports Med.* 1997;31:183-90.
15. Hendriksen IJ, Meeuwse T. The effect of intermittent training in hypobaric on sea level a cross over study in humans. *Eur J Appl Physiol.* 2003;88 4-5:396-403.
16. Ogida F, Tobata T. The effects of high-intensity intermittent training under a hypobaric hypoxia condition on anaerobic capacity and maximal oxygen uptake. In: Keskinen KL, Komi PV, Hallander AP, editors. *Biomechanics and Medicine of Swimming VIII.* Jyväskylä, Finland: Gummerus Printing; 1999. p. 423-7.
17. Stray-Gundersen J, Chapman RF, Levine B. "Living high, training low" altitude training improves sea level performance in male and female elite runners. *J Appl Physiol.* 2001;91:1113-20.
18. Burtscher M, Nachbauer W, Baumgartl P, Philadelphia M. Benefits of training at moderate altitude versus sea level training in amateur runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1996;74:558-63.
19. Levine BD, Stray-Gundersen J. "Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J Appl Physiol.* 1997;83:102-12.
20. Brugniaux JV, Schmitt L, Robach P, Nicolet G, Fouillot JP, Moutereau S, et al. Eighteen days of "living high, training low" stimulate erythropoiesis and enhance aerobic performance in elite middle-distance runners. *J Appl Physiol.* 2006;100:203-11.
21. Bonnetti DL, Hopkins WG, Kilding AE. High-intensity kayak performance after adaptation to intermittent hypoxia. *Int J Sports Physiol Perform.* 2006;1:246-60.
22. Gore CJ, Hahn AG, Aughey RJ, Martin DT, Ashenden MJ, Clark SA, et al. Live high:train low increases muscle buffering capacity and submaximal cycling efficiency. *Acta Physiol Scand.* 2001;173:275-86.
23. Bosco C, Luhtanen P, Komi PV. A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *Eur J Appl Physiol.* 1983;50:273-82.
24. Bosco C, Komi PV, Thyhany G, Feleke G, Apor P. Mechanical power and fibre type composition of human leg extensor muscles. *Eur J Appl Physiol.* 1983;51:129-35.
25. Verhoshansky Y. *Teoría y Metodología del entrenamiento deportivo.* Ed. Paidotribo; 2001.
26. Moras G, Rodríguez-Jimenez S, Busquets A, Tous-Fajardo J, Pozzo M, Mujika I. A Metronome for controlling the mean velocity during the bench press exercise. *J Strength Cond Res.* 2009;23:926-31.
27. Beedie CJ. Placebo effects in competitive sports: qualitative data. *J Sports Sci Med.* 2007;6:21-8.
28. Heistad DD, Abboud FM. Circulatory adjustments to hypoxia. *Circulation.* 1980;61:463-70.
29. Bärtisch P, Gibbs SR. Effect of altitude on the heart and the lungs. *Circulation.* 2007;116:2191-202.
30. Perini R, Orizio C, Comandè A, Castellano M, Beschi M, Veicsteinas A. Plasma norepinephrine and heart rate dynamics during recovery from submaximal exercise in man. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1989;58:879-83.
31. Buchheit M, Papelier Y, Laursen P, Ahmaidi S. Noninvasive assessment of cardiac parasympathetic function: postexercise heart rate or heart rate variability? *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 2007;293:H8-10.
32. Noakes TD. Physiological models to understand exercise fatigue and the adaptations that predict or enhance athletic performance. *Scand J Med Sci Sports.* 2000;10:123-40.
33. Platonov V. *La adaptación en el deporte.* Barcelona: Paidotribo; 1991.
34. Borg G, Borg E. A new generation of scaling methods: level-anchored ratio scaling. *Psychologica.* 2001;28: 15-45.
35. Amann M, Pegelow DF, Jacques AJ, Dempsey JA. Inspiratory muscle work in acute hypoxia influences locomotor muscle fatigue and exercise performance of healthy humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2007;293: R2036-45.



apunts

MEDICINA DE L'ESPORT

www.apunts.org



REVISIÓN

Potenciales aplicaciones del entrenamiento de hipoxia en el fútbol[☆]

Jesús Álvarez-Herms^{a,*}, Sonia Julià-Sánchez^a, Aritz Urdampilleta^b, Francesc Corbi^c y Ginés Viscor^a

^a *Departament de Fisiologia i Immunologia, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona, España*

^b *Departamento de Nutrición, Facultad de Farmacia, Universidad del País Vasco (UPV), España*

^c *Facultat de Ciències de l'Activitat Física i l'Esport - Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya, Centre de Lleida, Universitat de Lleida (Udl), Lleida, España*

Recibido el 29 de noviembre de 2011; aceptado el 26 de marzo de 2012

PALABRAS CLAVE

Hipoxia;
Fútbol;
Fisiología;
Entrenamiento

Resumen En el fútbol profesional entrenar en hipoxia no es una práctica extendida, aunque las posibles mejoras en el rendimiento físico obtenidas a través de su uso podrían ser relevantes en la preparación y recuperación física. El carácter de esfuerzo intermitente que define el fútbol requiere que el jugador se recupere lo más rápido posible entre esfuerzos de alta y baja intensidad. En un estudio previo realizado por este grupo de investigación se constató una mejora significativa de la frecuencia cardíaca de recuperación desde esfuerzo máximo después de realizar un protocolo de entrenamiento de fuerza resistencia en hipoxia intermitente. Del mismo modo, los beneficios fisiológicos de la exposición y entrenamiento en hipoxia podrían aumentar el rendimiento individual de los jugadores de fútbol. Este estudio pretende revisar los estudios publicados sobre el tema y el uso y las posibles aplicaciones del entrenamiento en hipoxia para el rendimiento físico en el fútbol.

© 2011 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

KEYWORDS

Hypoxia;
Football;
Physiology;
Training

Potential applications of hypoxia in football training

Abstract The use of hypoxia in professional football training is not widely used although improvements in physical performance obtained with hypoxia could be relevant for the fitness and physical recovery. Football is defined as an intermittent effort sport and requires that players recover as quickly as possible between great efforts. In a study previously carried out by

[☆] La temática de dicho artículo ha sido presentada en el I Congreso de fútbol RCDE-INEFC realizado en el INEFC de Barcelona el 1 junio de 2011 con la organización conjunta con el club de fútbol profesional Español de Barcelona. Dicho artículo no ha sido publicado en ninguna otra revista ni enviado para su aceptación.

* Autor para correspondencia.

Correos electrónicos: jesusalvarez80@hotmail.com, jalvar54@xtec.cat (J. Álvarez-Herms).

this research group a significant improvement was found in heart rate recovery from maximal exercise after performing strength resistance training in intermittent hypoxia. Similarly, the physiological benefits of exposure and training in hypoxia may increase the individual performance of soccer players. The main aim of this review is analyze the literature on the use and possible applications of hypoxia training for physical performance in football.

© 2011 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

Introducción

En los últimos años, el fútbol profesional ha evolucionado considerablemente en los métodos utilizados para la mejora del área condicional, la recuperación, la preparación psicológica, la prevención de lesiones y la rehabilitación. En paralelo, la exposición a hipoxia (aguda, crónica, intermitente, real, simulada, activa o pasiva) es utilizada como método de entrenamiento para la mejora del rendimiento físico-deportivo. Aun así, no existe una prescripción definitiva sobre la mejor «dosis» exacta en el uso y exposición de hipoxia, sobre todo en deportes de carácter intermitente y colectivo. Diferentes autores han analizado gran cantidad de trabajos científicos existentes sobre la temática con resultados ambiguos sobre su utilización¹. Bonetti et al.¹, en un artículo de metaanálisis exhaustivo sobre ejercicio físico en hipoxia, describen un consenso en la prescripción de ejercicio para la mejora del rendimiento aeróbico pero argumentan discrepancias en el posible efecto del entrenamiento anaeróbico e intermitente.

El deporte colectivo, a diferencia del deporte individual, está integrado en un sistema técnico-táctico de conjunto donde el rendimiento final no está necesariamente relacionado con variables fisiológicas, anatómicas o mecánicas, aunque sí parece estar influenciado positivamente por ellas.

El interés científico-deportivo del estudio fisiológico de la respuesta a la altitud tiene sus inicios a partir de los grandes éxitos logrados en pruebas de fondo por los atletas africanos residentes en zonas de altitud moderada (1.800-3.000 m sobre el nivel del mar) en los Juegos Olímpicos de México de 1968, donde su irrupción en el panorama deportivo fue sorprendente².

Esta situación ha propiciado que se genere un especial interés entre la comunidad científico-deportiva por el estudio de los posibles factores que permitan explicar un incremento en el rendimiento de los atletas que viven en altitud respecto a los que lo hacen en normoxia, relacionando en última instancia los efectos de la altitud con un incremento en el rendimiento. Esta afirmación no puede considerarse una afirmación definitiva, pues los factores de rendimiento deportivo final son multifactoriales (motivación, ambiente deportivo, mentalidad...). Existen numerosas hipótesis que han surgido en el transcurso de los años que intentan explicar dicha mejora y se han descrito, desde un punto de vista científico, cambios fisiológicos orgánicos en el ser humano después de la exposición a diferentes alturas².

El organismo humano obtiene energía a través de procesos metabólicos aeróbicos y anaeróbicos³, y la respuesta metabólica es diferente en función de la intensidad del

estímulo. La capacidad de rendimiento física en hipoxia se ve ligeramente disminuida a medida que la altitud a la cual se realiza la actividad física es mayor⁴. Existe un cierto consenso científico sobre la utilidad de los efectos de exposición a la altura sobre el rendimiento deportivo predominantemente aeróbico⁵ y su utilización está extendida en el entrenamiento deportivo en pruebas de medio fondo y fondo de carácter individual (ciclismo, atletismo, triatlón, remo...). En contraposición, el entrenamiento en hipoxia para mejorar los efectos del rendimiento anaeróbico han sido menos estudiados: los estudios difieren en su protocolización y medición, y por ello su aplicación es más controvertida. Aun así, existen diversos estudios que argumentan efectos positivos sobre el rendimiento anaeróbico⁶⁻⁸.

La periodización anual en fútbol requiere de una estructuración diferente a la utilizada en los deportes de rendimiento individual. Aunque existen diferentes metodologías de periodización en el fútbol en función de los diferentes métodos y sistemas de juego utilizados, es común a todos ellos que se busque conseguir el mantenimiento de un rendimiento alto (pero no máximo) durante el máximo tiempo posible, a lo largo de la temporada⁹, con picos de forma puntuales en función de los objetivos deportivos.

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis de los efectos del entrenamiento físico con exposición a hipoxia (intermitente, crónica, aguda, real o simulada) y su posible aplicación en el fútbol, con el objetivo de maximizar el rendimiento físico individual. Se ha revisado y analizado un amplio número de publicaciones científicas de relevancia relacionadas con el rendimiento deportivo en general para justificar y resumir los aspectos positivos y negativos (fisiológicos, mecánicos y perceptivos) que podría devenir de su aplicación en el entrenamiento en el fútbol.

En el campo de la rehabilitación y/o recuperación de estados de lesión e inactividad, la aplicación del entrenamiento en hipoxia en períodos de recuperación o en jugadores lesionados también puede resultar interesante como forma de mantener estados de forma más elevados o como medio para facilitar la reintroducción del jugador lesionado en la dinámica grupal lo antes posible después de períodos de inactividad¹⁰. En este último punto, Álvarez-Herms et al.¹¹ comprobaron que el entrenamiento de fuerza-resistencia en hipoxia hipobárica en un grupo de deportistas mejoraba la frecuencia cardíaca de recuperación y la capacidad anaeróbica láctica en un ejercicio máximo, en comparación con un grupo control en normoxia. Este aspecto sería importante para que jugadores lesionados pudieran entrenar (fuerza, reeducación postural, exposición pasiva a altitud...) en la fase de baja y, mediante

el estímulo externo y perceptivo-fisiológico aumentado de la hipoxia (que aumenta las necesidades metabólicas y adaptativas), compensar esta falta de estímulos intensivos específicos. El objetivo en este caso sería volver a la dinámica del grupo en mejor condición física que realizando el mismo entrenamiento de rehabilitación en normoxia¹⁰.

En el alto rendimiento deportivo es clave el término de la especificidad en el entrenamiento. Este aspecto es clave en la potenciación del entrenamiento deportivo profesional, y por ello la aplicación de nuevas metodologías adaptables debe ser tomada en consideración de cara a mejorar los sistemas de entrenamiento.

Estado de la cuestión

Análisis científico de la fisiología y la hipoxia

A partir de los resultados de diferentes estudios científicos se han descrito cambios fisiológicos con la exposición a la altitud (real o simulada, crónica, aguda o intermitente). De la bibliografía analizada en este estudio se describen como resumen los siguientes puntos:

1. Existencia de un *acuerdo global sobre la utilidad del entrenamiento aeróbico a baja altitud en combinación con la residencia en altitud moderada para la mejora del rendimiento físico a nivel del mar (living high-training low)*^{5,12,13}.
2. Diversas investigaciones concluyen que con cortos períodos de exposición ya se aprecian mejoras en el rendimiento anaeróbico aunque existe una *menor cantidad de investigaciones concluyentes sobre los efectos del entrenamiento anaeróbico en hipoxia*^{8,14-18}.
3. Esta *mejora en el metabolismo anaeróbico en hipoxia*¹⁹⁻²² sería debida a una potenciación de la vía anaeróbica por la mayor contribución energética de la vía en hipoxia^{18,23,24} y a una respuesta más eficiente a los procesos limitantes por el ejercicio en anaerobiosis (efecto tampón [*buffer*] y respuesta al estrés)^{25,26}.
4. En los ejercicios con un número de imitaciones mantenidas y/o repetidas en el tiempo (lanzamientos de balonmano, chuts de fútbol, sprints continuos...) y cuyo nivel de eficacia debe mantenerse hasta el último momento, el rendimiento se puede ver afectado por una disminución en el aporte de energía y por una limitación en la capacidad de mantenimiento de la intensidad requerida. Por ello, la *mayor intensidad relativa, la mayor especificidad*²⁷, la *mayor respuesta a la anaerobiosis (buffer)*, el aumento de la citrato sintasa¹⁵ y de la mioglobina²⁸, un aumento en el número de capilares con el entrenamiento en hipoxia²⁹ y los cambios en expresión de genes PFK por vía anaeróbica en hipoxia³⁰ pueden tener efectos positivos sobre la capacidad de repetir determinados gestos deportivos.
5. La mejora en la recuperación de la frecuencia cardíaca máxima desde ejercicios máximos es un parámetro fisiológico positivo en deportes con carácter de esfuerzo intermitente donde es primordial la recuperación entre esfuerzos máximos. A este efecto, Álvarez-Herms J et al.¹¹ encontraron mejoras en el índice de recuperación de la frecuencia cardíaca máxima desde ejercicio

máximo en sujetos que entrenaron fuerza-resistencia en hipoxia intermitente (12 sesiones durante 4 semanas a 2.500 m) respecto a los que entrenaron equitativamente en normoxia. Este punto sería fundamental para aumentar la competencia de los futbolistas por el aumento de su nivel de rendimiento.

Hipoxia y fútbol

Paralelamente al análisis y descripción de la bibliografía existente sobre entrenamiento deportivo e hipoxia, se ha realizado una búsqueda en diferentes bases de datos científico-médicas (Medline, Sportdiscus y Google Scholar) sobre la utilización de la hipoxia y las condiciones de adaptación y de juego en el fútbol. Se acotaron las palabras clave a cuatro: «hipoxia», «fútbol», «entrenamiento» y «aclimatación». La búsqueda se realizó con las palabras clave en inglés. Se descartaron artículos no relacionados con el entrenamiento y competencia en altitud, aclimatación y/o consenso científico. Un total de 12 artículos específicos sobre fútbol e hipoxia han sido revisados extensamente.

En esta revisión se ha constatado que existe controversia sobre la posibilidad de prohibición de la competición futbolística cuando esta se desarrolle a ciertas altitudes, debido a que esta pueda dificultar el rendimiento físico o incluso la salud. A este efecto, se ha analizado la respuesta orgánica fisiológica con la intención de obtener información que permita llegar a un posicionamiento³¹.

Se ha descrito que competir en fútbol en altitud moderada y sin aclimatación previa reduce el desempeño físico y aumenta la percepción subjetiva de esfuerzo, pudiendo influir negativamente en la vertiente psicológica del deportista³². Levine et al.³³ describieron que en el jugador de fútbol, como en cualquier atleta, existe un descenso en su VO₂max (rendimiento aeróbico) compitiendo en altitud moderada, con aumento de la intensidad relativa de esfuerzo y manifestando una menor capacidad de recuperación de la vía de los fosfágenos. Este aspecto disminuiría la capacidad de realizar acciones repetidas de alta intensidad. Este aspecto es clave, dada la naturaleza de la ejecución específica en el fútbol, donde gran parte de estas acciones tendrán un importante componente técnico. Ello de debe a una mayor dificultad para captar oxígeno del ambiente y transportarlo a las mitocondrias musculares, lo que se refleja en un descenso en la saturación de oxígeno arterial, que provocaría una mayor acidificación del medio interno muscular.

Sin aclimatación, a medida que aumenta la altitud existen respuestas fisiológicas inmediatas —el aumento de la frecuencia cardíaca y de la ventilación incluso en reposo— como mecanismo compensatorio^{34,35}. Además, como ya se ha descrito anteriormente, el metabolismo anaeróbico aumenta su protagonismo y con ello la utilización de glucosa como sustrato principal, tendiendo al agotamiento precoz de las reservas, que condicionaría el rendimiento final del deportista. Curiosamente, esta mayor explotación de reservas glucolíticas se traduce en ciertos beneficios en la prevención de patologías como la diabetes mellitus, la resistencia a la insulina y el síndrome metabólico, con la aplicación del entrenamiento físico en altitud moderada (1.700-2.400 m)³⁶. En relación con este último punto,

estrategias nutricionales deberían ser tenidas en cuenta para la competencia y entrenamiento en altitud.

Con estas premisas, se han descrito desventajas en equipos no aclimatados a la altitud, cuando estos compiten en altitudes superiores a 2.000m. Entre ellas destacan la aparición del mal agudo de montaña, el sueño irregular, un aumento en la frecuencia cardíaca basal y en la producción de lactato, y un descenso (dependiente de la altitud y de la tolerancia individual a la hipoxia) de hasta el 25% del VO_2max ³⁷. Ante estos efectos, se propone la aclimatación previa como método de mejora de la salud y el rendimiento físico en altitud. El uso de la hipoxia intermitente como método de preparación de la competición en altitud se ha propuesto como válido en el rendimiento físico de resistencia aeróbica y anaeróbica³⁸⁻⁴⁰. Además, la respuesta individual puede acentuar la intolerancia a la altitud.

Aunque los parámetros fisiológicos alcanzados en un partido de fútbol no son tan elevados en comparación con los alcanzados en algunos deportes individuales, la mejora que se obtendría con los beneficios del entrenamiento en hipoxia podría hacer aumentar la competencia técnico-táctica del jugador por un aumento en la capacidad. En este caso, Helgerud et al.⁴¹, al estudiar jugadores juveniles de la selección noruega de fútbol, observaron que una mejora en el 10% del VO_2max se correlacionaba con un incremento del 20% en la distancia recorrida en el partido y de un 100% en el número de sprints realizados. Cuando comparamos el rendimiento en altitud de jugadores aclimatados y no aclimatados, se constatan claras diferencias que podrían influir en el resultado final. Hemos de asumir que esto es muy relativo en función del nivel específico de los equipos (técnico-táctico).

El encaje de la intervención en hipoxia intermitente en la periodización anual

Tal y como se ha descrito⁴²⁻⁴⁴, el fútbol es un deporte complejo en el que el rendimiento final depende de procesos técnicos, tácticos, psicológicos y factores sociales.

Los posibles beneficios que el estímulo de exposición a la hipoxia provoca (tabla 1) han sido descritos anteriormente, aunque quizás el aumento de sensibilidad al propio estímulo adaptativo sea lo más interesante. A este respecto, el tejido muscular responde a la hipoxia incrementando la expresión de genes inducidos por la hipoxia como respuesta compensatoria⁴⁵. Este aspecto es importante porque estimula la capacidad de respuesta muscular ante nuevos estímulos y ejerce una respuesta de aclimatación que potencia las perspectivas de respuesta ante desequilibrios homeostáticos (base de la mejora en el rendimiento deportivo).

En un estudio previo, Álvarez-Herms et al.¹¹ observaron que cuando el ejercicio realizado en hipoxia es de tipo explosivo, la potencia máxima no disminuye (en comparación con ese mismo ejercicio realizado en normoxia) y la capacidad anaeróbica aláctica no se ve afectada. Aunque la menor resíntesis de fosfágenos puede afectar en la recuperación generando mayor fatiga y acumulación de metabolitos⁴⁶, este aspecto favorecería procesos positivos de competencia física en mayor medida que en normoxia (potenciación de la carga de entrenamiento aláctica)³³.

Existen jugadores profesionales que han utilizado cámaras normobáricas (exposición intermitente) en la búsqueda

Tabla 1 Potencialidades e inconvenientes de la aplicación del entrenamiento en hipoxia en el fútbol

Potencialidades	Inconvenientes
Mejora de la cualidad física de resistencia	Falta de estudios científicos aplicados al deporte colectivo
Aclimatación fisiológica y psicológica previa a la competencia en altitud	Necesidad de protocolización específica
Mejora de la respuesta hematopoyética	Coste de la maquinaria
Aumento de la capacidad <i>buffer</i> muscular	Desconocimiento en la metodología y aplicaciones
Mayor tolerancia al lactato	Dificultad de introducción en la periodización deportiva
Respuesta génica (HIF-1) y enzimática específica	
Mejora de la frecuencia cardíaca de recuperación después de ejercicio máximo	
Aumento de la intensidad relativa de esfuerzo	
Aumento de la especificidad de la carga	
Posibilidad de exposición pasiva y activa durante fases de recuperación/rehabilitación como método de mantenimiento de la condición física	

de la mejora del rendimiento individual. Es obvio señalar que su utilización debe ser bajo supervisión profesional. Los posibles beneficios buscados a partir de una exposición a hipoxia intermitente (activa o pasiva) se obtendrían en la mejora del rendimiento en resistencia: parámetros centrales (cardiovasculares-respiratorios) y periféricos (musculares-enzimáticos), aumentando tanto la capacidad aeróbica como anaeróbica. A tal efecto, también cabe destacar la posibilidad de que existan sujetos con mala tolerancia o baja sensibilidad (malos respondedores) a la altitud. En este caso el efecto no sería positivo, aunque no se han descrito efectos negativos sobre la salud. Por otra parte, se han descrito diferentes modelos de exposición intermitente a hipoxia (intensos y breves o largos y ligeros) que han resultado igualmente eficaces al menos en la inducción de respuestas hematopoyéticas⁴⁷ (tabla 1).

La introducción de esta metodología en la periodización anual debería producirse siempre en periodos específicos de la temporada y en paralelo al entrenamiento grupal (técnico-táctico específico).

Según Bangsbo⁴⁴, la prioridad del entrenamiento en la temporada se resume en:

- Entrenamiento aeróbico: máxima prioridad en la pretemporada. De baja a alta intensidad. Durante la temporada existe un mantenimiento entre máxima prioridad (alta intensidad) y moderada-alta prioridad (baja intensidad).

- Entrenamiento anaeróbico: en la pretemporada (velocidad y resistencia a la velocidad). De muy baja prioridad a máxima prioridad al final de la pretemporada. Durante la temporada la velocidad es de máxima prioridad y la resistencia a la velocidad, entre alta y máxima.
- El entrenamiento de fuerza durante la temporada es entre bajo y alto, pero nunca máximo.
- La flexibilidad es siempre alta prioridad durante toda la temporada.

Las intervenciones de exposición a hipoxia deberían coincidir con ciclos de preparación especial o con los periodos en los que el jugador se encuentra lesionado. Deberían introducirse en ciclos de carga y con alta intensidad específica sobre las cualidades específicas aeróbicas y anaeróbicas, pudiéndose utilizar el entrenamiento de fuerza simultáneamente a la hipoxia para poder lograr un entrenamiento más completo y específico.

Se proponen 3 fases en las que podría ser útil la introducción de carga externa a través del uso de la hipoxia:

- Parte inicial de la temporada: fase intensiva de la pretemporada como un estímulo superior y máximo de trabajo sobre la resistencia.
- Fase central de la temporada: a nivel individual sobre jugadores con necesidades de potenciación de la condición física. En función de la especificidad de cada jugador podrían introducirse ciclos de carga intensiva en fases de descanso de competición (periodos de inactividad superiores a 4 o 5 días: navidades-festivos).
- Fase final de la temporada o en periodos después de lesión-inactividad. Como método de entrenamiento que posibilite la intensificación de la carga externa sin necesidades específicas de transferencia a la competición. Como método de mantenimiento de la condición física y/o mantenimiento de procesos adaptativos continuos.

Conclusiones

A partir de lo expuesto en este trabajo, se concluye que el uso del entrenamiento en hipoxia en el fútbol competitivo de alto nivel podría ser beneficioso y positivo como método de mejora del rendimiento físico (no técnico-táctico) y en el mantenimiento del nivel físico adquirido en procesos de lesión o rehabilitación. Dada la escasa información disponible sobre esta temática que oriente a su utilización y prescripción, son necesarios más estudios que permitan completar la información disponible sobre la aplicación de esta metodología en los deportes colectivos. Se ha descrito el menor rendimiento fisiológico (menor $VO_2\max$) en altitud superior a 2.000 m sin una aclimatación previa. Las diferentes metodologías de aplicación en el fútbol no han sido descritas, pero existen propuestas —como el *live high-training low* aplicado en deportes de resistencia aeróbica individual— con resultados positivos. La mejora del metabolismo anaeróbico con el entrenamiento en hipoxia se mantiene inconcluso por la gran variabilidad de estudios y resultados en este campo. El uso individual de deportistas para mejorar su rendimiento individual sería prescrito atendiendo a los estudios que refieren mejoras específicas del metabolismo aeróbico y anaeróbico en deportistas

altamente entrenados. Se requieren estudios aplicados de campo en deportes colectivos que incidan en la periodización del entrenamiento y en su aplicación en deportistas lesionados como estímulo superior para mantener estados de forma.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

1. Bonetti DL, Hopkins WG. Sea-level exercise performance following adaptation to hypoxia: A meta-analysis. *Sports Med.* 2009;39:107–27.
2. Weston AR, Mbambo Z, Myburgh KH. Running economy of African and Caucasian distance runners. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;32:1130–4.
3. Skinner JS, McLellan TH. The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Res Q Exerc Sport.* 1980;51:234–48.
4. Buskirk ER, Mendez J. Nutrition, environment and work performance with special reference to altitude. *Fed Proc.* 1967;26:1760–7.
5. Levine BD, Stray-Gundersen J. A practical approach to altitude training: Where to live and train for optimal performance enhancement. *Int J Sports Med.* 1992;13 Suppl 1:S209–12.
6. Tabata I, Irisawa K, Kouzaki M, Nishimura K, Ogita F, Miyachi M. Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. *Med Sci Sports Exerc.* 1997;29:390–5.
7. Tabata I, Nishimura K, Kouzaki M, Hirai Y, Ogita F, Miyachi M, et al. Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and $VO_2\max$. *Med Sci Sports Exerc.* 1996;28:1327–30.
8. Meeuwssen T, Hendriksen IJ, Holeywijn M. Training-induced increases in sea-level performance are enhanced by acute intermittent hypobaric hypoxia. *Eur J Appl Physiol.* 2001;84:283–90.
9. Gamble P. Physical preparation of elite level rugby union football players. *Strength and Conditioning Journal.* 2004;26:10–23.
10. Urdampilleta A, Álvarez-Herms J, Martínez Sanz JM, Corbi F, Roche E. Readaptación física en futbolistas mediante vibraciones mecánicas e hipoxia. *Rev int med cienc act fís deporte.* En prensa 2012.
11. Álvarez-Herms J, Julià-Sánchez S, Corbi F, Pagès T, Viscor G. Changes in heart rate recovery index after a programme of strength/endurance training in hypoxia. *Apunts Med Esport.* 2012;47:23–9.
12. Saltin B. Exercise and the environment: Focus on altitude. *Res Q Exerc Sport.* 1996;67 Suppl 3:S1–10.
13. Wilber RL. Current trends in altitude training. *Sports Med.* 2001;31:249–65.
14. Banister EW, Woo W. Effects of simulated altitude training on aerobic and anaerobic power. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1978;38:55–69.
15. Terrados N, Melichna J, Sylven C, Jansson E, Kaijser L. Effects of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1988;57:203–9.
16. Nummela A, Rusko H. Acclimatization to altitude and normoxic training improve 400-m running performance at sea level. *J Sports Sci.* 2000;18:411–9.
17. Katayama K, Matsuo H, Ishida K, Mori S, Miyamura M. Intermittent hypoxia improves endurance performance and submaximal exercise efficiency. *High Alt Med Biol.* 2003;4:291–304.
18. Ogura Y, Katamoto S, Uchimaru J, Takahashi K, Naito H. Effects of low and high levels of moderate hypoxia on anaerobic energy

- release during supramaximal cycle exercise. *Eur J Appl Physiol.* 2006;98:41–7.
19. Martino M, Myers K, Bishop P. Effects of 21 days training at altitude on sea-level anaerobic performance in competitive swimmers. *Med Sci Sports Exerc.* 1996;27:55.
 20. Wolski LA, McKenzie DC, Wenger HA. Altitude training for improvements in sea level performance. Is the scientific evidence of benefit? *Sports Med.* 1996;22:251–63.
 21. Bailey DM, Davies B. Physiological implications of altitude training for endurance performance at sea level: A review. *Br J Sports Med.* 1997;31:183–90.
 22. Hendriksen IJ, Meeuwse T. The effect of intermittent training in hypobaric hypoxia on sea-level exercise: A cross-over study in humans. *Eur J Appl Physiol.* 2003;88:396–403.
 23. McLellan TM, Kavanagh MF, Jacobs I. The effect of hypoxia on performance during 30 s or 45 s of supramaximal exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1990;60:155–61.
 24. Weyand PG, Lee CS, Martinez-Ruiz R, Bundle MW, Bellizzi MJ, Wright S. High-speed running performance is largely unaffected by hypoxic reductions in aerobic power. *J Appl Physiol.* 1999;86:2059–64.
 25. Stathis C, Febbraio M, Carey M, Snow RJ. Influence of sprint training on human skeletal muscle purine nucleotide metabolism. *J Appl Physiol.* 1994;76:1802–9.
 26. Noakes TD. Physiological models to understand exercise fatigue and the adaptations that predict or enhance athletic performance. *Scand J Med Sci Sports.* 2000;10:123–45.
 27. Mizuno M, Juel C, Bro-Rasmussen T. Limb skeletal muscle adaptation in hypoxia. *Med Sci Sports Exerc.* 1999;31:264–8.
 28. Desplanches D, Hoppeler H, Linossier MT, Denis C, Claassen H, Dormois D, et al. Effects of training in normoxia and normobaric hypoxia on human muscle ultrastructure. *Pflugers Arch.* 1993;425:263–7.
 29. Melissa L, MacDougall JD, Tarnopolsky MA, Cipriano N, Green HJ. Skeletal muscle adaptations to training under normobaric hypoxic versus normoxic conditions. *Med Sci Sports Exerc.* 1997;29:238–43.
 30. Vogt M, Puntschart A, Geiser J, Zuleger C, Billeter R, Hoppeler H. Molecular adaptations in human skeletal muscle to endurance training under simulated hypoxic conditions. *J Appl Physiol.* 2001;91:173–82.
 31. Bartsch P, Saltin B, Dvorak J, Federation Internationale de Football Association. Consensus statement on playing football at different altitude. *Scand J Med Sci Sports.* 2008;18 Suppl 1:96–9.
 32. Demo R, Senestrari D, Ferreyra JE. Young football players aerobic performance in sub-maximum exercise with exhaustion at a moderate altitude without acclimation: Experience in el condor. *Rev Fac Cien Med Univ Nac Cordoba.* 2007;64:8–17.
 33. Levine BD, Stray-Gundersen J, Mehta RD. Effect of altitude on football performance. *Scand J Med Sci Sports.* 2008;18 Suppl 1:76–84.
 34. Brutsaert TD, Araoz M, Soria R, Spielvogel H, Haas JD. Higher arterial oxygen saturation during submaximal exercise in Bolivian aymara compared to European sojourners and Europeans born and raised at high altitude. *Am J Phys Anthropol.* 2000;113:169–81.
 35. Brutsaert TD, Spielvogel H, Soria R, Caceres E, Buzenet G, Haas JD. Effect of developmental and ancestral high-altitude exposure on VO₂ peak of Andean and European/North American natives. *Am J Phys Anthropol.* 1999;110:435–55.
 36. Katayama K, Goto K, Ishida K, Ogita F. Substrate utilization during exercise and recovery at moderate altitude. *Metabolism.* 2010;59:959–66.
 37. Gore CJ, McSharry PE, Hewitt AJ, Saunders PU. Preparation for football competition at moderate to high altitude. *Scand J Med Sci Sports.* 2008;18 Suppl 1:85–95.
 38. Rodriguez FA, Casas H, Casas M, Pages T, Rama R, Ricart A, et al. Intermittent hypobaric hypoxia stimulates erythropoiesis and improves aerobic capacity. *Med Sci Sports Exerc.* 1999;31:264–8.
 39. Rodriguez FA, Ventura JL, Casas M, Casas H, Pages T, Rama R, et al. Erythropoietin acute reaction and haematological adaptations to short, intermittent hypobaric hypoxia. *Eur J Appl Physiol.* 2000;82:170–7.
 40. 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;11:84–8.
 41. Helgerud J, Engen LC, Wisloff U, Hoff J. Aerobic endurance training improves soccer performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33:1925–31.
 42. Mohr M, Krstrup P, Bangsbo J. Fatigue in soccer: A brief review. *J Sports Sci.* 2005;23:593–9.
 43. Reilly T, Bangsbo J, Franks A. Anthropometric and physiological predispositions for elite soccer. *J Sports Sci.* 2000;18:669–83.
 44. Bangsbo J. Energy demands in competitive soccer. *J Sports Sci.* 1994;12(Spec. No):S5–12.
 45. Vogt M, Hoppeler H. Is hypoxia training good for muscles and exercise performance? *Prog Cardiovasc Dis.* 2010;52:525–33.
 46. Fujimaki T, Asano K, Mizuno K, Okazaki K. Effect of high-intensity intermittent training at simulated altitude on aerobic and anaerobic capacities and response to supramaximal exercise. *Adv Exerc Sports Physiol.* 1999;5:61–70.
 47. Casas M, Casas H, Pages T, Rama R, Ricart A, Ventura JL, et al. Intermittent hypobaric hypoxia induces altitude acclimation and improves the lactate threshold. *Aviat Space Environ Med.* 2000;71:125–30.

Urdampilleta, A.; Álvarez-Herms, J.; Martínez Sanz, J.M.; Corbi, F. y Roche, E. (2014). Readaptación física en futbolistas mediante vibraciones mecánicas e hipoxia / Physical rehabilitation in football by mechanical vibration and hypoxia. Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte vol. 14 (53) pp. 119-134. <http://cdeporte.rediris.es/revista/revista53/artrecuperacion432.htm>

ORIGINAL

PHYSICAL REHABILITATION IN FOOTBALL BY MECHANICAL VIBRATION AND HYPOXIA

READAPTACIÓN FÍSICA EN FUTBOLISTAS MEDIANTE VIBRACIONES MECÁNICAS E HIPOXIA

Urdampilleta, A.¹; Álvarez-Herms, J.²; Martínez-Sanz, J.M.³; Corbi, F.⁴ & Roche, E.⁵

¹ Bachelor of Sciences (BSc) in Sport Sciences and Physical Education. Professor from the Department of Physical and Sports Education, at the University of País Vasco (UPV-EHU). Nutritional Advice and sports training. Services for patients with Intermittent Hypoxia. K2 Sports Centre, NUTRIAKTIVE, Alava (Spain) aritz.urdampilleta@ehu.es

² BSc in Sport Sciences and Physical Education. Researcher at the Department of Physiology. Physical Exercise and Hypoxia. University of Barcelona, Barcelona (Spain) jesusalvarez80@hotmail.com

³ Diploma in Human Nutrition and Dietetics. Researcher for the Triathlon Modernization Program. University of Alicante (Spain) josemiquel.ms@ua.es

⁴ Doctor in Physical Activity and Sports Sciences. Professor from the Department of Health and Sports Management. INEFEC. Lleida (Spain) f@corbi.neoma.org

⁵ Professor of Nutrition from the Department of Functional Biology. Bioengineering Institute. Sports Research Centre (CID). University of Elche (Spain) eroche@umh.es

Spanish-English translator: Ana Casimiro Ramón anacasimiro.trad@gmail.com

Código UNESCO / UNESCO Code: 2411.06 Fisiología del ejercicio / Sport Physiology

Clasificación Consejo de Europa / Council of Europe Classification: 6. Fisiología del ejercicio / Sport Physiology

Recibido 28 de septiembre 2011 **Received** September 28, 2011

Aceptado 14 de abril de 2012 **Accepted** April 14, 2012

ABSTRACT

Explosive actions in football are nowadays three times the amount there was during the 60s, reaching 200-215 explosive actions/match. This means that for an elite player, muscular power and resilience are performance limiting factors, and muscular injuries may be frequent. During the injury, conditional qualities are lost; the shorter is the period the lesser are the losses. There are several methods for improving strength and resilience through vibration platforms and intermittent hypoxia (IH). In this study, we show the results of an intervention with vibrating platform and IH in football players suffering from fibrillar break. The results obtained suggest that this new training model allows improvements in the level of maximum force ($p<0.05$) and resilience ($p<0.05$) and helps to keep their initial conditional qualities.

KEY WORDS: Body vibration, intermittent hypoxia, muscle strength, resilience.

RESUMEN

Las acciones explosivas en el fútbol se triplican respecto a los años 60, llegando a las 200-215 acciones explosivas/partido. Esto supone que la potencia muscular y la capacidad de recuperación sean factores limitantes, pudiendo ser frecuentes las lesiones musculares. Durante la lesión se pierden las cualidades condicionales, menos cuanto más corto sea este periodo. Existen diversos métodos para la mejora de la fuerza y capacidad de recuperación mediante las plataformas vibratorias y la hipoxia intermitente (HI). Mostramos resultados de una intervención con plataforma vibratoria y HI en futbolistas convalescientes de una rotura fibrilar. Este nuevo modelo de entrenamiento puede permitir mejoras la fuerza máxima ($p < 0,05$) y capacidad de recuperación ($p < 0,05$) ayudando en gran medida a no perder las cualidades condicionales.

PALABRAS CLAVE: Plataformas vibratorias, Hipoxia intermitente, fuerza muscular, capacidad de recuperación.

INTRODUCTION

The physical effort performed by a football player has basically intermittent character, alternating high intensity efforts with low ones. Therefore, it is important to improve the recovery of high intensity efforts during low effort periods (Mohr et al., 2010). All this would allow keeping explosive and repeated efforts alternated (Casamichana et al., 2012). Furthermore, trunk muscle stabilization is very important in football in order to coordinate quick moves, especially with situations of instability (González-Arganda, 2010).

Football demands and requirements have changed in the last few years (Randers, 2010). The number of sprints in the 60s was so much lower than currently. In fact, today there is three times this amount, with 190 sprints (around 200-215 explosive actions) (Dufour, 1990; Zubillaga, 2006), $29,5 \pm 10,3$ abrupt changes of direction and $8,5 \pm 3,82$ jumps per game (Castellano, 1997). In this sense, football may be considered as a sport of explosive and alternated efforts where resilience is essential for a better performance (Motta, 2006).

On the other hand, during convalescence periods after injury the levels of physical condition and resilience are modified; they generally suffer a decrease that affects most of the qualities. Therefore, it is really important to keep the levels of physical condition as higher as possible in order to accelerate the recovery process. In the last few years, professional football has greatly evolved in the methods used to improve conditional area, recovery, psychological training, injury prevention and rehabilitation, through a better analysis of the football match (Randers et al., 2010).

Annual periodization in football requires a different structure from other sports of individual performance. Although there are several periodization methodologies in football according to different methods and game systems used, it is common in all of them to look for keeping a high (not maximum) performance during the maximum time possible along the season with a few peaks according to the sports objectives (Alvarez-Herms et al., 2012). Therefore, new methods are needed in order to obtain the lowest muscle fatigue and the highest physical condition along the season.

Vibration platforms are useful tools to improve flexibility (Fangani et al., 2006; Sands et al., 2006) and in the last few studies about that there is shown a tendency to improve and to keep the explosive strength through a vibration training, although the scientific evidence is still poor and more studies are needed in this field with specific groups (Fort-Vanmeerhaeghe et al, 2011; Rechn et al, 2007). Colson et al. (2010), studied the effectiveness of these tools in basketball. To that end, they applied a protocol of vertical vibrations (40Hz and 4mm) to a group of basketball players three times a week. They had to do $\frac{1}{2}$ static sit ups with 30" of vibrations and 30" to rest during 20'. After 4 weeks of training the maximal isometric force increased. Other authors claim that in order to produce an increase on the maximal dynamic force of trained sportsmen, vibration frequencies must be between 40-50Hz, with vertical vibrations of 3mm (Ronnestad, 2012). Cormie et al. (2006) also observed that with this kind of training significant improvements were observed in vertical jumps after acute

expositions in vibration platforms(30-30" to 30Hz and 2.5mm). These authors concluded that these platforms could be valid as warming-up before performing maximum intensity jumps and as a way to recover power after an injury.

On the other hand, Intermittent Hypoxic Training (IHT) is one of the newest programs used to train sportsmen (Meeusen, 2001). In the last few years, several studies have shown how IHT causes interesting adaptations, both peripheral and systematically, which justifies its application as a way of improving sports performance (Geiser, 2001; Roels, 2007; Zoll, 2006). Furthermore, specific IHTs are seen to improve some results of non-specific tests (Urdampilleta, 2010; Vogt, 2010), which justifies its application in different sports.

Despite the fact that there is not much academic background, it is possible to think that IHT improves heart rate recovery from high values (Urdampilleta, 2011). In the same way, studies which combine explosive exercises and intermittent hypoxia show that glycolysis activation is higher (Vogt, 2010) and less time is needed to increase the training load (Hendriksen, 2003). In a previous study of this research group a significant increase of heart rate recovery from a maximum effort after a training protocol of resilience force in intermittent hypoxia was reported (Alvarez-Herms et al, 2011). There are also signs of physiological benefits from hypoxia exposure and training, which may increase individual performance in football players Alvarez-Herms et al, 2012).

Therefore, as Calbet (2006) claims, it is important to apply new methods of intensive training adapted to our sportsmen capable to increase sportsmen adaptive possibilities to continue improving their physical conditions in different situations. This leads us to a hypothesis that claims that in sportsmen just recovered from an injury several conditional qualities and physiological parameters, together with muscle strength and heart rate recovery through innovative means may be maintained using systems that increase systemic and peripheral functional capacities which cause no damage to the organism. The aim of this study is to value the efficiency of physical retraining post injury through a training program with vibration platforms and intermittent hypoxia stimuli.

MATERIALS AND METHODS

This research's design was experimental with intervention through a training program with vibration platforms and intermittent hypoxia stimuli.

1. Subjects

The study sample was formed by 11 football players (football 7-a-side) from the national league who signed an informed consent.

Table 1. Physiological and anthropometric characteristics of the studies subjects

	Group (n=11)
Age	21.2 ± 2.0
Size (m)	1.76 ± 0.09
Weight (Kg)	76.3 ± 4.4
BMI	24.48 ± 1.31
Basal HR	64 ± 11
Systolic / Diastolic Blood Pressure	120 ± 9 64 ± 8
SaO2%	97.7 ± 0.6

The inclusion criteria followed to participate in this study were the following: 1) no exposure to hypoxia in the previous 3 months; 2) injury in the last 3-4 weeks of myofibrillar break-down in the lower body due to the practice of football; 3) to be clinically recovered (analyzing the injury through imaging by the doctor); and 4) no important clinical background.

All of them were in the last phase of recovery from a 1cm fibrillar break-down (quadriceps, soleus muscle or biceps femoris). The frequency of training they used to have was two times a week plus a match, with no more physical exercise than that. These football players competed in football 7-a-side in the 1st group of the Basque League of the Basque Federation during the season 2010-2011.

All of them were three weeks without any training with their teams due to the injury and the needed periodic period. None of the participants in this study received neither economic nor in-kind reward for their participation.

2. Materials

A vibration platform VibraLaster was used for the intervention. It makes mechanical vibrations between 19 and 60HZ and a maximum vertical acceleration of 4mm.

Participants with intermittent hypoxia performed trainings in a GO2Altitude Hypoxic tent (Biometech, Australia). This hypoxic tent uses the molecular separation through membrane to obtain oxygen and so to transform hypoxic air, decreasing oxygen concentration inside the hypoxic tent (hypoxia normobaria). This system does not cause increases in temperature, in humidity (if no physical exercise is performed inside it), nor in CO₂ on hypoxic air. In order to generate hypoxic air ERA II compressors were used, and also the Hypoxic tent Portatil Plus compressor as an additional support.

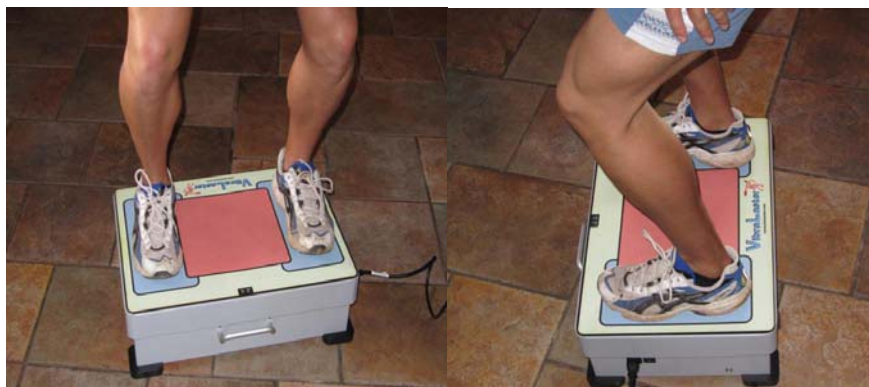


Image 1. Materials used for the study. Vibration platform BibraLaster (Biolaster).



Image 2. Materials used for the study. GOA2Altitude Hypoxic tent (left). Hypoxic tent Portatil Plus compressor (middle). Hypoxic tent prepared for trainings in hipoxia with BibraLaster vibration platform (right).

3. Training protocol

The training program consisted of 3 sessions per week (Monday-Wednesday-Friday) of mechanical vibrations **inside the hypoxic tent**, according to the training protocol suggested by Colson et al. (2010). Such protocol was slightly adapted following Ronestad (2009) indications, and two 60' sessions of passive intermittent hypoxia (with no physical activity) were added Tuesdays and Thursdays. Therefore, in total, participants in this study trained 5 days a week.

Table 2. Structuring week trainings for group control (C) and experimental group (H).

Training plan for groups C and H	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
Team training		C H		C H	C H
Vibration platform sessions	C		C		C
Active intermittent hypoxia session	H		H		H
Passive intermittent hypoxia sessions (post warming-up with the team)		H		H	

The protocol used in the **vibration platform** consisted of 8-14 series of 30'' at 40Hz of frequency and 3-4mm of amplitude. Inter-series recovery was of 60'' (1st week). Vibration frequency was increased up to 50Hz after the 2nd week. In total, the volume of training was between 12 and 21' of work per session (one more series of work per session after the 2nd week). The exercise used in training sessions was the sip-up. Individual trainings intensity in the vibration platform was controlled according to the character of the effort (Gonzalez Badillo, 2002). Therefore, the vibration machine suggested several training ranges.

Table 3. Characteristics of the strength training with mechanical vibrations.

Trainings Vibration platform	Series-recoveries	Vibrations frequency	Amplitude
Week 1	8 x 30''// 60''	40 Hz	3-4 mm
Week 2	11 x 30''// 60''	40-50 Hz	4mm
Week 3	14 x 30''// 60''	40-50 Hz	4mm

Group H training took place inside the **normobaric hypoxic tent** (1.80 x 1.80 x 1.80m) which simulated between 4000 and 5000m (FiO₂ = 12.5-11%) and increased the hypoxic exposure 500m of altitude per week (decrease of 0.5% of oxygen in ambient air). Trainings were two by two and after the second one with the vibration platform subjects rested lied down until accomplishing the 60'.

Tuesdays and Thursdays they started training with their team, performing specific football exercises, matches and lower body strengthening exercises at the end of the training sessions. After that, participants in group H rested during 60' in hypoxia at 4000-5000m. In total, they had 15 hours of intermittent hypoxia during 3 weeks (3 specific sessions with vibration platform and 2 sessions resting in intermittent hypoxia each week). This hypoxic training load used was due to a recent study which demonstrated that 15 hours of hypoxic exposure were enough to improve sports performance (Bonetti, 2009).

Table 4. Training frequency per week in both control and experimental groups.

Frequency/week	Group control (C) n=5	Experimental group (H) n=6
Trainings with the team	2	2
Trainings with mechanical vibrations	3	3
Trainings in active hypoxia	0 (No)	3
Trainings in passive hypoxia	0 (No)	2

4. Assessing strength and resilience

In order to assess the results obtained during the trainings, SJ and CMJ tests were used to measure the jumping ability. Both tests are from the battery of tests Bosco (1983). A warm-up took place before performing these tests. In addition, the technical realization of the test received special attention.

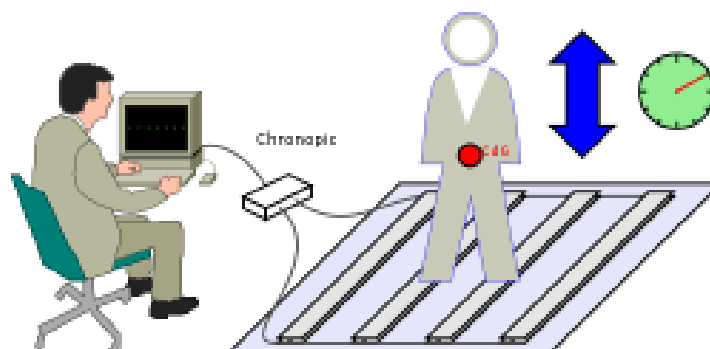


Image 3. Bosco tests (SJ and CMJ) and material used. Ergo Jump Bosco System platform formed by a contact map of 1.75m length with a distance between contacts of 5cm.

Before and after the intervention, football players were assessed through a 1 RM indirect half sit-up test. To ensure they performed half sit-up, a Swiss bench was used; they had to touch it with their gluteus in each repetition. They performed 20 repetitions (one every two seconds) with the maximum weight they could handle. The formula used to estimate 1RM was the one proposed by Epley (1985): $1RM = (0.0333 \times \text{rep} \times \text{kg}) + \text{kg}$.

After the 1RM indirect test and with the subject in a seated position the recovery beats were registered (1', 2' and 3') and the recovery rate (RR) was estimated through the formula established by Lamiel-Luengo (Aros et al, 2000; Calderón et al, 2002): $RR = \text{HR}_{\text{max}} - \text{HR}_{1, 2, 3} / \text{theoretical HR}_{\text{max}} / \text{HR}_{\text{max}} \text{reached}$.

5. Statistical analysis

The tool used for the data statistical analysis was Excel 2003 and SPSS statistics base 175.0 for Windows. The first statistical analysis performed was the descriptive one. Since the sample accomplished all the normality criteria we performed the parametric statistical test (T TESTS) for related samples. The studied variables were: pre-test and post-test of CMJ, SJ and 1RM tests. The second analysis performed was the correlation one. We used the Pearson bivariate correlation test, since we wanted to know the relationship between the intervention and the heart rate recovery variables.

In order to estimate the recovery rate we performed a t-test for the same group (pre and post training) in the minutes 1, 2 and 3 of the recovery. We also used the Shapiro-Wilk test in all of them. The level of statistical significance used was $P < 0.05$.

RESULTS

Table 5. CMJ t-test

Differences							
1 CMJ P re- test P ost- test	Mean	DT 3	Stan dard error 0.009	95% confidence interval		t -1.697	P (bilateral) 0.117
	- 0.015			Lower -0.035	Higher 0.004		

Table 6. SJ t-test.

Differences							
1 SJ Pre- test Post- test	Mean	DT 0.027	Stan dard error 0.007	95% confidence interval		t -3.048	P (bilateral) 0.058
	-0.023			Lower -0.039	Higher 0.006		

Table 7. 1RM t-test

Differences							
1 RM Pre- test Post- test	Mean	DT 0.027	Stan dard error 0.007	95% confidence interval		t -3.048	P (bilateral) 0.039*
	-0.023			Lower -0.039	Higher 0.006		

Table 8. Heart Rate recovery after the 1 RM indirect half sit-up test

HR	PRE-TEST	POST-TEST	P
Final HR	170,2 ± 1,72	175,5 ± 2,43	NS
Rec-1	137,8 ± 13,1	126,8 ± 12,6	<0.05
Rec-2	119,7 ± 10,6	104,5 ± 8,9	<0.05
Rec-3	102,32± 9,8	97,3 ± 5,5	NS

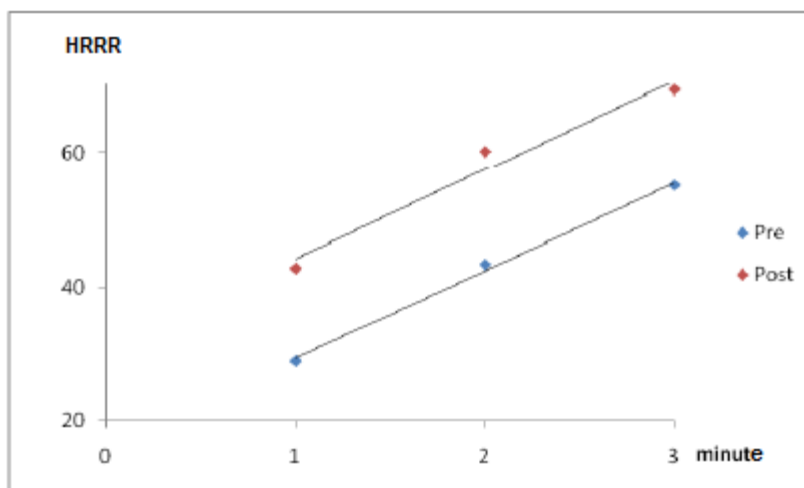


Diagram 1. Heart Rate Recovery Rate (HRRR) in minutes 1, 2 and 3 after sit-ups in both C and H groups before (pre) and after (post) the intervention.

DISCUSSION

Regarding the ability to jump in this study we did not find significant differences between the results obtained before and after the protocol during the CMJ test ($P=0.117$) (Table 1). However, although there was not a statistically significant result there was a general improvement in the CMJ test results, compared to the group control. Some of the reasons why there were not significant improvements could be the followings: 1) the lack of coordination amongst the players during the test; or 2) the lack of more training exercises related to the elastic component (Bompa, 2004). Related to the SJ test, there was not either significant differences when comparing jump performances before and after the protocol ($P=0.058$) (Table 6). Nevertheless, with this test we also observed a little improvement in jump performances.

On the other hand, there were some significant differences in the R1 indirect test ($P=0.039$) (Table 7). The results obtained coincided with the obtained by Colson et al. (2010), who justified the improvements registered with an increase of inter and intramuscular coordination of the low body muscles.

Although several authors (Cormie et al, 2006; González-Badillo, 2002; Rechin et al, 2006) confirm the relationship between the improvement of maximal force and the improvement of explosive force, in this study we did not find significant improvements in the explosive force, although we observed a certain tendency to it. Some authors claim that these explosive force improvements may be due to a better flexibility of sportsmen (Fort-Vanmeerhaeghe et al, 2011; Sands et al, 2006).

Related to the heart rate recovery we observed a significant improvement ($P<0.05$) of the heart rate during the first two minutes after a maximal force exercise (Table 8). These data are important, since with almost no aerobic exercise there is an improvement in heart rate recovery after an intervention of 15 hours of intermittent hypoxia plus force exercises with a vibration platform. These data confirm the results obtained in other studies about the improvement

of heart rate recovery after maximum exercise in the first three minutes (Alvarez-Herms et al, 2011; Urdampilleta et al, 2011). All in all seems to indicate that training in intermittent hypoxia causes molecular and physiological adaptations that allow the acceleration of recovery processes after maximum efforts which have an anaerobic energy support (Roels, 2007; Wilber, 2007).

The fact that intermittent exposure to hypoxia increases the maximum heart rate (HRmax) to a greater extent may be interesting for long-duration sports and for sports with intermittent efforts such as football, since, as a result of the great training load performed at low intensity, there is usually a tendency to decrease the HRmax (Jouven et al., 2005). Therefore, the use of IH stimuli could be interesting in the tuning phase or before the main competitions since it could be an anaerobic training stimulus and, at the same time, it could help to improve resilience. The study of heart rate variability happens to be very interesting for the functional assessment in team sports (Rodas et al., 2008).

When competing in hypoxia physiological effects are significant. The organic physiological response has been analyzed in order to obtain information which allows getting a position (Federation Internationale de Football Association. Bartch et al, 2008). It is said that if football is played in moderate altitude and with no previous acclimatization, the physical performance may be reduced and the subjective perception of effort increased, which may have a negative effect on the players' psychological aspect (Demo et al., 2007). Levine et al. (2008) claimed that a football player, as any other sportsman, suffers a decrease of his/her Vo₂max (maximal aerobic capacity) when competing at moderate altitude and an increase of effort relative intensity with lower capacity for phosphagen system resilience. This aspect would improve the ability to repeat high intensity actions, which would be important in football, where a great part of these actions has a significant technical component.

Although physiological parameters achieved in a football match are not that high compared to those reached in some individual sports, the improvement obtained with training in hypoxia could make the player's technical and tactical skills increase. In this case, Helgerud et al. (2001) studied youth football teams of Norway and observed that a Vo₂max improvement of 10% was related to an increase of 20% of the distance covered and of 100% in the number of sprints performed.

Apart from applying intermittent hypoxia to improve resilience, it is shown that when the competition is placed on altitudes higher than 2000m, to train previously in hypoxia improves sports performance in mixed sports, especially in the aerobic ones (Calbet et al, 2007; Meeusen et al, 2001; Roels et al, 2007; Tabidi et al, 2007; Rodriguez et al, 2002; Vogt & Hoppeler, 2010). Therefore, it would be interesting to add trainings in hypoxia both for football players' physical retraining and for the optimization of sports performance (resilience improvement).

There are professional players who have used normobaric hypoxic tents (intermittent exposure) seeking an improvement of individual performance. Obviously, its use must be supervised by a professional. The possible benefits

an intermittent hypoxia exposure (active or passive) may have would be related to resilience improvement (central parameters (cardiovascular–respiratory) and peripheral parameters (muscular – enzymatic)), increasing both the aerobic and the anaerobic abilities. In addition, there may be some subjects with poor tolerance or low sensitivity (bad responders) to hypoxia. In this case, the effect would not be positive, although there is not registered either negative effect on health. However, there are several models of intermittent hypoxia exposure (intense and short or long and light) that resulted also efficient at least for hematopoietic responses (Casas et al., 2000).

Nevertheless, the key seems to be in the lowest hypoxic dose every sportsman needs to obtain these effects (Wilber et al., 2007).

CONCLUSIONS

After applying a training program of 15 hours of intermittent hypoxia exposure during 3 weeks (3 specific sessions with a vibration platform and 2 sessions of 60' each resting in intermittent hypoxia per week) to a group of 11 football players (football 7-a-side) from a national team, we obtained the following conclusions:

1. There is a significant improvement in maximal force levels (1RM) with the half sit-up test ($P<0.05$).
2. There is a significant improvement in heart rate recovery during the first two minutes after a maximal effort of strength-endurance ($P<0.05$).
3. There is a slight tendency to improve explosive strength and maximum heart rate.

It would be interesting to add another group control with no more trainings than the ones with their teams (with technical and tactical character). It is clear that the improvements are due to the active and passive hypoxia stimuli applied (differential characteristic regarding trainings between group control and hypoxia), but we did not study the effects that trainings only with vibration platforms have in physical retraining.

A bigger sample and more applied studies to team sports would be necessary to allow injured players to keep training with their teams and make their recovery as quick as possible.

REFERENCES

1. Álvarez-Herms J., Julià-Sánchez S., Corbi F., Pagès T., Viscor G. (2011). Changes in heart rate recovery index after a programme of strength/endurance training in hypoxia. *Apunts Med Esport*. 2011.07.03.

2. Álvarez-Herms J., Julià-Sánchez S., Urdampilleta A., Corbi F., Viscor G. (2012). Potenciales aplicaciones del entrenamiento de hypoxia en el fútbol. *Apunts Med Esport*. 2012.04.07.
3. Arós F., Boraita A., Alegría E., Alonso A.M., Bardají A., Lamiel R. et al (2000). Guidelines of the Spanish Society of Cardiology for clinical practice in exercise testing. *Rev Esp Cardiol*.53(8):1063-94.
4. Bartsch P., Saltin B., Dvorak J.. (2008). Federation Internationale de Football Association. Consensus statement on playing football at different altitude. *Scand J Med Sci Sports*, 18 Suppl 1:96-9.
5. Bonetti, D.L., Hopkins, W.G., Lowe, T.E., Boussana, A. & Kilding, A.E. (2009). Cycling performance following adaptation to two protocols of acutely intermittent hypoxia. *Int J Sports Physiol Perform*, 4(1),68-83.
6. Bonetti DL, Hopkins WG (2009). Sea-level exercise performance following adaptation to hypoxia: A meta-analysis. *Sports Med*,39(2):107-27.
7. Bompa, T.O. (2004). Entrenamiento de la potencia aplicado a los deportes. La polimetría para el desarrollo de la máxima potencia. Barcelona: INDE publicaciones.
8. Bosco, C., Komi, P.V., Thyhany, G., Feleke, G.& Apor, P. (1983). Mechanical power test and fibre composition of human legextensor muscles. *Eur J Appl Physiol*, 51(1),129-35.
9. Calbet, J.A. (2006). Efectos del Entrenamiento en la Altitud. IX Jornadas sobre medicina y deporte de alto nivel, Madrid.
10. Calderon, F.J., Brita, J.L., Gonzalez, C. & Machota, V. (1991). Estudio de la recuperación de la frecuencia cardíaca en deportistas de élite. *Selección*, 6(3),101-105.
11. Calderon F.J., Benito P.J., y García A, (2002).Aplicación práctica de las pruebas de esfuerzo. *Selección*, 11 (4), 202-209.
12. Casamichana D., Castellano J., Calleja J., Román JS., Castagna C. (2012). Relationship between indicators of training load in soccer players. *J Strength Cond Res*. 2012 Mar 28. [Epub ahead of print]
13. Casas M., Casas H., Pages T., Rama R., Ricart A., Ventura J.L., Ibanez J., Rodriguez F.A., Viscor G (2000). Intermittent hypobaric hypoxia induces altitude acclimation and improves the lactate threshold. *Aviat Space Environ Med*, 71(2):125-30.
14. Castellano, J., Masach, L. & Zubillaga, A. (1991). Cuantificación del esfuerzo físico del jugador de fútbol en competición. *Rev El Entrenador Español*,71,32-57.
15. Colson, S.S., Pensini, M., Espinosa, J., Garrandés, F. & Legros, P. (2010). Whole-body vibration training effects on the physical performance of basketball players. *J Strength Cond Res*, 24(4),99-106.
16. Cometti, G. (Ed). (2002). Preparación física en el fútbol. Paidotribo.
17. Cormie P., Deane RS., Tiplett NT., McBride JM. (2006). Acute effects of whole-body vibration on muscle activity, strength, and power. *J Strength Cond Res*, 20(2):257-61.
18. Demo R., Senestrari D., Ferreyra J.E. (2007). Young football players aerobic performance in sub-maximum exercise with exhaustion at a moderate altitude without acclimation: Experience in el condor. *Rev Fac Cien Med Univ Nac Cordoba*, 64(1):8-17.


19. Dufour, J. (1990). Las técnicas de observación del comportamiento motor, fútbol: la observación tratada por ordenador. *Revista de Entrenamiento Deportivo*, 4(4),16-24.
20. Epley, B. (1985). Poundage chart. Body Epley workout. Lincoln, NE.
21. Fagnani F., Giombini A., Di Cesare A., Pigozzi F., Di S, V. (2006). The effects of a whole-body vibration program on muscle performance and flexibility in female athletes. *Am J Phys Med Rehabil*, 85(12):956-962.
22. Fort-Vanmeerhaeghe, A.; Guerra Balic, M.; Romero Rodríguez, D.; Sitjà Rabert, M.; Bagur Calafat, C.; Girabent Farrés, M. y Lloret Riera, M. (2011). Efectos del entrenamiento vibratorio en personas físicamente activas: revisión sistemática. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte* vol. 11 (43) pp. 619-649. [Http://cdeporte.rediris.es/revista/revista43/artefectos223.htm](http://cdeporte.rediris.es/revista/revista43/artefectos223.htm)
23. Geiser, J., Vogt, M., Billeter, R., Zuleger, C., Belforti, F. & Hoppeler, H. (2001). Training hight-living low: changes of aerobic performance and muscle structure with training at simulated altitude. *Int J Sports Med*, 22(8),579-85.
24. González-Arganda, G. (2010). Aplicación del método pilates en la prevención y readaptación en el futbolista. En Martínez de Haro, V. (Ed), IV Congreso Internacional Universitario de las Ciencias de la Salud y el Deporte (pp. 48-52). Madrid: Sanitas.
25. González-Badillo, J. (Ed). (2002). Fundamentos del entrenamiento de la fuerza: aplicaciones de Alto Rendimiento deportivo. Barcelona: INDE.
26. Hendriksen, I.J. & Meeuwssen, T. (2003). The effect of intermittent training in hypobaric on sea level a cross over study in humans. *Eur J Appl Physiol*, 88(4-5), 396-403.
27. Helgerud J., Engen L.C., Wisloff U., Hoff J. (2001). Aerobic endurance training improves soccer performance. *Med Sci Sports Exerc*,33(11):1925-31.
28. Jouven X., Empana J.P., Schwartz P.J., Desnos M., Courbon D., Ducimetière P. (2005). Heart-rate profile during exercise as a predictor of sudden death. *N Engl J Med*, 12;352(19):1951-8.
29. Levine B.D., Stray-Gundersen J., Mehta R.D. (2008). Effect of altitude on football performance. *Scand J Med Sci Sports*, Aug;18 Suppl 1:76-84.
30. Meeusen, T., Hendriksen, I,J. & Holewijn, M. (2001). Training-induced increases in sea-level performance are enhanced by acute intermitent hypobaric hypoxia. *Eur J Appl Physiol*,84(4),283-90.
31. Mohr M., Mujika I., Santisteban J., Randers MB., Bischoff R., Solano R., Hewitt A., Zubillaga A., Peltola E., Krstrup P. (2010). Examination of fatigue development in elite soccer in a hot environment: a multi-experimental approach. *Scand J Med Sci Sports*,20 Suppl 3:125-32.
32. Motta, D.A., Angelino, A. & Saglietti, J. (2006). Indicadores de fuerza y resistencia de entrenamiento en pruebas de campo de jugadores profesionales de fútbol. *Rev Argent Cardiol*, 74(Supl 2),38.
33. Randers, M.B., Mujica, I., Hewit, A., Santisteban, J., Bischoff, R., Solano, R., Zubillaga, A., Peltola, E., Krstrup, P. & Mohr, M. (2010). Application of four different football match analysis systems: A comparative study. *Journal of Sports Sciences*,28(2),171-82.

34. Rehn B., Lidstrom J., Skoglund J., Lindstrom B. (2007). Effects on leg muscular performance from whole-body vibration exercise: a systematic review. *Scand J Med Sci Sports*, 17(1):2-11.
35. Rodas G., Pedret C., Ramos J., Capdevila L (2008). Variabilidad de la frecuencia cardíaca: concepto, medidas y relación con aspectos clínicos. *Archivos de Medicina del Deporte*,123:41-8.
36. Rodríguez, F.A., Murio, J., Casas, H., Viscor, G. & Ventura, J.L. (2002). Intermittenthypobarichypoxia enhances swimming performance and maximal aerobic power in trained swimmers. IX World Symposium Biomechanics and Medicine in Swimming, Saint Etienne.
37. Roels, B., David, J., Bentley, B., Coste, O., Mercier, J. & Grégoire, P. (2007). Effects of intermittent hypoxic training on cycling performance in well-trained athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 101(3),259-368.
38. Rønnestad B.R. (2009). Acute effects of various whole-body vibration frequencies on lower-body power in trained and untrained subjects. *J Strength Cond Res*, 23(4):1309-15.
39. Rønnestad BR., Hansen EA., Raastad T. (2012). Strength training affects tendon cross-sectional area and freely chosen cadence differently in noncyclists and well-trained cyclists. *J Strength Cond Res*, 26(1):158-66.
40. Sands WA, McNeal JR, Stone MH, Russell EM, Jemni M (2006). Flexibility enhancement with vibration: Acute and long-term. *Med Sci Sports Exerc*, 38(4):720-725.
41. Tadibi, V. Dehnert, C. Menold, E. Bärtsch, P (2007). Unchanged anaerobic and aerobic performance after short-term intermittent hypoxia. *Med Sci Sports Exercise*, 39(5): 858-864.
42. Urdampilleta, A., Gomez-Zorita, S., Martínez-Sanz, J.M. & Roche, E. (2011). Eficacia de un programa de entrenamiento físico en hipoxia intermitente en la mejora de la fuerza-resistencia aeróbica específica e inespecífica. *Revista Española de Educación Física y Deportes*. ISBN: 1133-6366.
43. Vogt, M. & Hoppeler, H. (2010) Is hypoxia training good for muscles and exercise performance? *Prog Cardiovasc Dis*,52(6),525-33.
44. Wilber, R.L., Stray-Gundersen, J. & Levine, B.D. (2007). Effect of hypoxic "dose" on physiological responses and sea-level performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*,39(9),1590-1599.
45. Zoll, J., Ponsot, E., Dufour, S., Doutreleau, S., Ventura-Clapier, R., Vogt, M., Hppeler, H., Richard, R. & Flück, M. (2006). Exercise training in normobaric hypoxia in endurance runners. Muscular adjustments of selected gene transcripts. *J Appl Physiol*,100(4),1258-1266.
46. Zubillaga, A. (2006). La actividad del jugador de fútbol en alta competición: Análisis de Variabilidad. (Tesis doctoral). Universidad de Málaga. Disponible en la base de datos TESEO.

Referencias totales / Total references: 46 (100%)

Referencias propias de la revista / Journal's own references: 1 (2.11%)

AUTHOR QUERY FORM

	Journal: SCISPO	Please e-mail or fax your responses and any corrections to:
	Article Number: 2827	E-mail: corrections.esme@elsevier.thomsondigital.com Fax: +33 (0) 1 71 16 51 88

Dear Author,

Please check your proof carefully and mark all corrections at the appropriate place in the proof (e.g., by using on-screen annotation in the PDF file) or compile them in a separate list. Note: if you opt to annotate the file with software other than Adobe Reader then please also highlight the appropriate place in the PDF file. To ensure fast publication of your paper please return your corrections within 48 hours.

For correction or revision of any artwork, please consult <http://www.elsevier.com/artworkinstructions>.

Any queries or remarks that have arisen during the processing of your manuscript are listed below and highlighted by flags in the proof. Click on the 'Q' link to go to the location in the proof.

Location in article	Query / Remark: click on the Q link to go Please insert your reply or correction at the corresponding line in the proof
<u>Q1</u> <u>Q2</u> <u>Q3</u>	Please confirm that given names and surnames have been identified correctly. Please check the page range for reference [43]. Please supply the volume and page range for reference [46]. <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> Please check this box or indicate your approval if you have no corrections to make to the PDF file <input style="float: right; margin-left: 20px;" type="checkbox"/> </div>

Thank you for your assistance.



Disponible en ligne sur

ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte
www.em-consulte.com



ORIGINAL ARTICLE

Anaerobic performance after endurance strength training in hypobaric environment

La performance anaérobie après l'entraînement en force d'endurance en milieu hypobarique

Q1 J. Álvarez-Herms^{a,*}, S. Julià-Sánchez^a, F. Corbi^b,
T. Pagès^a, G. Viscor^a

^a Departament de Fisiologia i Immunologia, Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona, Av. Diagonal, 643, E-08028 Barcelona, Spain

^b Centre de Lleida, Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC), Universitat de Lleida, Lleida, Spain

Received 17 June 2013; accepted 8 November 2013

KEYWORDS

Jumping performance;
Hypobaric chamber;
Altitude training;
Intermittent hypoxia

Summary

Objective. – This study was aimed to assess anaerobic capacity after an endurance strength training (EST) protocol for 4 weeks.

Methods. – A group of volunteers ($n=5$) trained in a hypobaric chamber at a simulated altitude of 2500 m (HYP), while the other ($n=7$), trained at sea level (NOR). Anaerobic power was tested before and after the training protocol through the widely used Bosco's vertical jump test procedures: squat jump (SJ), countermovement jump (CMJ) and sixty seconds repeated maximal countermovement vertical jump (60CMJ). The mean height for the whole 60CMJ test (cm), partial heights every 5 and 15 sec were measured and the fatigue index (60CMJ/CMJ) was calculated.

Results. – Hypoxic training significantly improved mean height for 60CMJ by 6.75% ($P=0.029$) in comparison to normoxic training. The fatigue index was also significantly lower ($P=0.031$) in the HYP group than in the NOR group. Partial heights at 45–60'' intervals increased by 32.9% in the post-training test for the HYP group ($P=0.004$), compared to a lower improvement of 21.9% for the NOR group ($P=0.022$).

Conclusions. – Our study shows a better anaerobic capacity after EST training at a moderate simulated altitude compared with that attained following the same training protocol at sea level.

© 2014 Published by Elsevier Masson SAS.

* Corresponding author.

E-mail addresses: gviscor@ub.edu, gviscor@gmail.com (J. Álvarez-Herms).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.scispo.2013.11.002>

0765-1597/© 2014 Published by Elsevier Masson SAS.

MOTS CLÉS

Performance ;
Saut verticale ;
Caisson hypobare ;
Entraînement en
altitude ;
Hypoxie
intermittente

Résumé

Objectif. – Cette étude avait pour objectif à évaluer la capacité anaérobie après un protocole d'entraînement d'endurance de puissance (EST) pendant 4 semaines.

Méthodes. – Un groupe de volontaires ($n=5$) a été entraîné dans un caisson hypobare à une altitude simulée de 2500 m (HYP), tandis que l'autre ($n=7$), l'a été au niveau de la mer (NOR). La puissance anaérobie a été testée avant et après le protocole d'entraînement au moyen de la procédure largement utilisée du test de détente verticale de Bosco : squat jump (SJ), saut de contremouvement (CMJ) et sauts verticaux maximaux répétés de contremouvement dans 60 secondes (60CMJ). La hauteur moyenne pour l'ensemble du test 60CMJ (cm), les hauteurs partielles chaque 5 et 15 secondes ont été mesurées et l'indice de fatigue (60CMJ/CMJ) a été calculé.

Résultats. – L'entraînement en hypoxie a considérablement amélioré la hauteur 6,75% ($p=0,029$) pour 60CMJ par rapport à l'entraînement en normoxie. L'indice de fatigue était également significativement plus faible ($p=0,031$) dans le groupe HYP que dans le groupe NOR. Des hauteurs partielles à intervalles de 45–60'' ont augmenté de 32,9% dans le test post-entraînement pour le groupe HYP ($p=0,004$), comparativement à une amélioration inférieure de 21,9% pour le groupe NOR ($p=0,022$).

Conclusions. – Notre étude montre une meilleure capacité anaérobie après l'entraînement EST à une altitude simulée modéré par rapport à celui atteint en suivant le même protocole d'entraînement au niveau de la mer.

© 2014 Publié par Elsevier Masson SAS.

1. Introduction

The use of hypoxic training to improve sports performance through enhancing aerobic and anaerobic metabolic pathways has received much attention in recent years due to the good results obtained by athletes who born and live in altitude [1]. However, performance is significantly compromised when high intensity sport is achieved in hypoxia [2]. Although several studies have described the positive effects of altitude exposure (chronic and intermittent) on aerobic [3,4] and anaerobic capacity [5–11] following different hypoxia protocols, other have failed to found these effects [12,13]. By this reason a scientific consensus on anaerobic training and performance following the use of hypoxia to improve sea level performance remain unclear. This can be due at least in part because of the large number of studies, which have employed different methodologies or measured different variables [14].

Most sports require very specific high workload training [15–18] when anaerobic metabolism is primarily involved. It has been hypothesized that it is possible to further stimulate the lactic anaerobic pathway at maximal and supra-maximal intensities by training under high altitude conditions, thus yielding enhanced athletic performance [19]. The importance of endurance strength training (EST) has been well established for several sports, such as soccer, basketball or volleyball which some actions depend primarily on speed of execution and the ability to accelerate, being these parameters dependent of maximum strength and maximum strength/power output [20]. Sprinting and other high intensity actions depend of explosive strength as the ability of the neuromuscular system to generate coordinated high-speed actions [21].

Some research has focused on the response to intense and maximal exercise at altitude with possible benefits for performance in specific sports. Stimulation of anaerobic

metabolism through strength training could have the following benefits:

- increased glycolytic metabolism after submaximal exercise [15,16,19], probably as a consequence of an enhanced contribution by anaerobic pathways during the post-exercise recovery phase [22];
- changes in cell metabolism regulation, enhancing tolerance to the accumulation of anaerobic pathway waste products, thus reducing fatigue and cell stress [15,23];
- enhanced muscular buffer capacity [5,19];
- switching phosphofructokinase gene expression to anaerobic pathway [24];
- and increased energy production via anaerobic pathways as a compensatory mechanism for the reduced energy supplied by aerobic pathways [25].

In consequence, a certain similarity between the stresses induced in the human body by altitude exposure and by a maximal intensity specific training can be deduced, since maximal intensity specific training in hypoxia could enhance anaerobic capacity by increasing the efficiency of the glycolytic energy production mechanisms [26]. The combination of these two stimuli (hypoxia and endurance strength training) could be beneficial to athletes by independently and simultaneously eliciting the same or some complementary adaptive responses.

Most of the previous studies have focused on specific work performed in hypoxia (running, cycling, rowing, etc.) measuring overall performance, including the technical component of execution. Nevertheless, to the best of our knowledge, no studies exist to date on strength training in hypoxia as a method for improving anaerobic capacity. It is common practice in sport to use strength training to enhance power, and different strength training methodologies have been employed to improve specific high intensity

Please cite this article in press as: Álvarez-Herms J, et al. Anaerobic performance after endurance strength training in hypobaric environment. Sci sports (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.scispo.2013.11.002>

Table 1 Anthropometric characteristics of the subjects.

Parameter	Normoxia		Hypoxia	
	Pre	Post	Pre	Post
Age (y)	24 ± 4.5		23.8 ± 3.8	
Height (cm)	174.4 ± 7.2		172.2 ± 10.3	
Weight (kg)	65 ± 5.7	64.8 ± 5.1	72.2 ± 8.2	71.3 ± 8.0
Basal heart rate (beats/min)	63.8 ± 14.1	59.2 ± 11.0	62.2 ± 11.0	57.1 ± 7.9

sports performance [27]. In this study we tested the hypothesis that specific strength training in hypoxia would increase efficiency of anaerobic metabolism and muscular performance. A major focus of this study was to test a different concept of training methodology, since we used strength training in hypoxia as a method for maximal challenge to muscle anaerobic metabolism. Through training in moderate hypoxia, the specific workload required can be raised during strength training, but generating greater physiological stimulation than the same training at sea level and thus eliciting a higher degree of morphofunctional and metabolic adaptations in skeletal muscle. To test this hypothesis, we designed a program of 12 training sessions aimed both to enhance the endurance and the explosive strength of the lower limbs. After the end of this protocol, we tested anaerobic capacity by performing the countermovement jump test during 60 seconds, thus comparing the two groups trained using the same protocol but under different environmental conditions: sea level and moderate simulated altitude.

2. Methods

2.1. Participants

A total of twelve healthy, physically active Sports Science students voluntarily agreed to participate in this study. All of them were recreational athletes with no more of four training sessions by week. The basic anthropometric characteristics of the subjects are presented in Table 1. After attending an information session describing the objectives, advantages, risks and a detailed protocol of the study, each subject signed an individual informed consent form. All procedures were conducted in accordance with the Declaration of Helsinki as amended by the 59th WMA General Assembly, in Seoul, Korea, October 2008 and the IJSM's ethical standards [28]. This study obtained approval of the Comité de Bioética de la Universitat de Barcelona (Institutional Review Board IRB0003099, Resolution 30/06/2010). According to the results of the initial test, subjects were divided into two groups in order to establish a balanced fitness composition between the group training at sea level (NOR) composed by 6 men and 1 women (aged 24 ± 4.5 years) and that training at a simulated altitude of 2500 m (HYP) composed by 3 men and 2 women (mean age: 23.8 ± 4 years). The participants did not receive financial compensation or any other kind of reward.

2.2. Experimental design

The protocol consisted of a classical “before” versus “after” design in order to compare the possible differences between the two training conditions (Table 1). Baseline and final tests were based on the well-established Bosco battery of vertical jump tests, in which an athlete performs a series of continuous jumps for a specified duration of 60 seconds. This test evaluates anaerobic power, utilizing stretch-shortening cycle actions of the lower extremities to induce and evaluate fatigue from the contact time between jumps. This methodology facilitates detection of a possible increase in anaerobic capacity. In accordance with the aim of this study, anaerobic capacity was tested by an “all out” 60-second countermovement jump test (60CMJ). Different authors have confirmed that the 60CMJ test is an exercise with supra-maximal characteristics, during which 70–85% of the energy used is supplied by anaerobic pathways and consequently, any decrease in work capacity during the test will be directly related to depletion of the anaerobic substrates, accumulation of metabolite waste due both to insufficient removal and exacerbated production, and diminished alkaline reserves [29].

All the subjects lived at sea level throughout the study. As physical activity students, they were active subjects but anyone among them was a weight trainer or sprint runner. No one was a competitive athlete or was maintaining a non-study related training throughout the protocol with a potential alien impact on the post-study outcomes. Three training sessions were performed weekly for a month (4 weeks). Each session lasted for about two hours, was conducted at room temperature (ranging from 20–24 °C) and was exactly equal in workload and volume for both groups. The NOR group trained at near sea level (75 m a.s.l), whereas the HYP group trained inside a computer-controlled hypobaric chamber (CHEX-1; Moelco, Spain) at a barometric pressure of 747 hPa, equivalent to 2500 m of altitude. The HYP group was exposed to hypobaric hypoxia for a total time of about 26 hours. The time of “ascent” to altitude inside the hypobaric chamber (10 min) was used for warming-up, and the “descent” (15 min) for the recovery procedure, and an identical procedure was also established for the NOR group. All subjects were instructed on the level of effort required during training. None described intolerance to training under normoxic nor hypoxic conditions.

The training exercises chosen were half-squats with extra weight, half-squat weight lifting exercises with jumps and extra weight repeated vertical countermovement jumps

(CMJ). Speed of execution was controlled by means of an electronic metronome in order to facilitate a suitable and rhythmic pace among all subjects. The workload during training was individually assigned according to the explosive nature of the effort and the higher possible velocity of execution [30].

2.3. Data acquisition

A baseline test (T1) was performed 4 days before start the training protocol, whereas the final test (T2) was carried out 6 days after the end of the training program. All the subjects were given an appointment for the test on the same day, and at a similar time as regards the last meal eaten.

To evaluate anaerobic capacity, the well-established test developed by Bosco for measuring lactic anaerobic capacity was used [31]. Maximal explosive strength was measured by the squat jump (SJ) and countermovement jump (CMJ) tests, considering only the best of three attempts, while to assess anaerobic capacity a continuous series of 60 seconds maximal countermovement jumps (60CMJ) was used. This test consisted of continuous jumps involving stretch-shortening cycles. In this test protocol, performance in mechanical parameters depends on the structure of the innervation pattern and training status of the neuromuscular system in terms of contractile and elastic abilities [21]. Obviously, any decrease in power output during the test would be directly related to muscle fatigue. The results of the 60CMJ test were used to evaluate anaerobic capacity over 60 seconds in both groups. During the tests, data were registered by means of an Ergo Jump Bosco System contact mat, which was connected to a computer through a USB port. Data were acquired, stored and processed using Chronojump 0.8 software in order to calculate jump height using body mass and flight time. This equipment and set-up has been widely used in previous studies to assess anaerobic capacity.

Additionally, both tests (T1 and T2) were recorded by means of a Casio Exilim Pro-Ex-F1 (300 Hz) camera and 2D digitized by means of motion analysis software (Kwon3D) to evaluate flexed knee angles for every jump and subject. All jumps with a flexion angle 5% lower or higher than the previously established angle of 90° were not considered.

2.4. Statistical analysis

Data were statistically analyzed and graphically presented by means of Sigmaplot 12.3 software (Systat Software Inc., USA). Pre-training versus post-training differences were tested by means of a repeated measures two-way ANOVA. Comparison between the HYP and NOR groups was performed by a simple repeated measures two-way ANOVA test. The Student's *t*-test was performed for specific comparisons when appropriate. In some cases, data are presented as a percentage of the baseline test in order to avoid individual variability and provide greater clarity. Statistical significance was determined as $P < 0.05$. Data are presented as mean values \pm standard deviation.

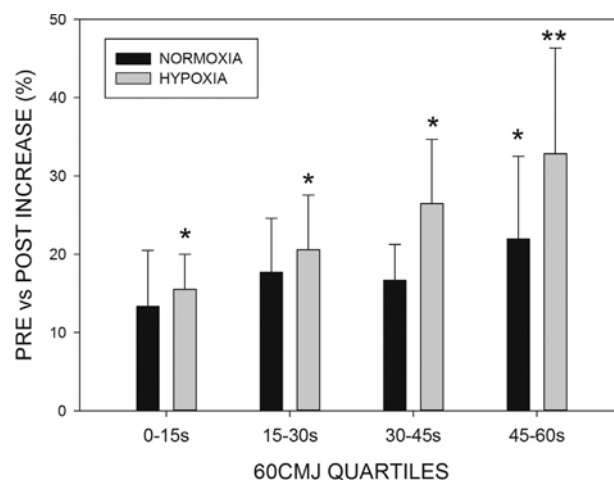


Figure 1 After training percent increases in jump height during CMJ60 quartiles (1: 0–15 seconds; 2: 15–30 seconds; 3: 30–45 seconds; 4: 45–60 seconds). *: denotes statistical significance pre- versus post-training. **: indicates statistical significance when comparing normoxia vs hypoxia groups.

3. Results

3.1. Squat jump and countermovement jump

The squat jump (SJ) and countermovement jump (CMJ) from resting are measures of explosive strength. The SJ is an explosive, active manifestation of strength from static position (90° leg flexion). The CMJ is also a reactive manifestation of explosive strength. In accordance with the Bosco's test, these parameters were measured at the beginning of the study. Measurements were taken from resting conditions in order to evaluate maximum explosive strength performance. As can be seen in Table 2, performance in both groups was similar for T1 and no statistically significant differences were found after the training between groups or pre- and post training. As expected, the results indicated that both groups showed a similar level of improvement. No differences in training stimuli were found for post-training results.

3.2. The 60CMJ test

The results are shown in Table 2. At baseline (T1), measures of maximal explosive strength (squat jump (SJ) and countermovement jump (CMJ) were taken from resting to assess performance and use this data to calculate the fatigue index (FI). The specific indicator of anaerobic capacity was calculated from the mean height. Results for T1 were similar between HYP and NOR groups as a consequence of the arbitrary group composition. Two way ANOVA for repeated measures yielded no statistically significant differences between groups for T1 ($P = 0.772$). However, as can be seen in Table 2 and Fig. 1, results for the 60CMJ test improved for both groups following the protocol training. After protocol training (T2), a considerable improvement in mean height was observed for the HYP group (22.6% versus 15.8% NOR). In Table 2 the differences in the improvement attained by both groups are clearly evident, as are also the

Table 2 Protocol training volume, exercise and model session.

	Total Repetitions	Exercise	Workload	Session model
Week 1	380	Half-squat	Moderate intensity (controlled execution)	[15r-4s/2'rec] (10')-2bk [20r-4s/2'rec] (10')-2bk [25r-4s/2'rec] (10')-1bk
Week 2	600	Half-squat	Maximal volume (low execution)	[25r-4s/90''] (8')-2bk
Week 3	420	Half-squat jumping (weighted jumps)	High intensity (high speed execution)	[10r-5s/45''] (6')-3bk
Week 4	225	Plyometrics (unweighted vertical jumps)	Maximal intensity	[5j-5s/3'] (6')-3bk

Codes for description of the study protocol training for HYP and NOR groups. r: repetitions; s: sets; rec: recovery time between sets; j: jumps; bk: blocks; ': minutes; ''': seconds. First parenthesis in Session model column indicates a whole training block, whereas the second parenthesis indicates the time recovery between consecutive blocks.

marked effect of protocol training. Jumping performance in the 60CMJ test showed a statistically significant difference ($P=0.029$; post-hoc Student's *t*-test) in the mean height of the 60CMJ test between the HYP group and the NOR group.

In regards to a diagnostic analysis of the effort applied by the subjects (voluntary involvement of the subject throughout the test), this can be estimated from the decrease in muscular work along the whole test duration (Mean Height 0–15 seconds/CMJ) as originally described by Bosco. The aim of this calculation is to assess the subjects' level of involvement when performing the test. The maximum possible value will be 1 if the subject reaches a mean jump height during the first 15 seconds equal to their baseline CMJ test value. The 60CMJ and CMJ test values obtained for both groups indicate a similar high level of involvement when performing the test: NOR group yielded $0.79 (\pm 0.06)$ in T1 and $0.72 (\pm 0.05)$ in T2, and HYP group, $0.74 (\pm 0.09)$ in T1 and $0.75 (0.04)$ in T2 (see Table 2). No statistically significant differences were found pre- or post-training between the two groups.

3.3. Fatigue index

The original protocol by Bosco established the term Fatigue Index (FI). This concept analyzes the effect of fatigue throughout the test. The FI is calculated by dividing the height reached during the 60-second test by the maximum height in CMJ test at the beginning of the protocol. Fig. 1 and Table 2 show the differences found between groups and the significant differences obtained in T2. The HYP group improved after the training protocol, from $0.62 (\pm 0.11)$ in T1 to $0.66 (\pm 0.04)$ in T2, but the NOR group failed to show any statistically significant improvement in the fatigue index: $0.58 (\pm 0.05)$ in T1 and $0.56 (\pm 0.08)$ in T2. When comparing T1 and T2 between both groups, a significant difference was detected for T2 (0.56 for the NOR group versus 0.66 for the HYP group) ($P=0.031$; post-hoc Student's *t*-test), whereas no differences were detected in T1, thus confirming the homogeneity in the assignation of the subjects to the two experimental groups.

3.4. Height jumps at 5- and 15-second intervals during the 60CMJ test

The mean jump height at each 5- and 15-second interval was compared between T1 and T2 for both groups. The aim of this analysis was to evaluate the evolution of performance and anaerobic capacity as measured by progressive decrease in jump height (cm). The results obtained for mean height attained during the 60CMJ test for both groups show that the HYP group performed better in the final phase of the test (from 40 seconds until the end). This clear difference in performance can be observed in Table 3 and Fig. 2. "Before" versus "After" differences were marked in the last 15 seconds of the 60CMJ test, and significant differences in both groups between T1 and T2 (HYP $P=0.004$, NOR $P=0.022$) were detected. These results for the final intervals

Table 3 Bosco test's results. Changes in mean height jumps and fatigue index.

	HYP	NOR
Height of squat jump (SJ) (cm)		
Pre	28.62 (± 5.8)	30.95 (± 2.8)
Post	32.95 (± 3.7)	32.84 (± 4.1)
Pre vs. post	NS	NS
Height of countermovement jump (CMJ) (cm)		
Pre	31.9 (± 4.1)	32.48 (± 3.95)
Post	34.01 (± 2.3)	35.74 (± 4.7)
Pre vs. post	NS	NS
CMJ60 mean height jump (cm)		
Pre	18.42 (± 2.0)	18.46 (± 3.5)
Post	22.57 (± 2.3)	21.37 (± 4.1)
Pre vs. post	$P=0.029$	NS
CMJ60 fatigue index		
Pre	0.62 (± 0.11)	0.58 (± 0.05)
Post	0.66 (± 0.04)	0.56 (± 0.08)
Pre vs. post	$P=0.031$	NS

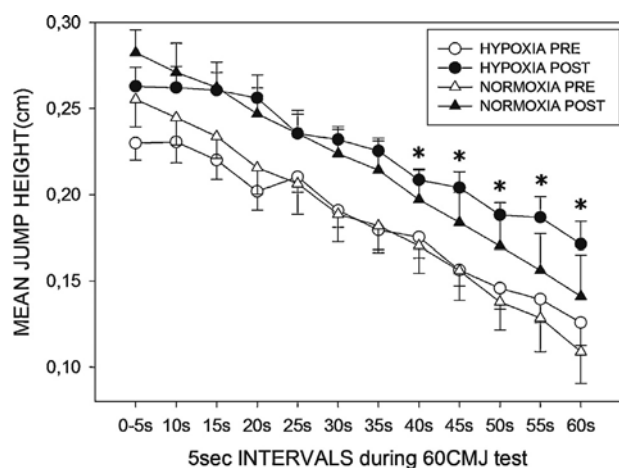


Figure 2 Fatigue evolution, reflected as mean jump height every 5 seconds intervals, during CMJ60 test. *: indicates statistical significance between groups.

agree with the differences observed for the FI, clearly indicating considerable differences in performance due to the impact of our protocol training: in other words, our results suggest that the training results for the HYP group are in agreement with the hypothesis of this study, confirming that EST was more effective for the HYP group than for the NOR group.

4. Discussion

Power strength can be divided into three modalities: explosive power, maximal power and endurance power, all supplied by alactic and lactic anaerobic metabolism. This study focused on endurance strength training, by comparing the final performance following the same training protocol conducted in hypobaric hypoxia versus normoxia. Endurance anaerobic power was measured using a well-established test (the 60CMJ test) [31]. The main aim of this study was to analyze the reliability of a new method of sports training using strength endurance training in hypoxia. The rationale behind this study was based on previous reports, which concluded that anaerobic power (15–60 seconds) can be maintained in hypoxia at a similar level as normoxia. This equivalent performance in different environments may be explained by enhanced anaerobic energy release and the contribution this makes to total metabolic cost. However, the workload of specific training in hypoxia has been argued to be less than at sea level due to difficulties in maintaining the same intensity over time [32]. According to several authors, anaerobic performance improves following the implementation of different protocols using hypoxia [5–11,18,33]. However, no consensus currently exists regarding protocols, methodologies, acclimatization or tolerance to training [11]. Furthermore, the wide variability in protocols applied, parameters measured and results obtained [14,34,35] render the possibility of analyzing anaerobic performance in hypoxia and being the acquisition of a rigorous knowledge base for prescription of training even more difficult.

Sports with a high reliance on the anaerobic pathway for primary performance require the production of high

power outputs maintained over a short period. High intensity actions in sports require high levels of anaerobic power and this is directly related to short-term maximal force production. Meanwhile, high intensity exercise in hypoxia enhances the intensity of training when absolute workload is equal to that in normoxia [32]. As a consequence, training at a higher intensity could have benefits for anaerobic performance in high performance sports [15–18]. So, our experimental design was aimed to provoke greater stimulation of the anaerobic pathway during training by means of the simultaneous moderate hypobaric hypoxia exposure. The Bosco 60CMJ test was chosen as the means to assess anaerobic capacity since it offers the possibility of measuring lactic and alactic anaerobic capacity for short-term interval-based work patterns.

As explained above, our results show a clear improvement in T2 for the HYP group when compared to the NOR group in mean height for the 60CMJ test and a lower FI in the final phase of the test (35–60 seconds) (Fig. 1 and Table 2), precisely when blood supply for the glycolytic pathway is essential for sustaining muscle energy. These data provide compelling evidence that the protocol training was effective in improving anaerobic capacity to a greater extent for hypoxia than sea level training. Differences were statistically significant for the HYP group when comparing T1 and T2 performance in mean height during the 60CMJ test ($P=0.029$) and for the FI between groups in the final phase of the test. As can be seen in Figs. 1 and 2 and Table 3, there was a considerable difference in performance between both groups from 30 to 60 seconds. The possible mechanisms responsible for this improvement are unknown, but muscular buffer capacity, a higher tolerance to glycolysis metabolites and waste product removal could account for the higher improvement observed in the HYP group at the end of the training program. We can consider that such improvement would be based on several concomitant physiological adjustments:

- improved muscular buffer capacity by altitude training has been previously reported [36,37]. It has been also well established that during maximal exercise in acute hypoxia there is a deficit of energy supply by the aerobic pathway, with a higher O_2 deficit and higher muscle lactate concentrations, compensated by higher anaerobic production of energy [11,38];
- improved economy of energy production and utilization, through cell acclimatization to higher molecular stress [39] or improved endurance power following EST training [40];
- an improved efficiency of the cardiovascular system, reflected in a quicker heart rate recovery following maximal exercise. In a previous study with the same experimental design, heart rate recovery was faster in the group trained in hypoxia than in the group trained in normoxia [41];
- improved efficiency of the respiratory system since respiratory muscles must work more intensively during hypoxia exposure due to the hyperventilatory response, thus producing a certain extent of respiratory muscle training [42,43]
- it has been also recently reported that the use of glucose through glycolytic pathways during maximal exercise

in hypoxia is higher in comparison with that for a same workload in normoxia [44].

When comparing the performance of the two experimental groups during the final interval (45–60 seconds), statistically significant difference was found, with the HYP group achieving a higher mean height in this phase, thus indicating a higher endurance capacity for explosive strength in such group. The 60CMJ test is recommended in the literature in order to evaluate subject involvement during test execution. We found that both groups performed the test with a sufficient level of involvement as denoted by a similar decay in height jump curves, thus indicating that a possible “to keep back” behavior was avoided (Fig. 2). As indicated earlier, training under new conditions may elicit a higher degree of motivation, and thus could also be a means for enhancing performance. The subjective perception of effort under hypoxia also improves the capacity and motivation to train. Recently have been reported increased hormonal changes [45] and improved muscle force and resistance [46] by applying hypoxic stimulus in similar ways as we used it in the present study. Consequently, we consider that this methodology can be a good method to renew motivation in high performance athletes who require new training stimuli.

Several studies have described problems in the quality of motor tasks during the execution of a specific sport movement (technique) performed under hypoxia [32]. One of the aims of this study was to assess the possibility of enhancing anaerobic capacity by means of intermittent hypoxia training without affecting motor task performance or technique skills. During protocol training, no problems in maintaining the equal intensity prescribed were observed.

In conclusion, the present study provides data showing a significant improvement in anaerobic capacity after 12 EST training sessions at simulated altitude (2500 m) compared to identical training at sea level. A significant difference in performance just in the final phase of the 60CMJ test, precisely when glycolytic metabolism is essential to maintain effort intensity has been found. However, further studies are required to identify the physiological mechanisms underlying this enhancement in anaerobic capacity.

5. Conclusions and practical applications

The present study provides data showing a significant improvement in anaerobic capacity after 12 EST training sessions at simulated altitude (2500 m) compared to identical training at sea level. A significant difference in performance just in the final phase of the 60CMJ test, precisely when glycolytic metabolism is essential to maintain effort intensity has been found. However, further studies are required to identify the physiological mechanisms underlying this enhancement in jumping performance. The main limitations of this pilot study are a) the low number of subjects and b) the lack for physiological parameters classically associated to anaerobic capacity. As a consequence, the impact of a training program using this methodology on specific sports (running, cycling, swimming, rowing, etc.) needs to be validated in further studies before establishing this kind of protocol as a new standard method of training for high performance athletes. Nevertheless, we can conclude

that the use of high intensity physical activity under moderate hypobaric hypoxia (whether specific to a particular sport/specialty or not) could be a valid method for improving anaerobic capacity. Additionally, it is necessary also to clarify if hypobaric (natural or simulated altitude) and normobaric (gas mixtures, “hypoxicators”) methods of hypoxia exposure are equivalent for eliciting the same physiological responses here described.

Disclosure of interest

The authors declare that they have no conflicts of interest concerning this article.

Funding: None.

Acknowledgements

This study would not have been possible without the generous collaboration of all the volunteers. The authors also thank Dr. Casimiro Javierre (Faculty of Medicine, UB) and Rubén Martínez (Bellvitge Hospital) for their help and medical supervision. Thanks also go to Mr. Ignacio Montoya (ZR Barcinova) and Mr. Santiago Blázquez (Fibre Medic) for their cooperation and for the loan of material.

References

- [1] Wilber RL. Application of altitude/hypoxic training by elite athletes. *Med Sci Sports Exerc* 2007;39(9):1610–24.
- [2] Levine BD, Stray-Gundersen J. “Living high-training low”: effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J Appl Physiol* 1997;83(1):102–12.
- [3] Levine BD, Friedman DB, Engfred K, Hanel B, Kjaer M, Clifford PS, et al. The effect of normoxic or hypobaric hypoxic endurance training on the hypoxic ventilatory response. *Med Sci Sports Exerc* 1992;24:769–75.
- [4] Wilber RL. Current trends in altitude training. *Sports Med* 2001;31(4):249–65.
- [5] Bailey DM, Davies B. Physiological implications of altitude training for endurance performance at sea level: a review. *Br J Sports Med* 1997;31(3):183–90.
- [6] Böning D. Altitude and hypoxia training – A short review. *Int J Sports Med* 1997;18(8):565.
- [7] Hendriksen IJ, Meeuwse T. The effect of intermittent training in hypobaric hypoxia on sea-level exercise: a cross-over study in humans. *Eur J Appl Physiol* 2003;88(4–5):396–403.
- [8] 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.
- [9] Martino M, Myers K, Bishop P. Effects of 21 days training at altitude on sea-level anaerobic performance in competitive swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 1995;27(5):S7.
- [10] Nummela A, Rusko H. Acclimatization to altitude and normoxic training improve 400-m running performance at sea level. *J Sports Sci* 2000;18(6):411–9.
- [11] Ogura Y, Katamoto S, Uchimar J, Takahashi K, Naito H. Effects of low and high levels of moderate hypoxia on anaerobic energy release during supramaximal cycle exercise. *Eur J Appl Physiol* 2006;98(1):41–7.
- [12] Roels B, Millet GP, Marcoux CJ, Coste O, Bentley DJ, Candau RB. Effects of hypoxic interval training on cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 2005;37(1):138–46.

- 574 [13] Morton JP, Cable NT. Effects of intermittent hypoxic training on aerobic and anaerobic performance. *Ergonomics* 2005;48(11–14):1535–46. 627
- 575
- 576
- 577 [14] Bonetti DL, Hopkins WG. Sea-level exercise performance following adaptation to hypoxia: a meta-analysis. *Sports Med* 2009;39(2):107–27. 628
- 578
- 579
- 580 [15] Banister E, Woo W. Effects of simulated altitude training on aerobic and anaerobic power. *Eur J Appl Physiol* 1978;38(1):55–69. 629
- 581
- 582 [16] Meeuwssen T, Hendriksen IJ, Holewijn M. Training-induced increases in sea-level performance are enhanced by acute intermittent hypobaric hypoxia. *Eur J Appl Physiol* 2001;84(4):283–90. 630
- 583
- 584
- 585
- 586 [17] Mizuno M, Joel C, Bro-Rasmussen T, Mygind E, Schibye B, Rasmussen B, et al. Limb skeletal muscle adaptation in athletes after training at altitude. *J Appl Physiol* 1990;68:496–502. 631
- 587
- 588
- 589 [18] Tabata I, Irisawa K, Kouzaki M, Nishimura K, Ogita F, Miyachi M. Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. *Med Sci Sports Exerc* 1997;29:1275–6. 632
- 590
- 591
- 592 [19] Terrados N, Melichna J, Sylvén C, Jansson E, Kaijser L. Effects of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists. *Eur J Appl Physiol* 1988;57:203–9. 633
- 593
- 594
- 595
- 596 [20] Delecluse C. Influence of strength training on sprint running performance. *Sports Med* 1997;24(3):147–56. 634
- 597
- 598 [21] Komi PV. Biomechanics and neuromuscular performance. *Med Sci Sports Exerc* 1984;16(1):26. 635
- 599
- 600 [22] McLellan T, Kavanagh M, Jacobs I. The effect of hypoxia on performance during 30 s or 45 s of supramaximal exercise. *Eur J Appl Physiol* 1990;60(2):155–61. 636
- 601
- 602
- 603 [23] Stathis CG, Febbraio MA, Carey MF, Snow RJ. Influence of sprint training on human skeletal muscle purine nucleotide metabolism. *J Appl Physiol* 1994;76(4):1802–9. 637
- 604
- 605
- 606 [24] Vogt M, Puntschart A, Geiser J, Zuleger C, Billeter R, Hoppeler H. Molecular adaptations in human skeletal muscle to endurance training under simulated hypoxic conditions. *J Appl Physiol* 2001;91(1):173–82. 638
- 607
- 608
- 609 [25] Weyand PG, Lee CS, Martinez-Ruiz R, Bundle MW, Bellizzi MJ, Wright S. High-speed running performance is largely unaffected by hypoxic reductions in aerobic power. *J Appl Physiol* 1999;86(6):2059–64. 639
- 610
- 611
- 612
- 613
- 614 [26] Wolski LA, McKenzie DC, Wenger HA. Altitude training for improvements in sea level performance. Is the scientific evidence of benefit? *Sports Med* 1996;22(4):251–63. 640
- 615
- 616
- 617 [27] Hickson RC, Dvorak BA, Gorostiaga EM, Kurowski TT, Foster C. Potential for strength and endurance training to amplify endurance performance. *J Appl Physiol* 1988;65:2285–90. 641
- 618
- 619
- 620 [28] Harriss DJ, Atkinson G. *International Journal of Sports Medicine—ethical standards in sport and exercise science research*. *Int J Sports Med* 2009;30(10):701–2. 642
- 621
- 622
- 623 [29] McNeal JR, Sands WA, Stone MH. Effects of fatigue on kinetic and kinematic variables during a 60-second repeated jumps test. *Int J Sports Physiol Perform* 2010;5(2):218–29. 643
- 624
- 625
- 626 [30] Häkkinen K, Kallinen M, Izquierdo M, Jokelainen K, Lassila H, Mälkä E, et al. Changes in agonist-antagonist EMG, muscle CSA, and force during strength training in middle-aged and older people. *J Appl Physiol* 1998;84(4):1341–9. 644
- 627
- 628
- 629 [31] Bosco C, Luhtanen P, Komi PV. A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *Eur J Appl Physiol* 1983;50(2):273–82. 645
- 630
- 631
- 632 [32] Rusko H, Tikkanen H, Peltonen J. Altitude and endurance training. *J Sports Sci* 2004;22(10):928–45. 646
- 633
- 634 [33] Ogita F, Onodera T, Tabata I. Effect of hand paddles on anaerobic energy release during supramaximal swimming. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31(5):729. 647
- 635
- 636
- 637 [34] de Paula P, Niebauer J. Effects of high altitude training on exercise capacity: fact or myth. *Sleep Breath* 2012;16(1):1–7. 648
- 638
- 639 [35] Millet GP, Roels B, Schmitt L, Woorons X, Richalet JP. Combining hypoxic methods for peak performance. *Sports Med* 2010;40(1):1–25. 649
- 640
- 641
- 642 [36] Mizuno M, Savard GK, Areskog NH, Lundby C, Saltin B. Skeletal muscle adaptations to prolonged exposure to extreme altitude: a role of physical activity? *High Alt Med Biol* 2008;9(4):311–7. 650
- 643
- 644
- 645 [37] Gore CJ, Hahn AG, Aughey RJ, Martin DT, Ashenden MJ, Clark SA, et al. Live high: train low increases muscle buffer capacity and submaximal cycling efficiency. *Acta Physiol Scand* 2001;173(3):275–86. 651
- 646
- 647
- 648
- 649 [38] Calbet JAL, De Paz JA, Garatachea N, Cabeza de Vaca S, Chavarren J. Anaerobic energy provision does not limit Wingate exercise performance in endurance-trained cyclists. *J Appl Physiol* 2003;94(2):668–76. 652
- 650
- 651
- 652 [39] Beneke R, Pollmann C, Bleif I, Leithäuser R, Hütler M. How anaerobic is the Wingate Anaerobic Test for humans? *Eur J Appl Physiol* 2002;87(4):388–92. 653
- 653
- 654
- 655 [40] Paavolainen L, Häkkinen K, Hämmäläinen I, Nummela A, Rusko H. Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol* 1999;86(5):1527–33. 654
- 656
- 657
- 658 [41] Álvarez-Herms J, Julià-Sánchez S, Corbi F, Pagès T, Viscor G. Changes in heart rate recovery index after a programme of strength/endurance training in hypoxia. *Apunts Med Esport* 2012;47(173):23–9. 655
- 659
- 660
- 661
- 662 [42] Amann M, Pegelow DF, Jacques AJ, Dempsey JA. Inspiratory muscle work in acute hypoxia influences locomotor muscle fatigue and exercise performance of healthy humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 2007;293(5):R2036–45. 656
- 663
- 664
- 665
- 666 [43] Verges S, Bachasson D, Wuyam B. Effect of acute hypoxia on respiratory muscle fatigue in healthy humans. *Respir Res* 2010;11:109. 657
- 667
- 668
- 669 [44] Katayama K, Goto K, Ishida K, Ogita F. Substrate utilization during exercise and recovery at moderate altitude. *Metabolism* 2010;59(7):959–66. 658
- 670
- 671
- 672 [45] Kon M, Ikeda T, Homma T, Suzuki Y. Effects of low-intensity resistance exercise under acute systemic hypoxia on hormonal responses. *J Strength Cond Res* 2012;26(3):611–7. 659
- 673
- 674
- 675 [46] Manimmanakorn A, Hamlin MJ, Ross JJ, Taylor R, Manimmanakorn N. Effects of low-load resistance training combined with blood flow restriction or hypoxia on muscle function and performance in netball athletes. *J Sci Med Sport* 2012. 660
- 676
- 677
- 678
- 679
- 680

Manuscript Number:

Title: A PROGRAM OF CIRCUIT STRENGTH TRAINING UNDER HYPOBARIC HYPOXIA CONDITIONS IMPROVES THE ANAEROBIC PERFORMANCE OF ATHLETES

Article Type: Full Length Article

Keywords: altitude training; circuit strength training; repeated interval training; lactate accumulation; anaerobic performance.

Corresponding Author: Prof. Ginés Viscor, Ph.D.

Corresponding Author's Institution: Universitat de Barcelona

First Author: Jesús Álvarez-Herms, MSc

Order of Authors: Jesús Álvarez-Herms, MSc; Sonia Julià-Sánchez, MSc; Francisco Corbi, PhD; Teresa Pagès, PhD; Ginés Viscor, Ph.D.

Abstract: Objective: Training High - Living Low model has been studied as an intermittent hypoxic training (IHT) for anaerobic performance improvement. To test the hypothesis that a high-intensity circuit strength training (CST) performed in hypoxia increases the anaerobic running performance at sea level.

Equipment and methods: Twelve sub-elite male 400-m runners were divided into two groups: hypoxia (HYP) (n=6) and control (NOR) (n=6). Twelve sessions were performed over a period of four weeks (three days/week) without any additional running training. Hypobaric training was performed at a simulated altitude of 3000 m (700 hPa; 10.15 PSI). The anaerobic running performance was tested with a repeated interval running training (RIR). Based on an "all-out" 300-m test performed before and after CST, the subjects performed as many sets as they could at 90% of the individual maximal speed reached with a three-minute rest period between sets.

Results: As compared to controls, the HYP group showed the following responses post CST: RIR +20.5% (number of sets) ($p < 0.03$); (HYP: 4.3 ± 1 to 6.6 ± 1.9 vs. NOR: 3.6 ± 1 to 4.6 ± 1.3), maximal lactate accumulation (in the last set) +8.1% ($p < 0.03$) (HYP: 11.8 ± 1 to 15.7 ± 1.3 vs. NOR: 12.5 ± 0.9 to 14.6 ± 1.6). Maximum and recovery heart rates finishing the test and hematology did not show statistically significant differences ($p > 0.05$). However, CST in HYP showed a higher HRavg (152.6 ± 6.2) than sea-level training (144.4 ± 5.1) ($p < 0.01$).

Conclusions: These data indicate that a CST in hypoxia conditions increases the anaerobic performance in trained athletes.

Title: A PROGRAM OF CIRCUIT STRENGTH TRAINING UNDER HYPOBARIC HYPOXIA CONDITIONS IMPROVES THE ANAEROBIC PERFORMANCE OF ATHLETES.

UN PROGRAMME DE CIRCUIT ENTRAÎNEMENT DE FORCE SOUS CONDITIONS D'HYPOXIE HYPOBARE AMELIORE LA PERFORMANCE ANAEROBIE DES ATHLETES.

Submission type: Original Investigation

Short title: Hypoxic Strength Training

Authors: Jesús Álvarez-Herms¹, Sonia Julià-Sánchez¹, Francisco Corbi², Teresa Pagès¹, Ginés Viscor¹

Affiliations:

¹ Department of Physiology and Immunology. Faculty of Biology. University of Barcelona. Spain

² Department of Biomechanics. National Institute of Physical Education of Catalonia (Lleida Center). University of Lleida. Spain

Corresponding author:

Prof. Gines Viscor Phd. Department of Physiology and Immunology. Faculty of Biology. University of Barcelona. Avinguda Diagonal 643, 08028, Barcelona. Spain. Tel. 0034+934021531 Fax. 0034+934110358

email: gviscor@ub.edu

Conflict of interest: none

1 Summary

2
3 Objective: The main aim of this study was to test the hypothesis that a high-intensity
4 circuit strength training (CST) performed in hypoxia increases the anaerobic running
5 performance at sea level.

6 Equipment and methods: Twelve sub-elite male 400-m runners were divided into two
7 groups: hypoxia (HYP) (n=6) and control (NOR) (n=6). Twelve sessions were
8 performed over a period of four weeks (three days/week) without any additional running
9 training. Hypobaric training was performed at a simulated altitude of 3000 m (700 hPa;
10 10.15 PSI). The anaerobic running performance was evaluated with a repeated interval
11 running (RIR) test. Based on an "all-out" 300-m test performed before and after CST,
12 the subjects performed as many sets as they could at 90% of the individual maximal
13 speed reached with a three-minute rest period between sets.

14 Results: As compared to controls, the HYP group showed the following responses post
15 CST: RIR +20.5% (number of sets) ($p<0.03$); (HYP: 4.3 ± 1 to 6.6 ± 1.9 vs. NOR: 3.6 ± 1
16 to 4.6 ± 1.3), maximal lactate accumulation (in the last set) +8.1% ($p<0.03$) (HYP: 11.8
17 ± 1 to 15.7 ± 1.3 vs. NOR: 12.5 ± 0.9 to 14.6 ± 1.6). Maximum and recovery heart rates
18 finishing the test and hematology did not show statistically significant differences
19 ($p>0.05$). However, CST in HYP showed a higher HRavg (152.6 ± 6.2) than sea-level
20 training (144.4 ± 5.1) ($p<0.01$).

21 Conclusions: These data indicate that a CST in hypoxia conditions increases the
22 anaerobic performance in trained athletes.

23
24 Keywords: altitude training, circuit strength training, repeated interval training, lactate
25 accumulation, anaerobic performance.

26

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

27 Résumé

28 Objectif: Cette étude a été conçue pour tester l'hypothèse selon laquelle un circuit
29 entraînement de force à haute intensité (CST) effectué en hypoxie augmente la
30 performance anaérobie au niveau de la mer.

31 Matériel et méthodes: Douze hommes sous-élite de 400 m coureurs ont été divisés en
32 deux groupes: l'hypoxique (HYP) (n = 6) et de contrôle normobarique (NOR) (n = 6).
33 Douze séances ont été réalisées sur une période de quatre semaines (trois jours par
34 semaine) sans aucun entraînement supplémentaire en cours. L'exposition a
35 environnement hypoxique a été effectué à une altitude simulée de 3000m (700 hPa;
36 10.15 PSI) en un caisson hipobarique. La performance anaérobie a été testée avec un
37 test intervallique d'exécution répétée. Basé sur un test "all-out" de course 300m effectué
38 avant et après CST, les sujets ont effectué autant de séries que possible à 90 % de la
39 vitesse maximale individuel atteint d'une période de repos de trois minutes entre les
40 séries.

41 Résultats: Par rapport aux témoins, le groupe HYP ont montré les réponses suivantes
42 après CST: nombre de courses +20,5% ($p < 0,03$); (HYP: 4.3 ± 1 à $6,6 \pm 1,9$ vs NOR:
43 $3,6 \pm 1$ à 4.6 ± 1.3) et l'accumulation de lactate maximale (après le dernier course
44 complété) +8,1% ($p < 0,03$) (HYP : $11,8 \pm 1$ à $15,7 \pm 1,3$ vs NOR: $12,5 \pm 0,9$ à $14,6 \pm$
45 $1,6$). Les taux maximaux et de récupération de la fréquence cardiaque au finir le test et
46 des paramètres hématologiques ne montrent pas de différences statistiquement
47 significatives ($p > 0,05$). Toutefois, CST dans HYP a montré une HRavg plus élevé
48 ($152,6 \pm 6,2$) que pour l'entraînement au niveau de la mer ($144,4 \pm 5,1$) ($p < 0,01$).

49 Conclusions: Ces résultats indiquent que la CST sous les conditions de l'hypoxie
50 hypobarique augmente la performance anaérobie chez les athlètes entraînés.

51
52 Mots-clés: entraînement en altitude, entraînement en force, entraînement par intervalles
53 répétés, accumulation de lactate, performance anaérobie.

54

55 1. Introduction

1
2
3 56 Athletic disciplines involving anaerobic performance use both power strength and
4
5 57 repeated interval running as specific methods of training. These exercises require a
6
7 58 greater specificity of effort including also psychological stress. Under this premise,
8
9 59 training in hypoxia increases the perception of effort providing a greater specific
10
11 60 stimulus for anaerobic metabolism (1). However, the use of different models of
12
13 61 intermittent hypoxia training (IHT) to improve athletic performance is subject to
14
15 62 extensive discussion at the moment. Two models are classically used: 1) the “Living
16
17 63 High - Training Low” (LH-TL) model has the principal goal of enhancing aerobic
18
19 64 performance through the stimulation of EPO release and red blood cell concentration (2)
20
21 65 and, 2) the “Training High - Living Low” (TH-LL) model, which could improve
22
23 66 anaerobic performance by providing an additional stimulus to training (1). Whereas the
24
25 67 aerobic performance has been shown to increase following LH-TL protocols (2), some
26
27 68 authors have described improvements in anaerobic performance using the TH-LL
28
29 69 approach (3-6). In contrast, there are also studies that have found no significant benefits
30
31 70 to applying either LH-TL (7) or TH-LL (8). The inconclusive data from the studies have
32
33 71 led to a continuing debate on the usefulness of intermittent hypoxia exposure/training
34
35 72 for elite athletes. These discrepancies could be due to the wide variability in some
36
37 73 experimental factors, including the type and duration of hypoxia exposure, the volume
38
39 74 and intensity of the exercise, the subject training status and the time point for evaluating
40
41 75 performance, in the revised literature (9). Despite these discrepancies, there are well-
42
43 76 documented psychological, metabolic and peripheral effects of exposure and training in
44
45 77 hypoxia conditions for anaerobic metabolism (4,10). However, to our knowledge, there
46
47 78 are no previous studies measuring the anaerobic performance after of the training
48
49 79 protocol of CST in hypoxia. The CST is a well-established training method commonly
50
51 80 used by endurance athletes to improve both the neuromuscular and cardiovascular
52
53 81 fitness (11). Regarding to the running performance, the stride length and frequency are
54
55 82 directly related with power strength and neural co-ordination. Nonetheless, the recovery
56
57 83 between sets affects the PCr resynthesis, muscle buffering and aerobic fitness ⁴.
58
59 84 Previous studies have concluded as moderate and severe hypoxia causes an increase in
60
61 85 the use of glycogen as an energy source, not only at rest but also during moderate and
62
63 86 maximal exercise, when comparing to normoxia (3). Under such conditions, the
64
65 87 anaerobic pathway would be the main mechanism to provide the necessary additional

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

88 energy. At muscle level, anaerobic capacity could be improved through an increase in
89 the muscle buffering capacity and glycolytic enzyme activity (6). Indeed, changes in
90 salivary pH after anaerobic exercise in hypoxia have been reported (12,13). As a
91 consequence, it would be reasonable to think that performing a specific CST in hypoxia
92 could be efficient in increasing the specificity of the training stimulus for anaerobic
93 events (3-5) by inducing muscle changes and thus affecting mitochondrial density,
94 capillary-to-fiber ratio and the fiber cross-sectional area (14). Besides these conclusions
95 an equal dose of intensity and volume of training than normoxia is required as a premise
96 to obtain a greater performance after TH-LL (15). In this context, the intensity of
97 anaerobic events and particularly of power strength seems to be maintained in hypoxia
98 in comparison with normoxia (3,5,16). The principal aim of this study was to analyze
99 whether a CST performed at simulated altitude could increase running anaerobic
100 capacity to a greater extent than the same training protocol performed in normoxia.

101 **2. Methods**

102 **2.1. Study design**

103 This study employed a crossover design. Subjects (n = 12) were randomly assigned to
104 two groups balanced for best on 400m performance in the previous year. Once placed in
105 the groups, subjects then performed a CST program with two testing phases before and
106 after the CST (HYP and NOR) testing the repeated interval running. The main purpose
107 was to compare the number of sets performed before vs. after (Figure 1).

109 **2.2. Subjects**

110 Twelve male elite 400-m athletes, voluntarily agreed to participate in the study. None of
111 the subjects were acclimatized or recently exposed to altitude. Although subjects were
112 well-trained athletes with a minimum of six years of training, any of the subjects could
113 have been considered world-class athletes. Before their participation, all subjects were
114 informed of the procedures, risks and expected benefits, and signed an informed consent
115 form. The protocol was in accordance with the Declaration of Helsinki and was
116 approved by the Bioethical Committee of the University of Barcelona (Institutional
117 Review Board IRB0003099). Subjects were randomly assigned to two balanced groups
118 according to the best 400-m performance during the preceding season: hypoxia group
119 (HYP), and a control group (NOR) (Table 1).

121 **2.3. Training and testing**

122 The subjects received dietary advice only on the testing day. A standard high-
123 carbohydrate lunch was consumed three hours before the start of the test and the only
124 drink permitted was water (*ad libitum*). Subjects wore similar clothes on the testing
125 days.

127 **2.4. Whole blood measurements**

128 One day before and three days after treatment, blood was withdrawn by venipuncture
129 from a forearm vein, collected in heparinized tubes and analyzed with a Celltac Alpha
130 automated hematological counter (MEK-1640, Nihon-Kohden, Japan) (Table 2).

132 **2.5. Exercise performance test**

133 The performance tests were carried out at sea level conditions. Each test consisted of
134 two separate phases (before and after CST). On the first day, subjects performed a 300-
135 m "all-out" test on a track. According to the individual 300-m "all-out" test results for
136 each subject, the set time corresponding to 90% was calculated. A three-minute
137 recovery time was fixed between consecutive sets. The end of the test occurred when
138 the subject was not able to maintain the time required (90% of 300-m "all-out" test) or
139 when he voluntarily stopped due to exhaustion (Figure 1). In such cases, the previous
140 completed set was considered to be the last valid record. Capillary blood samples were
141 obtained immediately after each completed set to assess the lactate concentration (LA)
142 (Lactate Pro LT-1710, Arkray, Kyoto, Japan). At the same time, heart rate before
143 (HRR) and immediately after (HRM) each set was measured using a cardiometer
144 (Polar RS810, Polar Electro Oy, Kempele, Finland). Tests were conducted on a 400-m
145 synthetic track (Mondo). The local environmental variables of temperature (°C),
146 humidity (%) and atmospheric pressure (mmHg) were controlled and validated (Table
147 3). Wind velocity was measured with a Speedwatch wind gauge (JDC Electronic SA,
148 Yverdon-les-Bains, Switzerland) over the four days. All tests were performed under a
149 wind speed lower than 2 m/s. During the test, participants could drink water *ad libitum*.
150 The same procedure was applied for tests before and after the training program.

152 **2.6. Strength training protocol**

153 Twelve subjects participated in a specifically designed circuit strength training (CST)
154 program over a four-week period, consisting of three weekly sessions and a total of 27

155 hours of training (Table 4). All exercises prescribed were commonly used by
156 participants as part of their regular training and a familiarization process was not
157 required. During the training protocol, subjects did not perform any other
158 complementary or specific running training. Both control and experimental groups
159 performed the same training with equal volume and relative intensity. Exercise sessions
160 were based on a circuit strength training model in accordance with previous studies (11).
161 The strength training model was characterized by light load and high speed, and always
162 consisted of dynamic movements involving a large amount of muscle mass. In addition
163 to gravitational body weight resistance, different accessories such as free weights,
164 elastic bands, specific running machines and ankle weights were used. It is important to
165 note that a prior aim of the training was to perform all exercises as “all-out” as possible,
166 with dynamic and explosive movement, but without reaching muscular failure (as is
167 common in hypertrophy training). Consequently, and due to the impossibility of
168 accurately grading the individual workload, it was adjusted in accordance with the
169 abovementioned premise and verbally controlled. The progression of the load intensity
170 during the training was carried out by increasing the resistance of weights or elastic
171 bands and altering the work/rest ratio. During the CST sessions, the heart rate average
172 (HR_{avg}) was registered in order to assess the relative intensity and the effects of hypoxia
173 on the cardiovascular system.

174

175 **2.7. Hypoxic treatment**

176 A hypobaric chamber (CH-Ex1, Moelco, Spain) was used to simulate altitude
177 conditions. The simulated altitude during the training protocol was 3000 m above sea
178 level (700 hPa; 10.15 PSI). Temperature inside the chamber was maintained at 24° in
179 average and crushed buckets were used to cool subjects.

180

181 **2.8. Statistical analysis**

182 Descriptive statistics were used to calculate the mean value and standard deviation (SD)
183 for all the variables tested. The software used for statistical analysis and plotting the
184 graphs was Sigmaplot 11.0 (Systat Software Inc., San Jose, CA, USA). To determine
185 the influence of the CST program and hypobaric hypoxia on anaerobic capacity and
186 running performance at sea level (number of interval sets), a two-way RM-ANOVA
187 procedure was applied (training group x sets number). To determine the differences
188 before and after CST on the measured parameters (LA and hematology), a *t*-test for

189 paired samples was applied (time (pre - post). Also, a one-way RM-ANOVA was
190 applied to compare the HR_{avg} during the CST in both conditions (training group). Null
191 hypothesis was reflected at $P \leq 0.05$.

193 3. Results

194 3.1. Effects on performance

195 The results of the 300-m running tests for both groups are presented in Table 5. The
196 post-treatment improvement in the mean number of sets in the hypoxic group can be
197 observed (Figure 2). After the CST protocol training, the total number of sets at 90% of
198 the 300-m "all-out" test increased by 33.3% in NOR (3.66 ± 1.2 to 4.66 ± 1.3) and 53.8%
199 in HYP (4.33 ± 1 to 6.66 ± 1.9). However, numerically, there was one set more for NOR
200 and 2.3 ± 0.8 for HYP. A paired Student's *t*-test (before vs. after) showed statistically
201 significant differences for the HYP group ($p = 0.01$), but not for the NOR group ($p =$
202 0.25). Training in hypoxia caused a significant ($p < 0.05$) increase when comparing
203 post-training performance between HYP and NOR ($p = 0.03$; ANOVA). The 300-m
204 "all-out" test improved, but was not statistically significant, after the CST training
205 protocol in both groups; the NOR group (39.8 ± 0.4 to 39.4 ± 0.5 seconds) and the HYP
206 group (39.9 ± 0.6 to 39.2 ± 0.8).

208 3.2. Effects on physiological parameters

209 Regarding the hematological parameters, no significant differences were found when
210 comparing the pre- and post-training status in HYP or in NOR ($p > 0.05$) (Table 2).
211 Hemoglobin and hematocrit values increased in the range of 1.5 to 2.9 % (HYP) and 2.3
212 to 2.5% (NOR). This was remarkable, as the RBC count increased noticeably in the
213 HYP group (13%) as compared to NOR (2.1%).

214 At the end of the RIR test, the HYP group reached a higher blood lactate peak value
215 (end of the last valid set; $+1.1$ mmol/l; $+8.1\%$; $p < 0.05$) when compared to the control
216 group (Table 5 and Figure 2). After the CST training, the measurement of the HR_{max}
217 during the last set of the short-interval test showed a different tendency between the
218 groups. While the mean maximal heart rate of the NOR group increased (5 beats), the
219 HYP group showed a slight decrease in the maximal heart rate (1.6 beats). Groups
220 showed a different, although non-significant, trend in the heart rate recovery after the
221 training protocol (Table 6). The HYP group trained at a greater relative intensity than
222 the NOR group (theoretical HR_{max} mean: 79.1% for HYP and 74.1% for NOR) (Tanaka

223 H, 2001). The HR_{avg} was statistically higher in HYP ($p<0.01$) in comparison to NOR
224 (Figure 3).

225

226 **4. Discussion**

227 The primary new finding of this study was that a CST program performed in HYP
228 compared to NOR further enhances the capacity to repeat interval training to exhaustion
229 (at an established distance of 300 m at 90% of the individual or personal best
230 performance previously tested). However, the 300-m "all-out" performance (before vs.
231 after) had not significant differences comparing groups (HYP vs. NOR). Additionally,
232 in comparison with the NOR group, the HYP group also reached greater blood lactate
233 values at the end of the repeated interval test until exhaustion (before vs. after CST:
234 NOR 16.8% vs. HYP 24.9%). Furthermore, during training in HYP subjects reached a
235 higher HR_{avg} than the NOR group (HYP 152.6 ± 6.2 vs. NOR 144.4 ± 5.1) ($p<0.01$).
236 However, the maximal heart rate finishing the RIR test and the immediate recovery
237 were similar. Finally, seven days after the CST, the hematologic response were not
238 significantly modified either when comparing the HYP group to the NOR group, nor
239 between pre-values. When considering the worthwhile effects, the performance
240 enhancement found in the HYP group may be likely to be beneficial for well-trained
241 athletes whose performance depends primarily on anaerobic metabolism.

242 Overall, the clear effects of strength training in hypoxia on anaerobic performance were
243 somewhat greater than reported in similar studies (3-5,17). We suggest that "strength
244 high - living low" model provide a more effective stimulus than equivalent training in
245 normoxia. The observed physiological changes following CST in HYP group provide
246 several plausible mechanisms for the performance enhancement, as demonstrated by
247 large effect-size statistical differences ($p<0.05$) for the RIR. In addition, larger objective
248 changes as a greater tolerance to lactate would have to be observed for us to be
249 confident that a real change had occurred in the performance of the athletes. Previously,
250 other investigations have concluded as changes in buffer and anaerobic capacity may be
251 greater after to the hypoxia stimulus (18,19). The substantial enhancement in RIR (HYP
252 group) in this study could be likely to have resulted from an improvement in both
253 metabolic and neuromuscular characteristics. This observation reveals that the increase
254 in buffer capacity might be the result of both hypoxia and higher lactate and H^+ ions
255 concentration during exercise, since blood lactate accumulation was higher in hypoxic

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
256 than in normoxic conditions (6,18). As it is the case, our data showed as post-
257 intervention, both groups were able to maintain higher levels of blood lactate during the
258 RIR. Thus, showing a greater capacity of tolerance to acidosis and clearance of H⁺ions
259 (HYP: +24.9% whilst +16.8% for NOR) (Table 2 and Figure 2). Both responses would
260 be important for pH regulation. Changes in acid–base status have been proposed as a
261 potential mechanism to improve performance after altitude exposure (20). In this
262 context, a higher amount of lactate concentration during RIR test could indicate more
263 carbohydrates burned (6,21). A possible justification could be related to the lactate
264 shuttle that allows carbohydrates to be transferred from one muscle group to another
265 while the muscles are exercising. For this hypothesis, Ahlborg et al (22) found that
266 whole-body carbohydrate stores could be redistributed from glycogen-replete areas to
267 glycogen-depleted areas during and especially after the exercise. On the other hand, an
268 increase of the muscle mRNA concentration of MCT1 (monocarboxylate transporter 1)
269 after hypoxic training has been previously reported (23). The MCT1 improves lactate
270 exchange and removal, which may lead to a slower decline in pH at a given running
271 velocity, thereby allowing athletes to run for longer. Moreover, Faiss et al (3) suggested
272 that increases in the MCT1 mRNA would probably induce changes from aerobic to
273 anaerobic glycolytic activity in the muscle. These changes could provide information
274 about changes in the anaerobic reserve during hard running phases instead of a possible
275 increase during the short recovery phase due to the aerobic metabolism contribution to
276 the resynthesis of phosphocreatine and the oxidation of the lactic acid (24). These
277 responses, which result from spillover of the increased sympathetic nerve activation,
278 have been reported to take place under hypoxic conditions (25). Under this premise, the
279 elevated heart rate and lactate levels could reflect at least some of the adjustments to
280 heavy exercise in hypoxia that allow VO₂ to ultimately reach a similar level as during
281 exercise in normoxia (25).

48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
282 Other possible mechanism for the improvement of endurance performance have been
283 recently describe for Bowtell et al. (5). For this author the ventilatory and heart rate
284 parameters were significantly higher during an anaerobic exercise in hypoxia. The
285 increased physiological load was associated with supplying oxygen to the exercising
286 muscle with lowered oxygen availability. These response may be related with a
287 improving in the running economy. In our study, the HR_{avg} during CST was
288 significantly higher in HYP. Since the maximum heart rate remains almost unchanged

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

289 (pre vs. post) in both groups, the improvement in the oxygen delivery to the exercising
290 muscles during the repeated interval test could be attributed to an increase in the stroke
291 volume through a higher left-ventricular contractile force and/or through an increase in
292 cardiac filling pressure, which raises end-diastolic volume and resultant stroke volume.

293 Some evidence exists for a hypoxia-induced change in metabolism. The immediate
294 effect of mitochondrial density is a higher capacity to produce ATP by increasing work
295 at a higher (ATP):(ADP)(Pi) ratio. Assuming that the higher levels of lactate
296 accumulated in the last set of the RIR are related to the increase in carbohydrates
297 burned, the suggested responses at mitochondrial level could be accepted. Indeed,
298 training under hypoxic conditions has been reported to increase blood lactate levels
299 probably as a result of a shift in carbohydrate utilization (21). Previous investigations
300 have described as high-intensity hypoxic training helps to improve the anaerobic energy
301 supply systems (3,4,26). According with our results, only the HYP group increased two
302 sets in comparison with pre-values of RIR test (Figure 2). The observed differences in
303 running performance could be due to changes induced at muscle level that correspond to
304 improvements of the running economy and neuromuscular coordination (27).

305 While the data of this study indicate improvements for anaerobic performance, it has
306 been suggested that performance improvement is not likely to occur when hypoxic
307 training sessions are inadequate in terms of duration or intensity (9). It may well be that
308 the 90 min of CST performed daily in this study (12 sessions) was sufficient in duration
309 and intensity. According with Tanaka et al (28), the HYP group trained over a relative
310 maximum heart rate of 5% higher in comparison with NOR group (79.1% vs. 74.2%).
311 Few studies have examined the effect of altitude training on the maintained power
312 output during consecutive sets. Brosnan et al. (29) found a decreased by 5-6% under
313 hypoxic conditions with shorter repeat sprint (10 x 6s with 30s recovery) work-to-relief
314 ratios (1:2 or 1:1). However, with an equal protocol, Bowtell et al. (5) only found
315 exacerbated fatigue associated at greater FIO₂ to 13%. In the present study work-to-
316 relief ratios were 1:1.5 and 1:4 for the last week. For this reason, hypoxia may have
317 accentuated the effect of multiple sets of the CST in a cumulative fashion increasing the
318 relative intensity of training. In a previous pilot study (observation unpublished), we
319 assessed that both maximal and mean power output were maintained during a repeated
320 interval bouts of jumps at 4000m and 2500m in comparison with 550m. Strengthening
321 our hypothesis, some authors have shown that hypoxic conditions do not initially affect

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

322 anaerobic performance (6,26,30). On the contrary, difficulty maintaining an equal
323 intensity of training during aerobic exercises compared to an equivalent exercise at sea
324 level was reported (2).

325 Finally, changes in the blood parameters in this study were similar to previous IHT
326 (31,32) and would tend to support non-enhanced erythropoiesis after IHT (see Table 4).
327 Perhaps this is not surprising given the short duration of the hypoxic stimulus and the
328 lower altitude of exposure. Moreover, it has been reported increased aerobic and
329 anaerobic performance after intermittent hypoxic training without hematological
330 changes (14,18,20,33). The variability could be due to the widespread individual
331 variability in the physiological responses to hypoxia and the vast variation in the
332 different methods of exposure, altitude and volume/intensity of training (34).

333 **5. Practical applications**

334 The observed increases in lactate accumulation and RIR, which would be unaffected by
335 any potential placebo effect, provide evidence that a CST in intermittent hypoxia
336 produced some kind of physiological adaptation. However, the lack of more invasive
337 physiological measures (muscle biopsies for example) could be a potential limitation to
338 the study design.

339 **6. Conclusions**

340 According to our results, anaerobic performance measured through a RIR until
341 exhaustion over a 300-m distance (at 90% of individual performance) could be
342 improved by including a CST cycle in hypobaric conditions. The summary concept
343 would be described as "strength training HIGH and specific running LOW". A
344 performance comparison after CST in HYP vs NOR groups revealed that the HYP
345 group reached higher lactate values due to the performance of a greater number of
346 repeated interval sets. The observed improvement could be possibly due to the good
347 response in the behavior of the oxygen-independent glycolysis pathway. The
348 hematologic measurements after the CST showed a similar trend, which would rule out
349 *a priori* any improvement-related hematology. CST performed in hypoxia could be a
350 valid method of providing a greater stimulus to the anaerobic pathway equivalent to the
351 specific strength training related to muscle property performance. However, this result

352 was unclear and should be considered preliminary until further research has been
353 completed.

354 **7. Disclosure of interest**

355 The authors have no conflicts of interest or financial ties to disclose.

356

357 **8. Acknowledgments**

358 The authors gratefully acknowledge Esther Rodriguez, Dr. Juan Silva, Aritz
359 Urdampilleta, Debora Coimbra and athletes participants in study for their help in
360 performing this study and Dr. Casimiro Javierre for her skillful laboratory help.

361 **9. References**

362 (1) Hendriksen IJ, Meeuwssen T. The effect of intermittent training in hypobaric hypoxia
363 on sea-level exercise: a cross-over study in humans. *Eur J Appl Physiol* 2003 Jan;88(4-
364 5):396-403.

365 (2) Levine BD. Intermittent hypoxic training: fact and fancy. *High Alt Med Biol* 2002
366 Summer;3(2):177-193.

367 (3) Faiss R, Leger B, Vesin JM, Fournier PE, Eggel Y, Deriaz O, et al. Significant
368 molecular and systemic adaptations after repeated sprint training in hypoxia. *PLoS One*
369 2013;8(2):e56522.

370 (4) Álvarez-Herms J, Julià-Sánchez S, Corbi F, Pagès T, Viscor G. Anaerobic
371 performance after endurance strength training in hypobaric environment. *Science and*
372 *Sports* 2013;"to be published".

373 (5) Bowtell JL, Cooke K, Turner R, Mileva KN, Sumners DP. Acute physiological and
374 performance responses to repeated sprints in varying degrees of hypoxia. *J Sci Med*
375 *Sport* 2013 Jun 25.

376 (6) Hamlin MJ, Marshall HC, Hellemans J, Ainslie PN, Anglem N. Effect of
377 intermittent hypoxic training on 20 km time trial and 30 s anaerobic performance. *Scand*
378 *J Med Sci Sports* 2010 Aug;20(4):651-661.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

379 (7) Truijens MJ, Toussaint HM, Dow J, Levine BD. Effect of high-intensity hypoxic
380 training on sea-level swimming performances. *J Appl Physiol* 2003 Feb;94(2):733-743.

381 (8) Morton JP, Cable NT. Effects of intermittent hypoxic training on aerobic and
382 anaerobic performance. *Ergonomics* 2005 Sep 15-Nov 15;48(11-14):1535-1546.

383 (9) Rusko HK, Tikkanen HO, Peltonen JE. Altitude and endurance training. *J Sports Sci*
384 2004 Oct;22(10):928-44; discussion 945.

385 (10) Faiss R, Leger B, Vesin JM, Fournier PE, Eggel Y, Deriaz O, et al. Significant
386 molecular and systemic adaptations after repeated sprint training in hypoxia. *PLoS One*
387 2013;8(2):e56522.

388 (11) Adamson G. Circuit training. *Ergonomics* 1959;2(2):183-186.

389 (12) Julià-Sánchez S, Álvarez-Herms J, Urdampilleta A, Corbi F, Pagès T, Viscor G.
390 Efecto del ejercicio anaeróbico láctico sobre el pH salival. *Apunts.Medicina de l'Esport*
391 2013;48(179):83-88.

392 (13) Julià-Sánchez S, Álvarez-Herms J, Gatterer H, Burtscher M, Pagès T, Viscor G.
393 Salivary pH increases after jump exercises in hypoxia. *Sci Sports* ;"to be published".

394 (14) Vogt M, Puntschart A, Geiser J, Zuleger C, Billeter R, Hoppeler H. Molecular
395 adaptations in human skeletal muscle to endurance training under simulated hypoxic
396 conditions. *J Appl Physiol* 2001 Jul;91(1):173-182.

397 (15) Powell FL, Garcia N. Physiological effects of intermittent hypoxia. *High Alt Med*
398 *Biol* 2000 Summer;1(2):125-136.

399 (16) Friedmann B, Frese F, Menold E, Bartsch P. Effects of acute moderate hypoxia on
400 anaerobic capacity in endurance-trained runners. *Eur J Appl Physiol* 2007
401 Sep;101(1):67-73.

402 (17) Álvarez-Herms J, Julià-Sánchez S, Corbi F, Pagès T, Viscor G. Changes in heart
403 rate recovery index after a programme of strength/endurance training in hypoxia. *Apunts*
404 *Med Esport* 2012 January 2012;47(173):23-29.

405 (18) Nummela A, Rusko H. Acclimatization to altitude and normoxic training improve
406 400-m running performance at sea level. *J Sports Sci* 2000 Jun;18(6):411-419.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

407 (19) Karvonen J, Peltola E, Saarela J, Nieminen MM. Changes in running speed, blood
408 lactic acid concentration and hormone balance during sprint training performed at an
409 altitude of 1860 metres. *J Sports Med Phys Fitness* 1990 Jun;30(2):122-126.

410 (20) Gore CJ, Clark SA, Saunders PU. Nonhematological mechanisms of improved sea-
411 level performance after hypoxic exposure. *Med Sci Sports Exerc* 2007 Sep;39(9):1600-
412 1609.

413 (21) Katayama K, Goto K, Ishida K, Ogita F. Substrate utilization during exercise and
414 recovery at moderate altitude. *Metabolism* 2010 Jul;59(7):959-966.

415 (22) Ahlborg G, Wahren J, Felig P. Splanchnic and peripheral glucose and lactate
416 metabolism during and after prolonged arm exercise. *J Clin Invest* 1986 Mar;77(3):690-
417 699.

418 (23) Zoll J, Ponsot E, Dufour S, Doutreleau S, Ventura-Clapier R, Vogt M, et al.
419 Exercise training in normobaric hypoxia in endurance runners. III. Muscular
420 adjustments of selected gene transcripts. *J Appl Physiol* 2006 Apr;100(4):1258-1266.

421 (24) Laursen PB, Jenkins DG. The scientific basis for high-intensity interval training:
422 optimising training programmes and maximising performance in highly trained
423 endurance athletes. *Sports Med* 2002;32(1):53-73.

424 (25) Engelen M, Porszasz J, Riley M, Wasserman K, Maehara K, Barstow TJ. Effects of
425 hypoxic hypoxia on O₂ uptake and heart rate kinetics during heavy exercise. *J Appl*
426 *Physiol* 1996 Dec;81(6):2500-2508.

427 (26) Hendriksen IJ, Meeuwsen T. The effect of intermittent training in hypobaric
428 hypoxia on sea-level exercise: a cross-over study in humans. *Eur J Appl Physiol* 2003
429 Jan;88(4-5):396-403.

430 (27) Millet GP, Jaouen B, Borrani F, Candau R. Effects of concurrent endurance and
431 strength training on running economy and .VO₂ kinetics. *Med Sci Sports Exerc* 2002
432 Aug;34(8):1351-1359.

433 (28) Tanaka H, Monahan KD, Seals DR. Age-predicted maximal heart rate revisited. *J*
434 *Am Coll Cardiol* 2001;37(1):153-156.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

435 (29) Brosnan MJ, Martin DT, Hahn AG, Gore CJ, Hawley JA. Impaired interval
436 exercise responses in elite female cyclists at moderate simulated altitude. *J Appl Physiol*
437 2000 Nov;89(5):1819-1824.

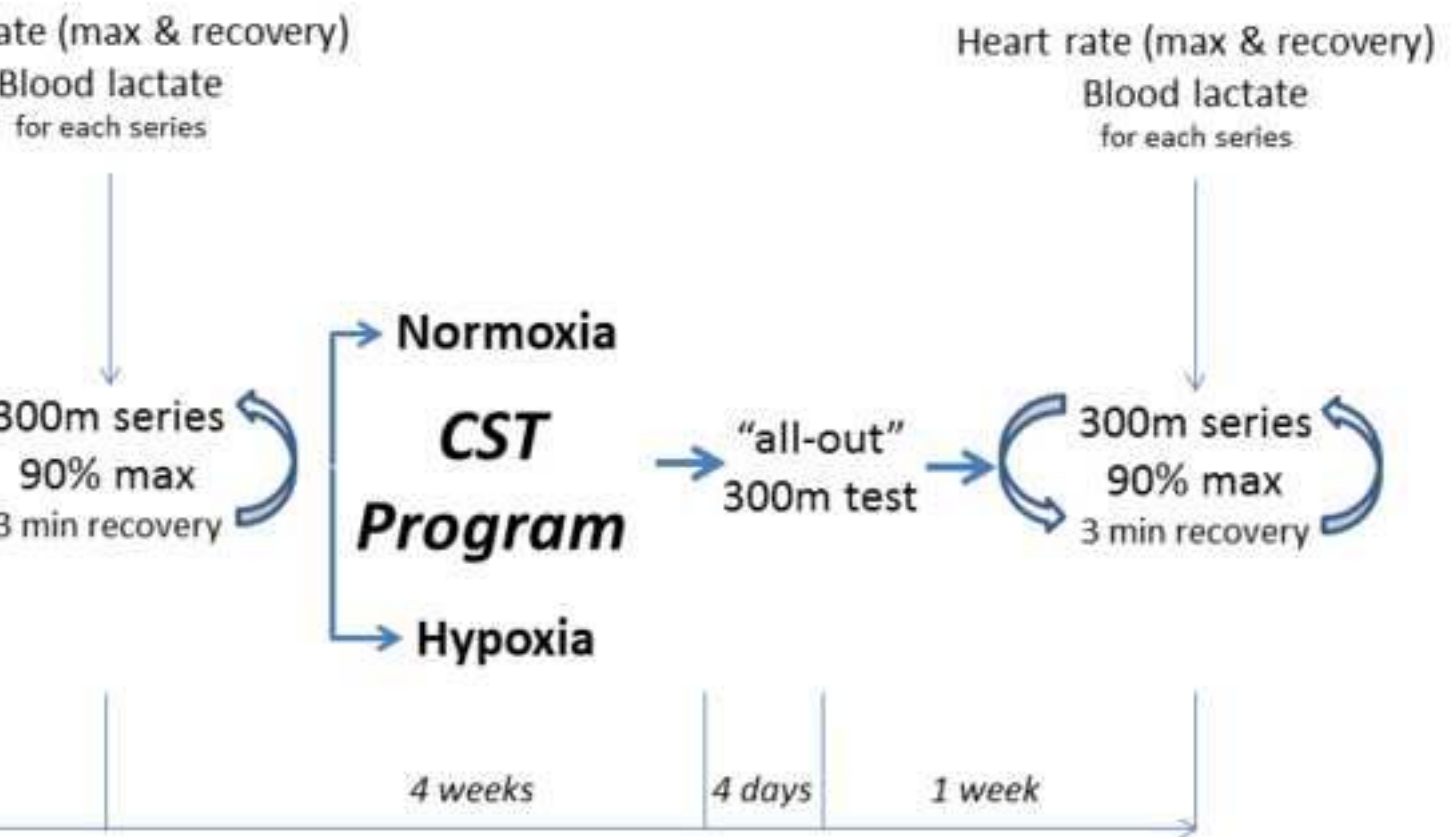
438 (30) Meeuwsen T, Hendriksen IJ, Holewijn M. Training-induced increases in sea-level
439 performance are enhanced by acute intermittent hypobaric hypoxia. *Eur J Appl Physiol*
440 2001 Apr;84(4):283-290.

441 (31) Roels B, Millet GP, Marcoux CJ, Coste O, Bentley DJ, Candau RB. Effects of
442 hypoxic interval training on cycling performance. *Med Sci Sports Exerc* 2005
443 Jan;37(1):138-146.

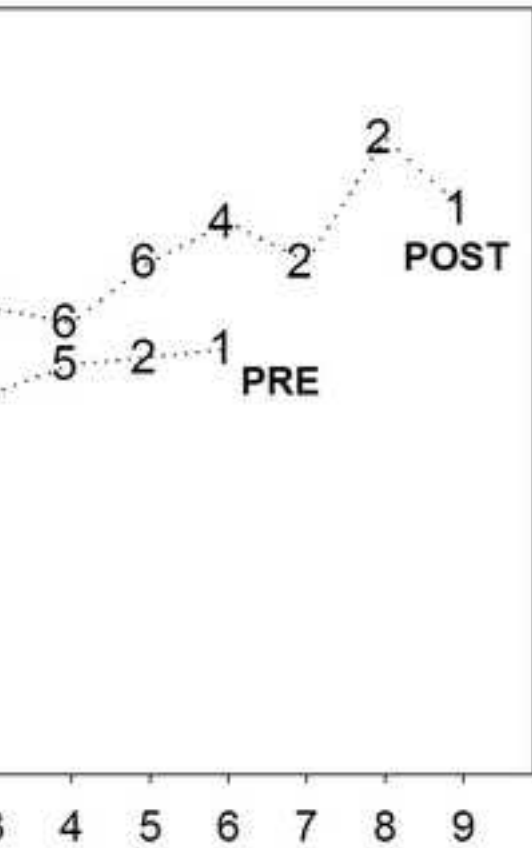
444 (32) Czuba M, Waskiewicz Z, Zajac A, Poprzecki S, Cholewa J, Rocznik R. The
445 effects of intermittent hypoxic training on aerobic capacity and endurance performance
446 in cyclists. *Journal of Sports Science and Medicine* 2011;10:175-183.

447 (33) Gore CJ, Hahn AG, Aughey RJ, Martin DT, Ashenden MJ, Clark SA, et al. Live
448 high:train low increases muscle buffer capacity and submaximal cycling efficiency.
449 *Acta Physiol Scand* 2001 Nov;173(3):275-286.

450 (34) Ge R, Witkowski S, Zhang Y, Alfrey C, Sivieri M, Karlsen T, et al. Determinants
451 of erythropoietin release in response to short-term hypobaric hypoxia. *J Appl Physiol*
452 2002;92(6):2361-2367.

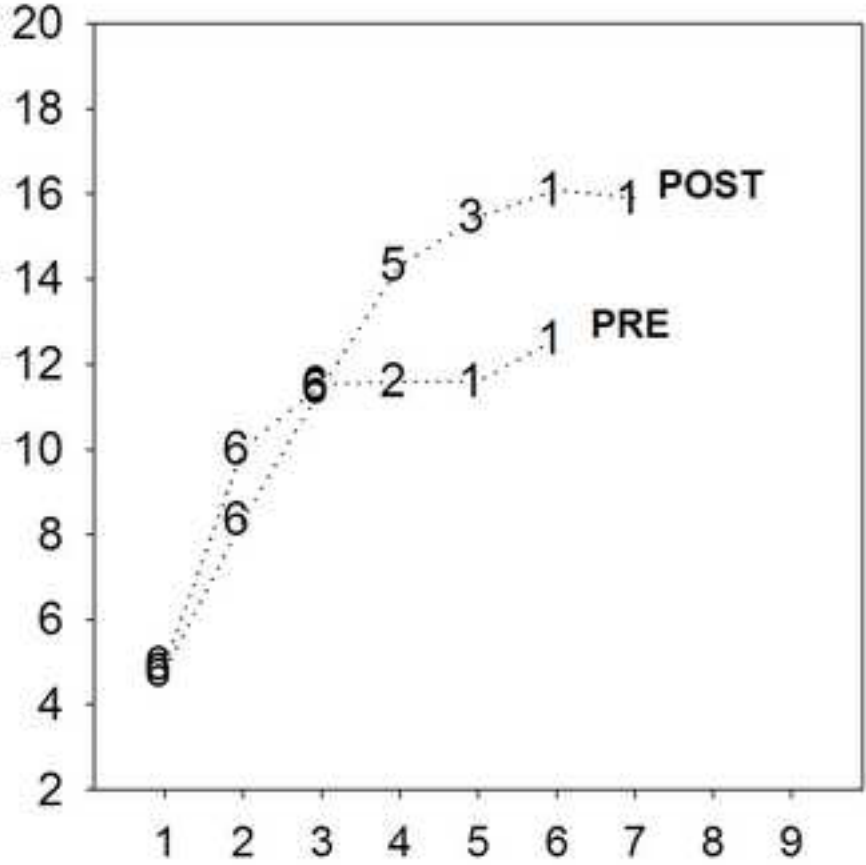


HYPOXIA



Completed laps

NORMOXIA



Completed laps

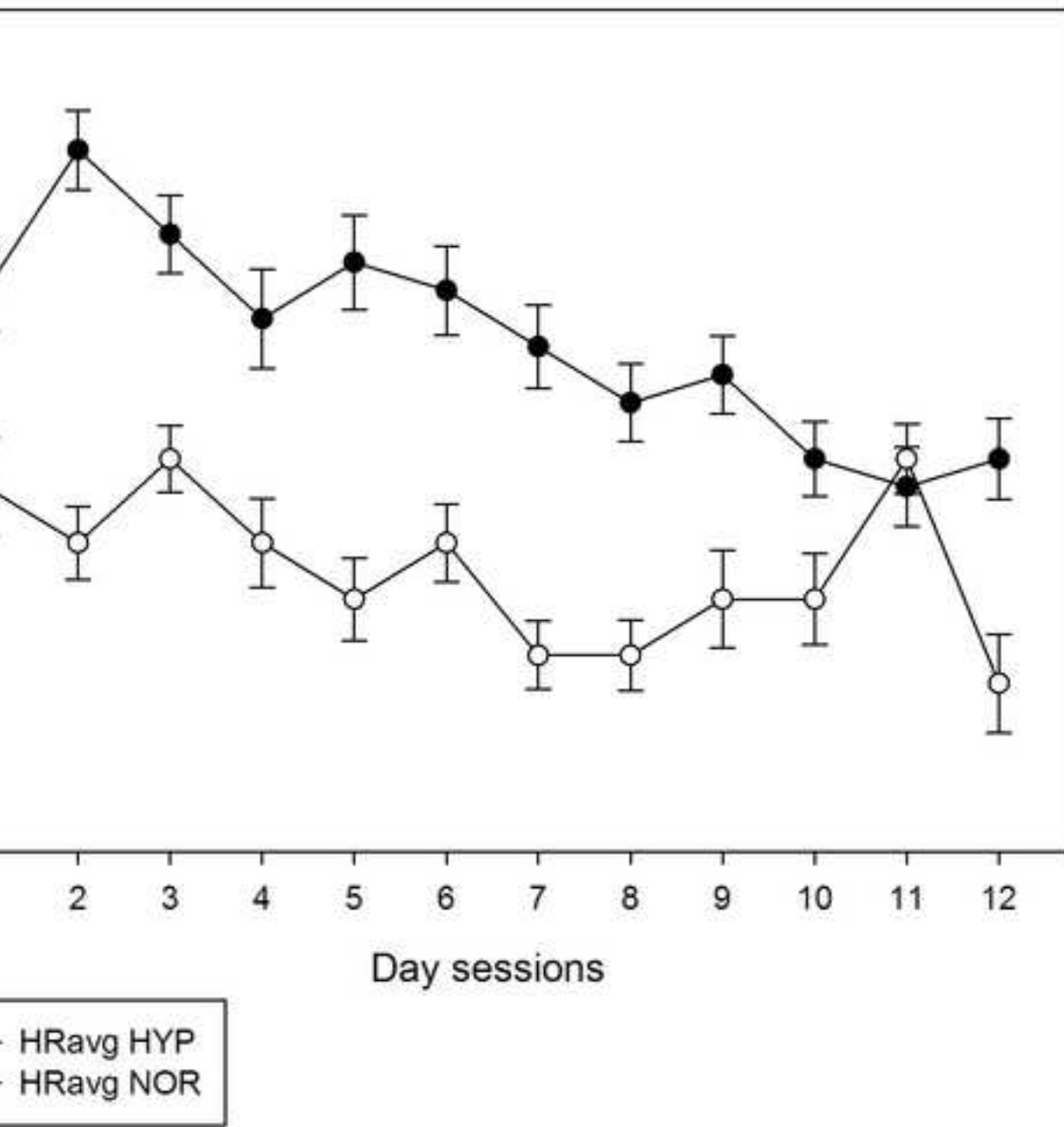


Table 1. Characteristics and baseline measures of the subjects. Variables measured: years (yrs), Height, centimeters (cm), Body mass, kilograms (kg), 400m personal best (pb), seconds (sc).

Characteristics	Mean (\pm SD)
Age (yrs) n = 12	22 \pm 4.7
Height (cm) n = 12	171.5 \pm 4.4
Body mass (kg) n= 12	60.1 \pm 5.2
HYP group	
Age (yrs) n = 6	22.5 \pm 5.5
Height (cm) n = 6	171.6 \pm 5.2
Body mass (kg) n= 6	59.8 \pm 6.1
NOR group	
Age (yrs) n = 6	20.5 \pm 0.7
Height (cm) n = 6	171 \pm 1.4
Body mass (kg) n= 6	61 \pm 1.4
400m (sc)	51.1 \pm 1.27

Table 2

Table 2. Blood parameters pre and post treatment in both environmental conditions. HGB (g/dL); HCT (%); RBC (mill/mm³); MCV (fl); MCH (pg/cell); MCHC (Hb/cell); WBC (); Dif (difference) (%). ^aBased on a smallest substantial change of 1% for and 0.2 of the baseline between-subject standard deviation for all other measures. ^b±90%CL: add and subtract this number to the difference to obtain the 90% confidence limits for the true difference. *t*-student significance is *p*<0.05 *.

	HYPOXIA				NORMOXIA			
	PRE	POST	Dif (%); ± 90% CL ^b	<i>t</i> -student (<i>p</i> <0.05)	PRE	POST	Dif (%); ± 90% CL ^b	<i>t</i> -student (<i>p</i> <0.05)
HGB	12.9 ± 0.7	13.1 ± 0.6	1.5 ± 0.6	0.07	13 ± 0.6	13.3 ± 0.6	2.3 ± 0.4	0.21
HCT	40.2 ± 2.3	41.4 ± 1.5	2.9 ± 0.8	0.07	40.1 ± 2.3	41.1 ± 1	2.5 ± 1.1	0.1
RBC	4.6 ± 0.4	5.2 ± 1.2	13 ± 0.5	0.12	4.6 ± 0.4	4.7 ± 0.3	2.1 ± 0.2	0.29
MCV	86.7 ± 4.8	86.9 ± 3.4	0.2 ± 2.7	0.41	87.7 ± 5.6	87.5 ± 4.6	- 0.3 ± 3.4	0.48
MCH	27.8 ± 1.7	27.7 ± 1.3	- 0.4 ± 1	0.43	27.9 ± 1.9	28.8 ± 1.8	3.2 ± 1.2	0.18
MHGC	32 ± 0.6	32 ± 0.5	= ± 0.4	0.44	31.8 ± 1.5	32.5 ± 0.8	2.2 ± 0.7	0.17
WBC	6.9 ± 2.2	7.7 ± 2	11.6 ± 1.4	0.23	8.2 ± 2	7.4 ± 1	- 9.8 ± 1	0.21

Table 3. Weather parameters recorded at the Barcelona-Zona Universitària meteorological station (X8 code). Altitude: 79 m above sea level. Variables measured: wind velocity (m/s), temperature (°C), relative humidity (%), atmospheric pressure (hPa) and precipitation (mm).

Test	Temperature (°C)	Humidity (%)	Air Pressure (mmHg)	Wind (m/s)	Date
300-m "all-out" pre-training	16.1	64	1015	0.8	05/01/12
Sets at 90% pre-training	18	61	1019	0.6	05/07/12
300-m "all-out" post-training	20.9	71	1015	0.1	06/04/12
Sets at 90% post-training	21.8	56	1012	1	06/07/12

Table 4. Model of the CST performed.

	Week 1	Week 2	Week 3	Week 4
Work/ratio time (seconds)	60/90	60/75	120/150	45/180
Sets per exercise and session	4-4-5	5-3-5	3-5-3	4-5-4
Exercises per session	9-9-9	9-12-9	12-9-12	12-9-12
Intensity	The progression of load intensity during the training was performed by increasing the resistance of weights or elastic bands and altering the work/rest ratio.			
Volume	The duration of the sessions was from 80 to 120 minutes (Including warming-up).			
Exercises	The "soldier" (full squat + 1 push-up + stand up), skipping with dumbbells and ankle weights, "scarecrow" (hip and shoulder abductions and flexions while jumping), power cleans and snatches, jumping splits and one-quarter squat-jumps, rope skipping and jumping + straight-knee jumps with metatarsus contact, holding dumbbells, split-jumps, plyometric exercises (mainly horizontal jumps).			

Table 5. Total number of sets completed and maximum blood lactate levels in each group of athletes. Data are also expressed as per cent increase (before versus after). Values given are mean \pm SD. *ns* (not statistically significance). * Statistically significant ($p < 0.05$).

	NORMOXIA		HYPOXIA	
	PRE	POST	PRE	POST
300-m test	39.8 \pm 0.4	39.4 \pm 0.5	39.9 \pm 0.6	39.2 \pm 0.8
Total sets by group	21	28	26	40
Mean individual sets	3.6 \pm 1.2	4.6 \pm 1.3	4.3 \pm 1	6.6 \pm 1.9
Pre-post increase (%)		33.3		53.8
Peak lactate	12.5 \pm 0.9	14.6 \pm 1.6	11.8 \pm 1	15.7 \pm 1.3
Pre-post increase (%)		16.8		24.9
<hr/>				
Number of sets NOR & HYP Post training $p < 0.05$		>0.05		0.03*
Before and after number of sets at 90% $p < 0.05$		0.251 <i>ns</i>		0.01 *

Table 6. Mean heart rate parameters measured in pre- and post-training protocol in the last set in each subject. Values given are mean \pm SD (standard deviation). HRR (heart rate recovery); MaxHR (maximal heart rate).

	HYPOXIA		NORMOXIA	
	PRE	POST	PRE	POST
Maximal heart rate (b/min)	180.4 \pm 11.8	178.8 \pm 12.5	179.9 \pm 11.1	184 \pm 11.4
Heart rate recovery (b/min)	134.1 \pm 10.4	130.4 \pm 9.6	125.2 \pm 10.7	133.1 \pm 12.7
HRR/MaxHR(%)	74.3 \pm 1.6	73.1 \pm 5.5	69.6 \pm 4.2	72.4 \pm 6.2
Heart rate average (b/min)	152.6 \pm 6.2		144.4 \pm 5.1	
<i>t</i> -test (p value)	0.60		0.32	

Manuscript Number: WEMJ-D-14-00041

Title: Different degrees of acute hypoxia does not influence the maximal anaerobic power capacity

Article Type: Brief Report

Keywords: intermittent hypoxia training, anaerobic capacity, strength power, arterial saturation of oxygen, normobaric hypoxia

Corresponding Author: Prof. Jesús Álvarez-Herms, Msc., Bsc.

Corresponding Author's Institution: Facultat de Biologia. Universitat de Barcelona

First Author: Jesús Álvarez-Herms, Msc., Bsc.

Order of Authors: Jesús Álvarez-Herms, Msc., Bsc.; Sonia Julià-Sánchez, Msc.; Hannes Gatterer, Phd.; Gines Viscor, Phd.; Martin Burtscher, Phd., MD.

Abstract: Objective

To determine the effects of different inspired oxygen fractions on the average power capacity during jumping in order to design a hypoxic explosive strength protocol.

Methods

Eight physically subjects (33.62 ± 4.07 yr; height, 1.77 ± 0.05 m; body mass, 74.38 ± 6.86 kg) completed a Bosco jumping protocol consisting of 6x15-s all-out jumping with 3 minutes of recovery in normoxic (N; $FiO_2=21\%$) and 2 hypoxic conditions (MA:16.5% O_2 and HA: 13% O_2). A force platform provided the average and the maximal power output (Watts) generated during consecutive jumps. Additionally, lactate (Lc), creatin kinase (CK), arterial oxygen saturation (SaO_2) and effort-perceptions were measured.

Results

The average power outputs (W) along the sets were similar between N (3187 ± 46) and MA (vs. 3184 ± 15) ($p>0.05$), but slightly greater with HA (3285 ± 43) compared to N, ($p<0.05$). Values of Lc in N (7.5 ± 3.0), MA (7.7 ± 4.0) and HA (7.9 ± 3.0) ($p>0.05$) and CK (24h after) (N (79.4 ± 15.60), MA (85.2 ± 26.7) and HA (84.3 ± 47.2) ($p>0.05$) were similar under the different hypoxic conditions. Only during exercise in hypoxia, a moderate and severe hypoxemia was induced as the sets increased and FiO_2 was lower ($p<0.05$). At the same time, the effort-perceptions reported were higher at HA (8.9 ± 2.1) and MA (8.1 ± 1.4) than N (7.1 ± 1.9) ($p<0.05$).

Conclusions

Jumping power output was not negatively affected by mild and severe hypoxia during an anaerobic exercise test despite to suffer a greater hypoxemia and higher effort-perceptions.

Suggested Reviewers: Francisco Villafuerte PhD.
Professor, Universidad Peruana Cayetano Heredia
francisco.villafuerte@upch.pe
Prof. Villafuerte is a reputed expert in the subject area.

António Alexandre Moreira Ribeiro de Ascensão PhD.
Universidade do Porto (Portugal)
aascensao@fade.up.pt
Prof. Moreira is a reputed expert in the subject area involving altitude.

Opposed Reviewers:



Departament de Fisiologia i Immunologia
Facultat de Biologia

Edifici Ramon Margalef (planta 3-A)
Av. Diagonal, 645
E-08071 Barcelona (Spain)

Tel: +34 93 4021529
Fax: +34 93 4110358
e-mail: gviscor@ub.edu
<http://www.ub.edu/fisiod3>

Ginés Viscor
Catedràtic



Dr. Scott E. McIntosh, MD, MPH
Editor-in-Chief
Wilderness & environmental medicine journal

Dear Dr. McIntosh
We would like to submit the following manuscript for your consideration:

Title: “Different degrees of acute hypoxia does not influence the maximal anaerobic power”.

Authors:

Jesús Álvarez-Herms¹, Sonia Julià-Sánchez¹, Hannes Gatterer², Ginés Viscor¹ and Martin Burtcher²

Affiliations:

¹Departament de Fisiologia i Immunologia, Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona, Av. Diagonal, 645; E-08028 Barcelona (Spain).

²Department of Sports Science. University of Innsbruck. Fürstenweg 185; A-6020 Innsbruck (Austria)

Corresponding author:

Jesús Álvarez-Herms (tel. +34 934021529; fax: +34 934110358; e-mail: jesusalvarez@ub.edu)

We consider this manuscript able to be published as original research article in *Wilderness & environmental medicine journal*.

We look forward for your notices
Thank you in advance by your kind attention

Prof. Jesús Álvarez-Herms

Title:

Different degrees of acute hypoxia does not influence the maximal anaerobic power capacity

Álvarez-Herms J, Julià-Sánchez S, Gatterer H, Viscor G, Burtscher M

Brief running head:

Anaerobic power at different altitudes

Authors name:

Corresponding autor: Jesús Álvarez-Herms. Msc. Departament de Fisiologia i

Inmunologia. Universitat de Barcelona. Avinguda Diagonal 643, 08028 Barcelona

(Spain). Tel.: (34) 93 934 02 10 86. Fax number: 934 112 842. Email:

jesusalvarez@ub.edu

Sonia Julià-Sánchez Msc. Departament de Fisiologia i Inmunologia. Universitat de

Barcelona. Email: soniajulia@ub.edu

Hannes Gatterer PhD, Department of Sport Science. University Innsbruck. Email:

hannes.gatterer@uibk.ac.at

Martin Burtscher Phd MD, Department of Sport Science. University Innsbruck. Email:

martin.burtscher@uibk.ac.at

Ginés Viscor PhD, Departament de Fisiologia i Inmunologia. Universitat de Barcelona.

Email: gviscor@ub.edu .

Funding: no funding

Abstract

Objective

To determine the effects of different inspired oxygen fractions on the average power capacity during jumping in order to design a hypoxic explosive strength protocol.

Methods

Eight physically subjects (33.62 ± 4.07 yr; height, 1.77 ± 0.05 m; body mass, 74.38 ± 6.86 kg) completed a Bosco jumping protocol consisting of 6x15-s all-out jumping with 3 minutes of recovery in normoxic (N; $FiO_2=21\%$) and 2 hypoxic conditions (MA:16.5% O_2 and HA: 13% O_2). A force platform provided the average and the maximal power output (Watts) generated during consecutive jumps. Additionally, lactate (Lc), creatinkinase (CK), arterial oxygen saturation (SaO_2) and effort-perceptions were measured.

Results

The average power outputs (W) along the sets were similar between N (3187 ± 46) and MA (vs. 3184 ± 15) ($p>0.05$), but slightly greater with HA (3285 ± 43) compared to N, ($p<0.05$). Values of Lc in N (7.5 ± 3.0), MA (7.7 ± 4.0) and HA (7.9 ± 3.0) ($p>0.05$) and CK (24h after) (N (79.4 ± 15.60), MA (85.2 ± 26.7) and HA (84.3 ± 47.2) ($p>0.05$) were similar under the different hypoxic conditions. Only during exercise in hypoxia, a moderate and severe hypoxemia was induced as the sets increased and FiO_2 was lower ($p<0.05$). At the same time, the effort-perceptions reported were higher at HA (8.9 ± 2.1) and MA (8.1 ± 1.4) than N (7.1 ± 1.9) ($p<0.05$).

Conclusions

1 Jumping power output was not negatively affected by mild and severe hypoxia during
2 an anaerobic exercise test despite to suffer a greater hypoxemia and higher effort-
3
4 perceptions.
5
6
7
8
9

10
11 Key words: intermittent hypoxia training, anaerobic capacity, strength power, arterial
12 saturation of oxygen, normobaric hypoxia
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

INTRODUCTION

Explosive-strength (ES) training, a common type of strength training used in sport, particularly leads the specific neural adaptations of the muscles. Explosive-strength performance testing has been traditionally used as an indicator of the improved neuromuscular characteristics and anaerobic performance ¹. ES can be determined measuring the power output generated during consecutive jumps according with the well-established Bosco test for anaerobic performance ².

Exercise responses of athletes to hypoxia have been extensively studied, but the way in which hypoxia could be able to improve aerobic or anaerobic performance remains unclear ³. Although exercise in hypoxia has been shown to be associated with a reduction in the maximal oxygen uptake ($VO_2\text{max}$) and the flux through skeletal muscle ⁴, we can admit that activities that have a minimal aerobic component such as anaerobic performances, maximal muscle power (i.e. wingate test or Bosco test) and muscle strength are minimally affected by hypoxia ^{5,6}. Under this premise, it could be speculated that the combination of explosive-strength training with hypoxia, which augments the training stimulus for the anaerobic metabolism ⁴, would lead to greater performance improvement than training in normoxia for sports with greater anaerobic character. Prerequisite, however, would be that during such training regimes (anaerobic training) the same absolute work intensity could be kept when compared to normoxia.

It is generally assumed that hypoxia exacerbates the reduced capacity of oxygen uptake and transport (1-2% low $Vo_2\text{max}$ each 1% decrement of Sao_2 below 95%) leading to a lower aerobic performance. In this regard, Calbet et al ⁵ reported a 7-16% reduction in the aerobic power output during maximal exercises. However, few reports have addressed decreases in maximal power output during anaerobic exercises under hypoxic

1 conditions up to 12% FiO₂ ⁷. In fact, some studies have recently reinforced this idea
2 showing as a program of short-time (i.e. 12 sessions during 4 weeks) in a regimen of
3 repeated-interval training (anaerobic exercise) significantly improved higher the
4 anaerobic performance comparing with the equal sea-level training ^{7,8}.
5
6

7
8
9 The present study sought to investigate whether different inspired FiO₂ modified the
10 capacity of generate power output during jumping exercise in comparison with
11 normoxia. We hypothesized that ES could be maintained in mild and severe hypoxia in
12 comparison with normoxia.
13
14
15
16
17
18
19
20
21

22 **METHODS**

23 *Participants*

24
25
26
27
28 Eight physically active men (age: 33.6 ± 4.1 yr; height: 1.77 ± 0.05 m; body mass: 74.4
29 ± 6.9 kg) participated in the study. They were informed about the aims of the study,
30 possible risks and side effects. The study was carried out in conformity with the ethical
31 standards laid down in the 2008 declaration of Helsinki and was approved by the ethics
32 committee of Bioethics Committee of the University of Innsbruck.
33
34
35
36
37
38
39
40

41 *Experimental Design*

42
43
44 Six series of maximal consecutive countermovement jumping, lasting for 15 seconds
45 with a rest period of 3 minutes between series, were performed under different hypoxic
46 conditions: Normoxia (N), FiO₂= 20.93% O₂; moderate hypoxia (MA), FiO₂= 16.5% O₂
47 and high hypoxia (HA); FiO₂=13% O₂). These sort of training (i.e. plyometric training)
48 has been found to stimulate stretch-shortening cycle and to increase anaerobic power
49 output ². To familiarize with the protocol test, 48h before the start of the study,
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 participants were allowed to practice the movement pattern of the countermovement
2 jump (CMJ). Subjects were advised not to consume any kind of food or drink but water
3 during the 90 minutes period prior to the test. At the same time, they were not allowed
4 to perform any physical activity 24 h before the exercise test. The duration of the three
5 exercise test in the different experimental conditions not exceeded 35 minutes in any
6 session. Sessions were performed in a random order at the same time of day separated
7 by at least 72 h. During all the tests the participants were unaware of the simulated
8 altitude at which they exercised. Before each test subjects performed the same warm-up
9 protocol consisting in 10 minutes of running at 65% of the maximal individual heart
10 rate and stretching 5 more minutes. All subjects used the same model of shoes (Adidas
11 specific model to weightlifting gym training) during the exercise tests. Furthermore, a
12 Borg's modified CR10 Scale as a sensitive method to evaluate fatigue was used to
13 measure perceived exertion of the subjects after the execution of the exercise.
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30

31 *Procedures*

32
33
34
35
36 A hypoxicator (b-cat HA6500M, Nederland) was used to produce simulated altitude
37 conditions via control of oxygen content. Hypoxia was applied via face mask and the
38 degree of hypoxia was controlled with Drager Multiwarm II (Sd 8313300, Austria).
39 Fingertip capillary blood samples were obtained from each subject 4 minutes after
40 finishing the last serie to determine blood lactate (Lc) concentrations (Biosen C-Line,
41 EFK Diagnostik, Germany). Before the start of the first training session creatinekinase
42 (CK) activity was determined (Refloton Sprint, Germany), as a basal value, and also 24
43 hours before and after the tests at different hypoxic conditions. A force platform (Kistler
44 type 9865 C, Germany) with the software MLD 3.2 (Sp Sport Mukel-Leistungs-
45 Diagnose 3.2, Austria) was used to analyze the power performed during the jump tests.
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 Explosive-strength performance was expressed as Watts (W). During the first 30
2 seconds after finishing each jumping bout and following each series, the arterial oxygen
3 saturation (SaO₂) was measured with a pulse oxymeter (Onyx II model 9550, Austria).
4
5
6

7 *Statistical analysis*

8
9
10 Data analyses were performed by means of the statistical software Sigmaplot v.11
11 (SYSTAT Software Inc, San Jose, CA, USA). After testing for normal distribution
12 (Shapiro-Wilk) paired student *t*-tests were used to compare values of CK, Lc, BFS and
13 SaO₂. Power output data were analyzed using ANOVA with post hoc Holm-Sidak test.
14
15
16 The significance level was set at $p < 0.05$. Data are presented as mean \pm standard
17 deviation (SD).
18
19
20
21
22
23
24

25 **RESULTS**

26 **CK, Lc and SaO₂ values**

27
28 Neither the CK (N: 79.4 ± 15.6 , MA: 85.1 ± 26.6 and HA: 84.2 ± 47.1 U/L; $p > 0.05$)
29 values nor the maximal blood lactate concentration (N: 7.5 ± 3.0 , MA: 7.6 ± 4.0 and
30 HA: 7.9 ± 2.9 mM/L; $p > 0.05$) measured 24 h after the test sessions differed among
31 hypoxia conditions. Disregarding hypoxia level, SaO₂ values decreased from the first to
32 the last bout but, as expected, were higher at N ($98.6\% \pm 0.7$ and $96.7\% \pm 1.9$) when
33 compared to MA ($94.7\% \pm 2.3$ and $90.7\% \pm 3.8$) and HA ($95\% \pm 2.9$ and $81.5\% \pm 4.6$).
34
35
36 Statistically significant differences were found for the average of the 6 bouts comparing
37 N ($97\% \pm 1.1$) with MA ($91.3\% \pm 3$) ($p < 0.002$) and HA ($85.1\% \pm 4.6$) ($p < 0.01$). When
38 compare MA with HA, statistically significant differences were found from 4th bout to
39 final sets (Figure 1).
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53

54 **Exercise-related measurements**

1 The average power of the entire training (6 sets) indicates the mean power generated for
2 each subject in each bout and did not statistically differ between N and MA (3187 ± 46
3 W vs. 3184 ± 15 W, $p=0.82$). However, differences in mean power output were found
4 between N and HA (3187 ± 46 W vs. 3285 ± 43 W, $p<0.001$). Mean power output at the
5 different simulated altitudes for the six sets of each test is shown in Figure 2. The Peak
6 power reached in each set was individually calculated and it did not differ among the
7 three conditions either. The average of the peak power at N was 3196 ± 761.4 W; at
8 MA 3228 ± 704 W and HA 3306 ± 735.7 W. However, as can be seen in Figure 3 no
9 significant differences were detected among the first and the last set of the exercise test.
10 Although remarkable, values selected from the modified Borg fatigue scale showed no
11 statistically significant differences for hypoxia level: N (7.1 ± 1.9), MA (8.1 ± 1.4) and
12 HA (8.9 ± 2.1), ($p>0.05$).

31 DISCUSSION

32 The main finding of this study was that although subjects exercising in hypoxia reached
33 a greater hypoxemia and effort-perception as the FiO_2 decreased, neither mild nor
34 severe hypoxia negatively affected the capacity to execute anaerobic power output
35 during consecutive jumps bouts. Blood concentration of Lactate and Creatin kinase did
36 not show significant differences between conditions.

37 Subjects were able to maintain both average and peak power output during exercise in
38 hypoxia along the bouts (Figure 2 and 3). These results confirm and extend the
39 observations of previous studies applying anaerobic exercise in hypoxic conditions
40 (Wingate test ^{5,9}, running ¹⁰, jumping ⁸ and repeated sprint performance ⁷). Maintaining
41 the same absolute work load in comparison with exercise in normoxia is a critical factor
42 for muscular adaptations in hypoxia when the aerobic metabolism is mainly required

1 and SaO₂ is decreased ¹¹. However, both all-out exercises as hypoxia condition, largely
2 demand the anaerobic energy sources to compensate the reduction of the aerobic ATP
3 production in order to maintain the intensity of exercise. This fact was confirmed by
4 Ogura et al ¹² and Friedmann et al ¹⁰ who reported significant decreases in the O₂ uptake
5 during supramaximal in severe (12.7% O₂) and moderate hypoxia (15% O₂).
6

7
8
9
10
11 Previous studies have speculated that a reduction in the oxygen availability during high-
12 intensity intermittent exercise in hypoxia results in a higher accumulation of blood
13 lactate ⁵ due to the greater anaerobic metabolism participation. In our study, after
14 different FiO₂ conditions, participants achieved a similar lactate value (~7 mmol l⁻¹)
15 (see results). These values were lower than reported in others studies testing the
16 anaerobic performance but twice as long (15-s here vs. 30-40-s) ^{5,10,12}. It could be
17 speculated that the 15 second bout would largely affect O₂ stores and CP concentration
18 and the recovery time of 3 minutes between series could be sufficient to restore these
19 stores ¹³.
20
21

22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
Other remarkable finding of this study was that despite the observed significant declines
in SaO₂ during exercise in hypoxia in comparison with normoxia (Figure 1) subjects
were able to maintain the anaerobic power output along the bouts. These results are in
agreement with previous research showing a remarkable decrease of SaO₂ (~83%) after
30-s anaerobic exercise in hypoxia but not in normoxia (~97%) ⁹. In this topic, Calbet et
al ⁵ reported that larger decreases of the SaO₂ during exercise in hypoxia could
demonstrate a greater anaerobic energy production in hypoxia. On the other hand, the
higher hypoxemia was associated with a greater effort-perception during exercise in
hypoxia (~25%) than normoxia. Likewise, Amann et al ¹⁴ described as a reduced brain
O₂ availability could increase the effort-perception.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Some limitations in this study have to be mentioned. Unfortunately, without muscle biopsy we were not able to undoubtedly determine the metabolic effects of hypoxic training in the present study. The sample size was rather small and only male gender was analyzed, so the outcomes could not hold true for females. We cannot exclude a “learning effect” throughout the study. It was to avoid this that we performed the exercise test in a random altitude order. It could be speculated that in already well-trained athletes, which require supramaximal and specific stimulus of exercise, the addition of a hypoxia to the anaerobic exercise regime could lead to muscular and metabolic stimulus that with training alone could not be attained. Indeed, this speculation has been recently investigated throughout short-programs of high-intensity intermittent training in hypoxia showing a greater anaerobic performance in comparison with the same protocol performed in normoxia ^{15.,16.}.

In conclusion, the present study showed that average and peak power output during such ES training was not negatively affected by different altitude conditions but was even lightly increased at HA. Performing such training regimen could improve the adaptations of the anaerobic metabolism as have been reported recently. Additionally it could be speculated that lower training volumes could be enough to obtain similar adaptations when comparing to training in normoxia. However further studies are needed to confirm these conclusion.

PRACTICAL APPLICATIONS

Many sports demand high anaerobic power outputs and improving this capacity is highly desirable for these athletes. Therefore this type of training could be helpful for already well-trained athletes to increase the training stimulus and consequently their training adaptation.

ACKNOWLEDGEMENTS

JAH and SJS would thank the department of the Sports Science of the University of Innsbruck (Austria) for providing all the facilities. We are also grateful to all the volunteers participating in the study for their hard commitment and enthusiasm.

1
2 **FIGURE LEGENDS**
3
4
5
6

7 Figure 1. Oxygen saturation at different altitude conditions. a) Statistical differences
8
9 between N and LA, b) Statistical differences between N and HA, c) Statistical
10
11 differences between MA and HA. Significance $p < 0.05$.
12
13
14
15
16

17 Figure 2. Average power output during each bout under different conditions. W (Watts);
18
19 550m (normoxia); 2500m (moderate altitude) and 4000m (high altitude).
20
21
22
23
24

25 Figure 3. Average peak power during first and the last set under different hypoxic
26
27 conditions. N (normoxia); MA (moderate altitude) and HA (high altitude). W (watts).
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

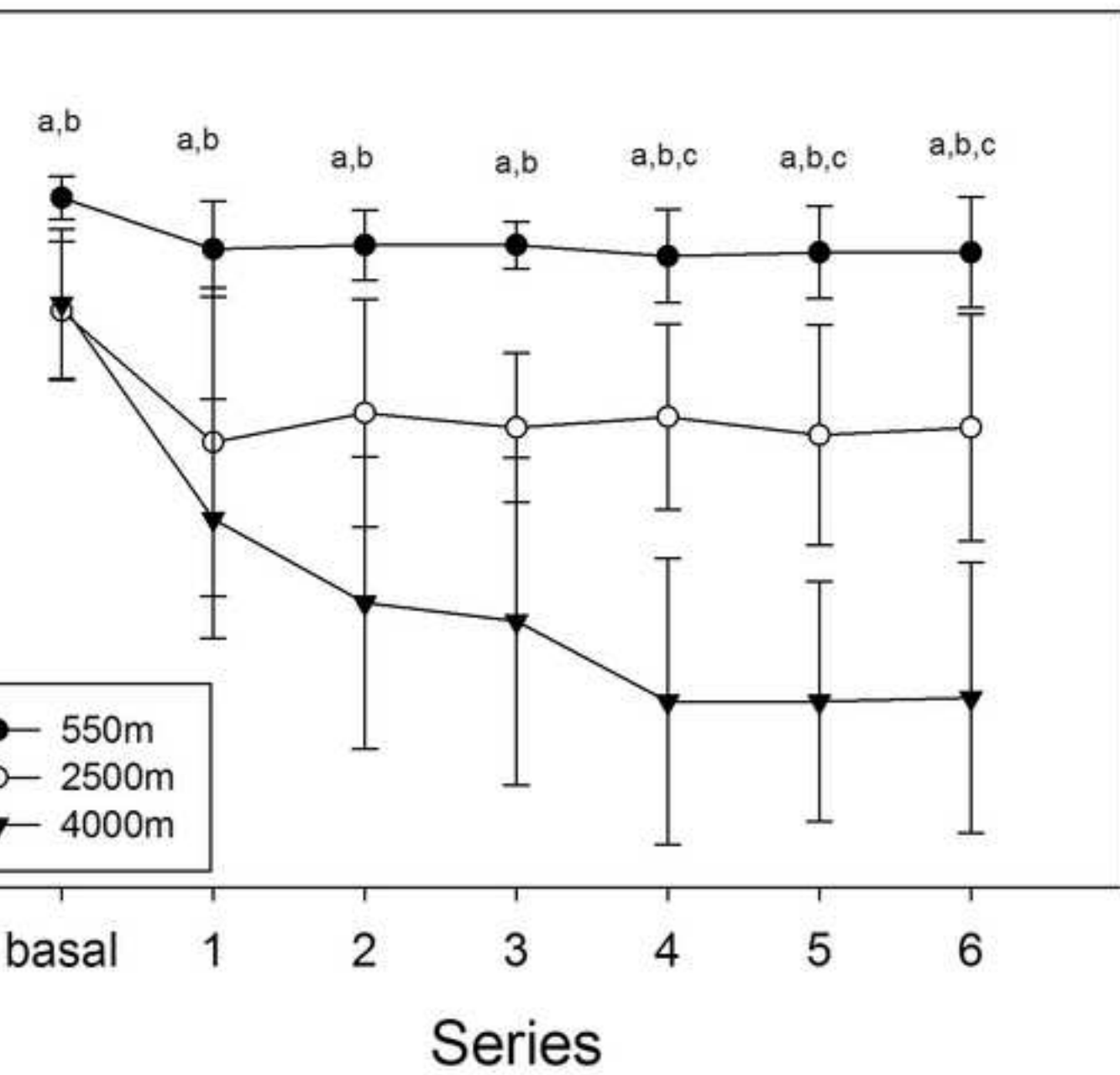
REFERENCES

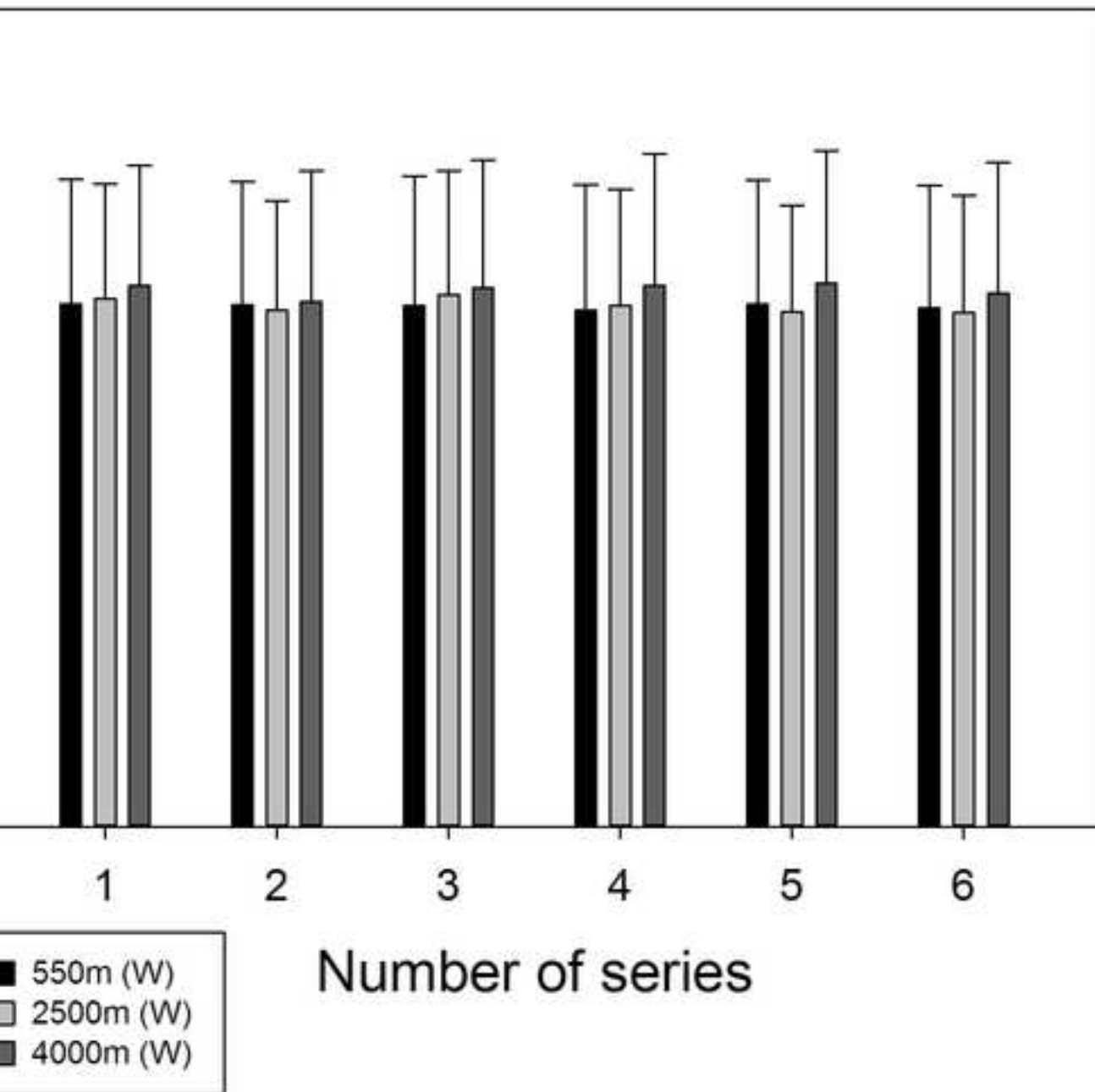
1. Paavolainen L, Hakkinen K, Hamalainen I, Nummela A, Rusko H. Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985)*. 1999;86(5):1527–1533.
2. Bosco C, Luhtanen P, Komi P V. A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1983;50(2):273–282.
3. Bonetti DL, Hopkins WG. Sea-level exercise performance following adaptation to hypoxia: a meta-analysis. *Sports Med.* 2009;39(2):107–127.
4. Levine BD. Intermittent hypoxic training: fact and fancy. *High Alt. Med. Biol.* 2002;3(2):177–193.
5. Calbet JA, De Paz JA, Garatachea N, Cabeza de Vaca S, Chavarren J. Anaerobic energy provision does not limit Wingate exercise performance in endurance-trained cyclists. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985)*. 2003;94(2):668–676.
6. Coudert J. Anaerobic performance at altitude. *Int. J. Sports Med.* 1992;13 Suppl 1:S82–S85.
7. Bowtell JL, Cooke K, Turner R, Mileva KN, Sumners DP. Acute physiological and performance responses to repeated sprints in varying degrees of hypoxia. *J. Sci. Med. Sport.* 2013.
8. Álvarez-Herms J, Corbi F, Pagès T, Viscor G, J-SS. Anaerobic performance after endurance strength training in hypobaric environment. *Sci. Sport.* 2013;“in press.”
9. McLellan TM, Kavanagh MF, Jacobs I. The effect of hypoxia on performance during 30 s or 45 s of supramaximal exercise. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1990;60(2):155–161.
10. Friedmann B, Frese F, Menold E, Bartsch P. Effects of acute moderate hypoxia on anaerobic capacity in endurance-trained runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2007;101(1):67–73.
11. Chapman RF, Stager JM, Tanner DA, Stray-Gundersen J, Levine BD. Impairment of 3,000m Run Time at Altitude Is Influenced By Arterial Oxyhemoglobin Saturation. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2011.
12. Ogura Y, Katamoto S, Uchimarui J, Takahashi K, Naito H. Effects of low and high levels of moderate hypoxia on anaerobic energy release during supramaximal cycle exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2006;98(1):41–47.
13. Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, Lakomy HK. Contribution of phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985)*. 1996;80(3):876–884.

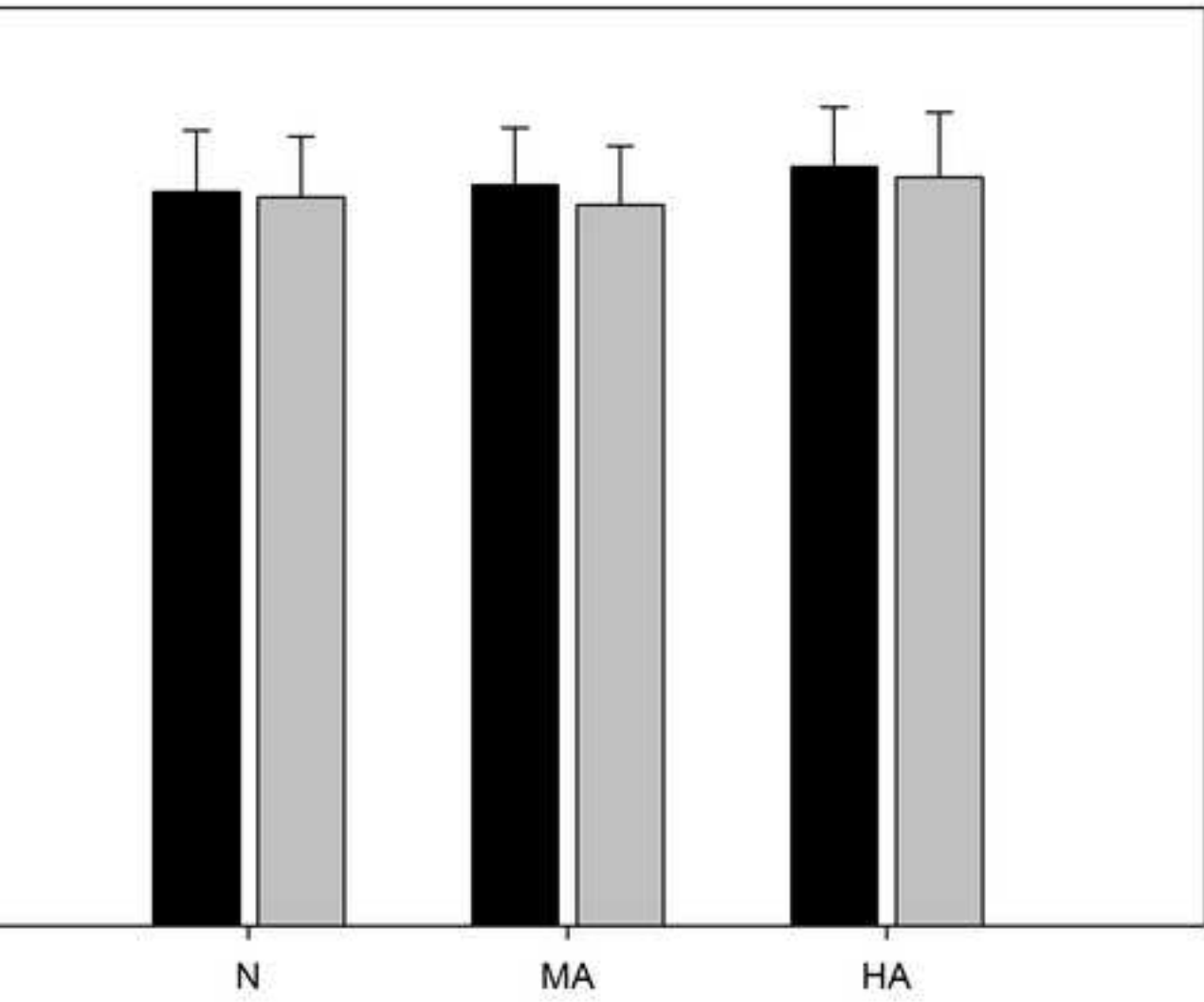
1 14. Amann M, Pegelow DF, Jacques AJ, Dempsey JA. Inspiratory muscle work in acute
2 hypoxia influences locomotor muscle fatigue and exercise performance of healthy
3 humans. *Am. J. Physiol. Integr. Comp. Physiol.* 2007;293(5):R2036–45.

4
5 15. Álvarez-Herms J Pagès T, Viscor G, Corbi F J-SS. Lactic anaerobic capacity
6 enhancement by explosive endurance training under simulated altitude conditions. *Sleep*
7 *Breath.* 2012;16(1):247.

8
9
10 16. Galvin HM, Cooke K, Sumners DP, Mileva KN, Bowtell JL. Repeated sprint
11 training in normobaric hypoxia. *Br. J. Sports Med.* 2013;47 Suppl 1:i74–i79. Available
12 at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24282212>.







Manuscript Number: WEMJ-D-14-00049

Title: Heart rate variability after one session of power strength exercise performed at different hypoxic conditions

Article Type: Brief Report

Keywords: Altitude training, heart rate variability, explosive training, fatigue recovery

Corresponding Author: Prof. Jesús Álvarez-Herms, Msc., Bsc.

Corresponding Author's Institution: Facultat de Biologia. Universitat de Barcelona

First Author: Jesús Álvarez-Herms, Msc., Bsc.

Order of Authors: Jesús Álvarez-Herms, Msc., Bsc.; Sonia Julià-Sánchez, Msc; Hannes Gatterer, Phd; Francisco Corbi, Phd; Teresa Pagès, Phd; Gines Viscor, Phd; Martin Burtscher, Phd MD

Abstract: Objective: The study aimed to examine the effect produced for one single anaerobic exercise at different normobaric conditions on the long-term recovery of the heart rate variability (HRV) and effort-perception.

Methods: Eight moderately trained subjects performed three identical exercise sessions at different inspired oxygen fractions (FiO₂): 21%, 16.5% and 13.5% O₂. Immediately before and 24h after exercise, HRV parameters (R-R, RMSDD, pNN50 and TP, LF, HF and LF/HF ratio) and rating of effort and fatigue perception were measured.

Results: TP, VLF and HF increased 24 h after training in all groups. However, this effect was not related to altitude ($p > 0.05$). R-R intervals, pNN50, LF and the LF/HF ratio tended to decrease only at HA. Effort-perception immediately after cessation of exercise was reported only significantly higher for HA ($p = 0.02$) in comparison with N. However, 24h after, fatigue-perception and Lactate values were similar for all conditions.

Conclusions: Subjects reported a greater effort-perception during exercise at HA than N and MA. However, while several studies have shown that hypoxia and aerobic exercise modify the short-term HRV parameters, our study, showed a negligible perturbation of HRV and fatigue-perception after 24 hours of recovery in normoxia.

Suggested Reviewers: Julio Brito Richards PhD. MD.

Researcher in Health studies, University of Arturo Prat of Chile State
julio.brito@unap.cl

Dr. Brito is a specialist in the hypoxia and medicine of altitude. He obtained their Phd focusing in the "Intermittent hypobaric hypoxia in severe altitude". He has demonstrated a great interest in the topic.

António Alexandre Moreira Ribeiro de Ascensão PhD.

Professor, Faculty of Sports, University of Porto (Portugal)
aascensao@fade.up.pt

Prof. de Ascensao has investigated in the exercise physiology topic. He has several publications focusing in the exercise responses to exercise.

Opposed Reviewers:



Departament de Fisiologia i Immunologia
Facultat de Biologia

Edifici Ramon Margalef (planta 3-A)
Av. Diagonal, 645
E-08071 Barcelona (Spain)

Tel: +34 93 4021529
Fax: +34 93 4110358
e-mail: gviscor@ub.edu
<http://www.ub.edu/fisiod3>

Ginés Viscor
Catedràtic



Dr. Scott E. McIntosh, MD, MPH
Editor-in-Chief
Wilderness & environmental medicine journal

Dear Dr. McIntosh
We would like to submit the following manuscript for your consideration:

Title: "Heart rate variability after one session of power strength training performed at different altitudes".

Authors:

Jesús Álvarez-Herms¹, Sonia Julià-Sánchez¹, Hannes Gatterer², Francisco Corbi³, Teresa Pagès¹, Ginés Viscor¹ and Martin Burtscher²

Affiliations:

¹Departament de Fisiologia i Immunologia, Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona, Av. Diagonal, 645; E-08028 Barcelona (Spain).

²Department of Sports Science. University of Innsbruck. Fürstenweg 185; A-6020 Innsbruck (Austria)

³Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC), Universitat de Lleida (UdLl). Complex de la Caparrella, s/n. Població. 25192 Lleida (Spain)

Corresponding author:

Jesús Álvarez-Herms (tel. +34 934021529; fax: +34 934110358; e-mail: jesusalvarez@ub.edu)

We consider this manuscript able to be published as original research article in *Wilderness & environmental medicine journal*.

We look forward for your notices
Thank you in advance by your kind attention

Prof. Jesús Álvarez-Herms

Heart rate variability after one session of power strength training performed at different altitudes

Jesús Álvarez-Herms¹, Sonia Julià-Sánchez¹, Hannes Gatterer², Francisco Corbi³, Teresa Pagès¹,
Ginés Viscor^{1§}, Martin Burtscher²

¹Departament de Fisiologia i Immunologia. Facultat de Biologia. Universitat de Barcelona
(Spain)

²Department of Sports Science. University of Innsbruck (Austria)

³National Institute of Physical Education of Catalonia (INEFC). Department of Biomechanics.
Universitat de Lleida (Spain)

[§]Corresponding autor: Ginés Viscor, Departament de Fisiologia i Immunologia, Facultat de
Biologia, Universitat de Barcelona, Av. Diagonal, 645; Barcelona (Spain). Tel +34 934021529;
Fax: +34 934110358

E-mail addresses

JAH: jesusalvarez@ub.edu

SJS: soniajulia@ub.edu

HG: Hannes.Gatterer@uibk.ac.at

TP: tpages@ub.edu

FC: f@corbi.neoma.org

MB: martin.burtscher@uibk.ac.at

GV: gviscor@ub.edu

Keywords: Altitude training, heart rate variability, power strength training, fatigue recovery

Grants: This study has been developed without any public or private funding.

Running title: HRV and hypoxic anaerobic jumping

INTRODUCTION

1
2
3 Heart rate variability (HRV) has been studied as a non-invasive method to assess autonomic
4
5 function after the cessation of exercise ¹. Decreases in HRV parameters are related to conditions
6
7 such as diabetes, heart disease, hypertension, asymptomatic left ventricular dysfunction, and
8
9 myocardial infarction ². Conversely, interventions that reduce sympathetic activity and/or
10
11 increase parasympathetic activity have been shown to protect against lethal arrhythmias. Many
12
13 studies have shown that regular exercise training increases HRV parameters, however, the
14
15 maintained high frequency of training imposed ensures that the adaptive effects are cumulative,
16
17 which could decrease these parameters ³. These changes in HRV are considered as a fine
18
19 indicator of imbalance between exercise stress and recovery and increased sympathetic drive ⁴.
20
21
22

23
24 Likewise, hypoxic environment has been argued to be a stressor for the whole body that also
25
26 causes a decrease in the total spectral power, with an increase in relative sympathetic tone
27
28 associated with a decrease in parasympathetic tone ⁵. In the last decades, an increasing number
29
30 of well-trained endurance athletes are using hypoxia as a complementary training method to
31
32 improve performance. Mainly for aerobic events, such as long distance runners, the
33
34 measurement of the HRV has been demonstrate as a reliable method to assess the individual
35
36 response to the training and hypoxia ⁵. However, few reports have addressed whether a single
37
38 exercise bout (with maximal anaerobic power output orientation) performed in high or moderate
39
40 hypoxia causes a higher autonomic dysfunction after 24h of recovery than the same training
41
42 completed in normoxia.
43
44
45

46
47 In this regard, here we analyzed the impact that it had one high-intensity interval training
48
49 session (anaerobic capacity) under different inspired oxygen fractions (i.e. 21, 16.5 and 13.5 %)
50
51 on both HRV and the effort-perception throughout a modified Borg's scale ⁶. We hypothesized
52
53 that higher hypoxia induces additional stress, which can disrupt the balance of the autonomic
54
55 nervous system in a greater extent than moderate hypoxia or normoxia. Despite this hypothesis,
56
57 there is a growing body of evidence in this area based on studies of moderately trained athletes
58
59
60
61
62
63
64
65

1 that a single exercise bout may result in increased sympathetic influence only during 1h
2 postexercise ⁷ and that 24h postexercise the autonomic function returns to baseline levels ⁷. The
3 principal aim of this study was to assess whether different hypoxic conditions produce different
4 vagal activity in the long-term HRV kinetics in comparison with the same exercise performed in
5 normoxia.
6
7
8
9

10 **MATERIALS AND METHODS**

11 *Subjects*

12 Eight recreational athletes (See anthropometric characteristics at Table 1) from the Sports
13 Science School at the University of Innsbruck were informed about the aims, risks and benefits
14 of the study. All subjects performed 3-5 weekly training sessions and none reported physical or
15 health problems. Participants were familiar with the training regime applied. They were not
16 allowed to eat, or drink coffee 3 h before the tests, and physical exercise and alcohol intake
17 were prohibited during the preceding day. During the 24h of recovery after the exercise subjects
18 were not allowed to perform any physical activity. The study was according to Helsinki
19 Declaration, Bioethical Committee of the University of Innsbruck, Austria, approved the
20 protocol, and all subjects gave written informed consent.
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37

38 *Procedures*

39 Tests started at 8 am on 3 days separated by at least 72 hours. On arrival at the lab, weight and
40 height were measured. Immediately, HRV parameters and baseline heart rate were recorded
41 during 5 minutes on supine position with a Polar RS810 device following Seiler et al ³
42 procedure. Immediately after, participants started the low intensity warm-up program (running
43 or cycling at 65% of the estimated maximal heart rate) for 15 min. They then performed the
44 interval training under one of the environmental conditions as follows: FiO₂ = 21%, 16.5%
45 13.5% and respectively named normoxia (N), moderate altitude (MA) and high altitude (HA).
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

1 sets. This test was performed following the universally accepted Bosco's anaerobic alactic
2 power testing model ⁸. Four minutes after cessation of the last bout, capillary lactate was
3 collected from the finger of each participant. At the same time, subjects were asked about the
4 effort-perception of the exercise scaling until 10 points as more extenuate effort possible. HRV
5 measures were performed 24h after training for each participant. Data were analyzed in the time
6 and frequency domains. Variability indexes in the time domain were RMSSD (square root of
7 the mean of the sum of the differences between the intervals), pNN50 (percentage of number of
8 R-R intervals differing from the precedent by more than 50 ms divided by the total number of
9 R-R intervals in the sample), and the mean value R-R intervals. Spectral frequency components
10 were calculated using a fast Fourier transformation algorithm: total spectral power (TP between
11 0 and 0.50 Hz) and all spectral energy bands, very low (VLF <0.05 Hz), low (LF between 0.05
12 and 0.15 Hz), and high (HF between 0.15 and 0.40 Hz) frequency, were expressed in absolute
13 units (ms²/Hz) and their relative power was expressed as a percentage (%) of the sum of the
14 three. The low to high frequency ratio (LF/HF) was also calculated.

31 *Statistical analysis*

32 Data were analyzed using SIGMAPLOT version 11 (SYSTAT software Inc, San José, CA,
33 USA). All results are expressed as mean ± standard deviation. Statistically significance was
34 accepted at $p < 0.05$. After a screening multiple factor ANOVA analysis, *ad hoc* paired *t*-test by
35 groups were used to contrast the differences before and after under each experimental condition.

43 **RESULTS**

44 The mean (SD) basal heart rate measured 24 h after the exercise showed non-significant post-
45 training session increases in N and in HA were noted, in contrast to the reverse trend observed
46 in MA (see Table 2). Although no significant changes were found for HRV parameters, N and
47 MA showed a similar trend after the training, while an opposite tendency was observed in
48 several parameters at HA (Table 2). At MA, all parameters increased post-training, whereas at
49 N, all variables slightly increased except the LF/HF ratio. In contrast, at HA a reverse trend was
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

observed for R-R intervals, pNN50, LF and the LF/HF ratio. TP, VLF and HF increased 24 h after training in all groups, whereas LF tended to decrease only at HA.

The average power reached during sessions was similar for all conditions without significant differences (see Table 1). At the same time, capillary blood lactate measures were no significant different between environmental conditions (21% O²: 7.5 ±3.0, 16.5% O²: 7.7 ±4.0 and 13.5% O² 7.9 ±3.0 mmol.l⁻¹ (p>0.05) (Figure 1).

As expected, there was a direct correlation in reported effort-perception as FiO₂ levels decreased. In comparison with N, at HA, non for MA, subjects reported a greater effort-perception during exercise (p=0.02). However, 24 h after the exercise the fatigue-perception was imperceptible in whatever condition (Figure 1).

DISCUSSION

The aim of this study was to compare the effects of a single exercise at different hypoxic conditions on the long-term autonomic nervous system balance (HRV) and the effort-perception in comparison with normoxia. The principal finding of this study was that long-term HRV parameters were not influenced by acute hypoxic exercise in greater extent than normoxia. Despite this similar autonomic response, immediately after the cessation of exercise, subjects reported a higher effort-perception at HA and MA in contrast with N.

We observed that, except for the HA group, which showed slight decreases in R-R intervals, at N and MA, the most representative parameter of HRV slight increased. However, pNN50, LF, RMSDD, TP, VLF, LF and HF did not show marked modifications. A possible justification could be that one acute session (~ 40 minutes) although supramaximal (~ 3100 W executed; ~ 40 w.kg⁻¹), only affects the HRV on the immediately hours after the exercise ⁹. In this regard, different studies have reported as only at short-term (1 h) after severe exercise was observed an increased sympathetic regulation ^{7,4}. In contrast, 24 h after exercise this condition was reversed after different exercise conditions: skiing 75-km ¹⁰, running 46-km in altitude ¹¹ and interval

1 exercise ⁷. Alternatively, variables as the fitness level also could contribute to a greater rapid
2 recovery of parasympathetic balance after severe exercise ³.

3
4
5 Povea et al ⁵ reported a relative increase in sympatho-vagal dominance after hypoxia, thus
6 indicating sympathetic predominance and higher fatigue in comparison with normoxia. Here we
7 found that severe exercise with the supplemental hypoxic stress did not produce a
8 parasympathetic imbalance on the long-term HRV kinetics. Correspondingly, decreases in LF
9 components and responses of the RMSDD and pNN50 found here can be assumed as a sign of
10 parasympathetic dominance ⁷. In the present study, RMSDD and pNN50 tended to increase at N
11 and MA, except pNN50 at HA. This fact, may reflects the complete recovery of the subjects due
12 to a markedly rebound of the vagal activity during the subsequent 24 h after exercise. Higher
13 values of HF have been correlated with elevated parasympathetic activity but surprisingly we
14 found that after exercise HF values under HA tended to be higher than those at LA and MA.
15
16 Whereas the LF/HF ratio is sometimes used to study sympatho-vagal dominance ¹², the role of
17 LF spectra is more controversial. Povea et al. ⁵ showed a relative increase in LF and the LF/HF
18 ratio after hypoxia, thus indicating sympathetic predominance and higher fatigue in comparison
19 to exercise in normoxia. Our results indicates a similar tendency for LF spectra was found (\pm
20 decrease of 0.3%) but not for LF/HF ratio (increase in MA but decrease in N and HA). These
21 findings do not provide concise evidence and rise a question about the usefulness of HRV
22 monitoring, at least for this kind of exercise, regarding the control of volume of training and
23 fatigue recovery. As opposed to expected, we failed to detect signs of a higher cardiovascular
24 stress at simulated HA. Our findings are partly agree with Mourot et al.⁷, who concluded that
25 the total physical work determines long-term HRV recovery and not the type of exercise, in
26 contrast to short-term HRV recovery. This idea could be reinforced with the data provided by
27 the lactate response to exercise at these three hypoxic conditions confirming that similar nature
28 of the metabolic demands in which participants attained $7\sim\text{mM}\cdot\text{l}^{-1}$ correlates with a similar HRV
29 kinetics after long-term recovery. The effort-perception reported by subjects during sessions
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 showed as severe hypoxia was harder perceptively than MA or N. However, a completely
2 recovery was reported 24 h after all conditions.
3

4
5 The main limitation of this study was the lack of HRV monitoring during the immediate hours
6 after the exercise training at altitude. This monitoring would reveal potential differences in the
7 short-term kinetics of HRV recovery after heavy exercise at different altitudes. Regrettably, this
8 study does not provide a clear evidence about the ideal altitude at which to achieve optimum
9 hypoxia-induced anaerobic alactic exercise. Despite these inconclusive results, it could be
10 pointed that in a previous study, we described that heart rate recovery (immediately measured
11 after a maximal exercise), which is dependent on parasympathetic modulation, improved after 4
12 weeks of explosive-strength training (anaerobic training) in intermittent hypoxia at MA in
13 comparison with the same procedure performed in normoxia ¹³. Therefore, according with the
14 similar average power performed during sessions, hypoxia did not reduced the exercise
15 performance comparing with normoxia.
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29

30 **CONCLUSIONS**

31
32 Although HRV alterations have been reported immediately after constant and aerobic exercise,
33 we did not detect differences in HRV parameters 24 h after intermittent anaerobic training at
34 different FiO₂. The results of this study reinforce the idea that the HRV analysis is a valuable
35 tool only during a limited temporal window immediately after the cessation of high intensity
36 exercise. Furthermore, the modify of the HRV could be not related with the intensity of exercise
37 or the environmental conditions at least after one supramaximal intermittent training in hypoxia.
38 However, the possible influence of consecutive days of supramaximal exercise in hypoxia on
39 HRV, i.e. applying the “Training High-Living Low” model, deserves further study.
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51

52 **Acknowledgments**

53
54 This study would not have been possible without the generous collaboration of all the
55 volunteers.
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Captions to tables

Table 1. Anthropometric characteristics of the subjects. Mean values \pm standard deviation. Average power performed during exercise bouts (Watts); Environmental condition (N = normoxia; MA = moderate altitude and HA = High altitude)

Table 2: Heart rate variability data before and 24 hours after a 5-minute exercise session at three simulated altitudes. Data are presented as mean values and standard deviation (\pm SD). Abbreviations: ms (milliseconds); VLF (Very Low Frequency); LF (Low Frequency); HF (High Frequency) and ratio LF/HF (Low Frequency/High Frequency).

Captions to figure

Figure 1. Effort and fatigue perception plus lactate measurement. Environmental conditions (N = normoxia; MA = moderate altitude and HA = High altitude). Lactate measures are expressed as mmol.l^{-1} . * indicates significance for $p < 0.05$ (HA vs. N)

REFERENCES

1. Arai Y, Saul JP, Albrecht P, et al. Modulation of cardiac autonomic activity during and immediately after exercise. *Am. J. Physiol.* 1989;256(1 Pt 2):H132–41.
2. Takase B, Kurita A, Noritake M, et al. Heart rate variability in patients with diabetes mellitus, ischemic heart disease, and congestive heart failure. *J. Electrocardiol.* 1992;25(2):79–88.
3. Seiler S, Haugen O, Kuffel E. Autonomic recovery after exercise in trained athletes: intensity and duration effects. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2007;39:1366–1373.
4. James DVB, Munson SC, Maldonado-Martin S, De Ste Croix MB a. Heart rate variability: effect of exercise intensity on postexercise response. *Res. Q. Exerc. Sport.* 2012;83:533–9. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23367815>.
5. Povea C, Schmitt L, Brugniaux J, Nicolet G, Richalet JP, Fouillot JP. Effects of intermittent hypoxia on heart rate variability during rest and exercise. *High Alt. Med. Biol.* 2005;6(3):215–225.
6. Borg G. Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion. *Scand. J. Work. Environ. Health.* 1990;16 Suppl 1:55–58.
7. Mourot L, Bouhaddi M, Tordi N, Rouillon JD, Regnard J. Short- and long-term effects of a single bout of exercise on heart rate variability: comparison between constant and interval training exercises. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2004;92(4-5):508–517.
8. Bosco C, Luhtanen P, Komi P V. A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1983;50(2):273–282.
9. Gladwell VF, Sandercock GRH, Birch SL. Cardiac vagal activity following three intensities of exercise in humans. *Clin. Physiol. Funct. Imaging.* 2010;30:17–22.
10. Hautala A, Tulppo MP, Mäkikallio TH, Laukkanen R, Nissilä S, Huikuri H V. Changes in cardiac autonomic regulation after prolonged maximal exercise. *Clin. Physiol.* 2001;21:238–245.
11. Bernardi L, Passino C, Robergs R, Appenzeller O. Acute and persistent effects of a 46-kilometre wilderness trail run at altitude: Cardiovascular autonomic modulation and baroreflexes. *Cardiovasc. Res.* 1997;34:273–280.
12. Malliani A, Pagani M. Spectral analysis of cardiovascular variabilities in the assessment of sympathetic cardiac regulation in heart failure. *Pharmacol. Res.* 1991;24 Suppl 1:43–53.
13. Álvarez-Herms J, Julià-Sánchez S, Corbi F, Pagès T, G. V. Changes in heart rate recovery index after a programme of strength/endurance training in hypoxia. *Apunt. Med. l'Esport.* 2012;47(173):23–29.

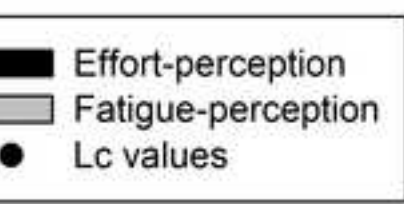
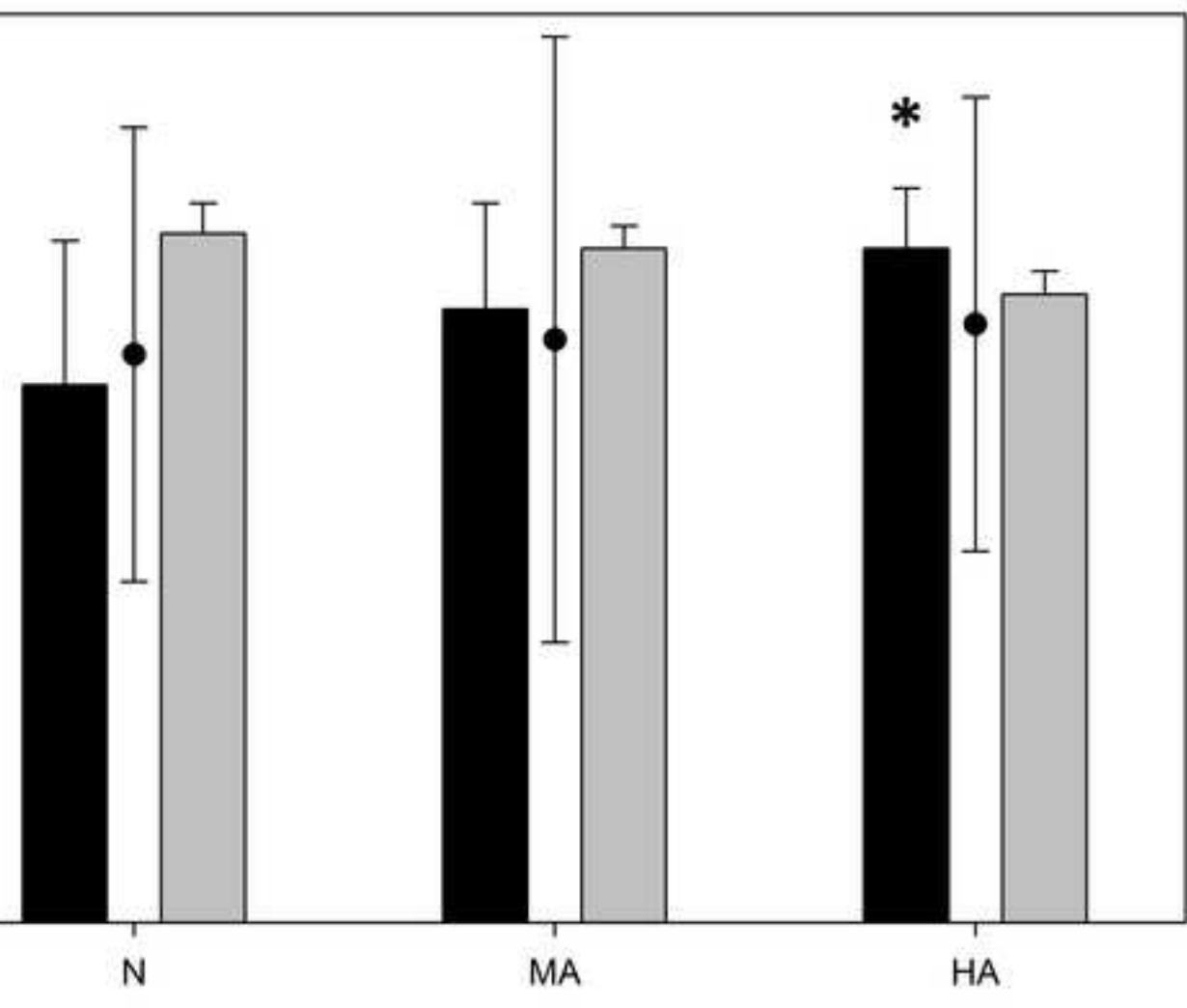


Table 1

Age, years		31.1 ±4.3	
Height, cm		177.6 ±3	
Weight, Kg		70.1 ±5.2	
Body Mass Index, Kg·m ⁻²		22.3 ±4.1	
Environmental condition	N	MA	HA
Average power output	3173 ± 747	3142 ±719	3260 ± 800

Table 2

	21%		16.5%	
	PRE	24 H POST	PRE	24 H POST
Basal Heart Rate (beats·min ⁻¹)	58 ± 9.1	62 ± 11.7	63.1 ± 11.3	60.9 ± 11.7
R-R intervals (ms)	1003 ± 173.5	1027.89 ± 236	1018.19 ± 191.4	1038.8 ± 222.9
RMSDD	66.12 ± 33.4	68.31 ± 49.5	67.53 ± 38.68	70.41 ± 34.3
pNN50 (%)	12.91 ± 8.2	14.83 ± 9.5	13.46 ± 7.1	16.03 ± 9.3
Total Power (TP)	12678.8 ± 9323	15999.1 ± 12459	11555.7 ± 7672	16424.4 ± 12646
VLF (%)	69.8 ± 8.3	73.5 ± 9.1	70.3 ± 12.2	72.7 ± 12.2
LF (%)	15.2 ± 6.8	14.8 ± 6.2	14.7 ± 7.7	14.4 ± 7.9
HF (%)	13.8 ± 9.4	11.6 ± 7.2	14.9 ± 10.2	12.3 ± 10
LF/HF	153.4 ± 75.2	129.1 ± 66.2	149.4 ± 122.5	198.6 ± 230.8

Background: Cells respond to oxygen availability using a variety of physiologic, molecular, and genomic mechanism. Not only is the absolute value for cellular oxygen an important determinant of cellular metabolic function, but the gradient from the cell surface to the lowest levels in the mitochondria are sensed and used for regulatory purposes locally as well as in the generation of hypoxic responsiveness. Hypoxia is theoretically important consideration in pharmacology of disease because: (1) Altered cellular function may alter the therapeutic effectiveness of the agent, (2) Therapeutic agents may potentiate or protect against hypoxia-induced pathology, (3) Hypoxic conditions may potentiate or mitigate drug-induced toxicity, and (4) Hypoxia may alter drug metabolism, and thereby therapeutic effectiveness.

Methods: The prototypic biochemical effect of hypoxia is related to its role as a co-factor in a number of enzymatic reactions, e.g., oxidases and oxygenases, which are altered independently from the bio energetic effect of low oxygen on cytochrome oxidase functions. The cytochrome P-450 family of enzymes is one example where there is a direct effect of low oxygen availability in decreasing its metabolic functions, thereby decreasing the metabolism of drug substrates. Indirectly, NADH/NAD⁺ is increased with 10% inspired oxygen and leads not only to reduced oxidation of ethanol, but also theoretically to a reduction of azo- and nitro-compounds to amines and disulfides to sulfhydryls. With chronic hypoxia, many of these processes are reversed, suggesting that hypoxia induces the drug metabolizing systems. Support for this comes from observations that hypoxia can induce HIF1 α which in turn induces transcription and function of some but not all cytochrome P450 isoforms.

Results: The prototypic product discovered through studies of the in vivo response to hypoxia is erythropoietin. Most recently, hypoxia has been studied as a co-factor in disease expression (e.g., preeclampsia) and in tumor metastatic potential. Thus, given the magnitude of cardiopulmonary disease and cancer, the direct effects of hypoxia on cellular drug metabolism probably should be considered in the assessment of current and future therapy, and the signaling pathways that are affected by hypoxia could become a new target for novel therapy.

15

Lactic anaerobic capacity enhancement by explosive-strength endurance training under simulated altitude conditions.

J. Álvarez¹, S. Julià¹, T. Pagès¹, G. Viscor¹, F. Corbi²

¹Departament de Fisiologia-Biologia, Universitat de Barcelona, Spain

²Laboratori de Biomecànica, Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya, Centre de Lleida, Spain

Background: There are scarce data and scientific agreement concerning to the adaptive responses to intermittent hypoxia for anaerobic physical fitness improvement. This study was aimed to assess the responses in the lactic anaerobic pathway against a speed–strength–endurance training protocol (half squat with programmed individual loads) for 4 weeks, three sessions per week, in two groups: HYP ($n=5$), trained into a hypobaric chamber (2,500 m) and NOR ($n=7$), trained with the same workloads at sea level.

Methods: Anaerobic power was tested before and after the training protocol according to the well-established Bosco's vertical jumping test procedures: squat jump (SJ), countermovement jump (CMJ) and 60 s countermovement jumping test (CMJ60). Thus, mean height for CMJ60 (cm), partial heights every 5 s and 15 s and elasticity (ELI) [(CMJ-SJ)/SJ \cdot 100], work loss [CMJ60/CMJ] and heart rate recovery (HRRI) [(HR_{max} - HR_{at 2 min})/(HR_{max}theor/HR_{max})] indexes were measured and/or calculated. Subjective perception of effort after each training session was also recorded.

Results: After training, HYP improved 6.75% in mean height CMJ60 ($p=0.029$) as compared to NOR (Table 1):

Table 1. Increase in mean height in HYP and NOR groups; ** $p<0.05$

Group	Pre	Post	Increase
Hypoxia ($n=5$)	18.42 \pm 2	22.57 \pm 2.3	22.5%**
Normoxia($n=7$)	18.46 \pm 3.5	21.37 \pm 4.1	15.7%

Significant differences were also found in work loss between pre–post in hypoxia group comparing CMJ60 tests (Table 2):

Table 2. Mean work loss [CMJ60/CMJ] pre- and post-training in HYP and NOR groups; ** $p<0.05$

Group	Pre	Post
Hypoxia ($n=5$)	0.62	0.66**
Normoxia ($n=7$)	0.58	0.56

Elasticity index was improved from 4.60 to 9.66 in NOR and from 2.89 to 4.59 in HYP. A better HRRI was found in HYP (75.94) than in NOR (55.99). Partial heights at 45–60" interval increased 32.9% for HYP against 21.9% for NOR. Perception of effort and fatigue was higher in HYP. According to these results, it would be interesting to assess SSE training at simulated altitude as a means to improve lactic anaerobic pathways. This approach is compatible with parallel sea level training and does not affect the specific-motor components that require high intensity loads only reachable at low altitude.

27

A program of force training at simulated altitude does not influence postural balanceJ. Álvarez¹, S. Julià¹, T. Pagès¹, G. Viscor¹, F. Corbi³¹Departament de Fisiologia-Biologia, Universitat de Barcelona, Spain²Laboratori de Biomecànica, Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya, Centre de Lleida, Spain

Background and objective: Postural balance can be affected by intermittent exposure to hypoxia. The objective of the present study was to evaluate the influence on the postural balance of a force training program (half squat with programmed individual loads) developed in conditions of hypobaric hypoxia. Subjects were divided in two groups: normoxia (NOR, $n=7$) and hypoxia (HYP, $n=5$), and were submitted to a protocol of lactic anaerobic force training during 4 weeks, with three weekly sessions. HYP group

performed all the training protocol inside a hypobaric chamber (2,500 m), whereas NOR group trained with the same individualized workloads at sea level. The postural balance was evaluated in all the subjects before the start and after the end of their training protocol by means of a stabiometric platform (Fussyo Model, Medicapteurs, France). Guidelines of Association Française de Posturologie were followed, and all the evaluations were repeated for each subject with open (OE) and closed eyes (CE). Analyzed variables were: surface area drawn by centre of foot pressure (CoP) and the path length described by the CoP in their anteroposterior (x), lateral (y) and combined (x, y) axes.

Results: Within NOR group, improvements with the eyes closed in all the analyzed variables were observed, whereas a different behaviour was found in HYP group. However, in both groups, nonsignificant differences between before and after protocol in any of the analyzed variables were detected, neither with OE nor CE:

	Normoxia				Hypoxia			
	Open Eyes		Closed Eyes		Open Eyes		Closed Eyes	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
Surface CoP (mm ²)	93	121	132	105	83	129	83	86
xy displacement (mm)	345.8	447.8	571.4	741.4	308.1	313.5	396.9	443.2
Mediolateral (mm)	213.2	256.6	295.1	296.4	184.3	143.0	194.6	189.9
Anteroposterior (mm)	261.6	340.4	467.8	616.5	193.4	251.2	329.3	362.7

Conclusion: These results suggest that further studies are needed to confirm the possible relationship between hypoxia, postural balance and force development.

28

Hypoxia restores exercise-induced NOS-phosphorylation at Ser1177 in erythrocytes of non-insulin-dependent diabetic men

C. Braunroth, S. Berghöfer, C. Graf, E. Lenzen, W. Bloch, K. Brixius

Department of Molecular and Cellular Sport Medicine, Institute of Cardiovascular Research and Sport Medicine, German Sport University Cologne, Germany

Objectives and methods: NOS activation in erythrocytes (eryNOS) of patients suffering from type 2 diabetes is impaired. The present study investigated whether physical

exercise (bicycle ergometry, WHO scheme) may influence eryNOS activation (immunohistochemical detection of eryNOS phosphorylation at serine 1177) and whether this process may be altered due to a 6-week hypoxia interval training (4×/week for 90 min: 3×25 min with an interruption of 5 min at 15.4% O₂ (first week), 14.5% O₂ (second week), 12.7% O₂ (last 4 weeks); support by Höhenbalance GmbH, Cologne, Germany) in men suffering from non-insulin-dependent type 2 diabetes (NIDDM, $n=7$, age 61.6 ± 10 years, BMI 32.1 ± 6.2 kg/cm²). Vascular elasticity (TensioClinic Arteriograph, TensioMed Ltd., Budapest, Hungary) and basal erythropoietin plasma concentrations were measured as well.

Results: Before the hypoxia intervention, eryNOS phosphorylation at serine 1177 did not change during a cycling ergometric test and 30 min thereafter (eryNOS-pSer1177; basal, 17.4 ± 12.0 arbitrary grey values (arGV) vs. exercise, 8.4 ± 9.2 arGV vs. 30 min after exercise, 8.9 ± 7.2 arGV). The 6-week hypoxia intervention significantly decreased

DISCUSIÓN GENERAL

En la actualidad, muchos deportistas utilizan programas de hipoxia (crónica e intermitente) durante su preparación anual. Históricamente, estos métodos han sido utilizados por deportistas de resistencia (ciclistas, atletas, triatletas, nadadores, remeros, etc.) con el objetivo prioritario de aumentar la respuesta hematopoyética y mejorar la capacidad de rendimiento aeróbico ¹²⁵. Sin embargo, en los últimos años diversos estudios han apuntado que el entrenamiento intenso en hipoxia puede ser válido para mejorar el rendimiento en deportes con un importante rendimiento anaeróbico y de carácter intermitente ^{31,126}. Esta tesis está compuesta de varios estudios que específicamente han valorado parámetros de rendimiento anaeróbico; genérico (a través de la capacidad de salto en 60 segundos) y específico (carrera a pie; capacidad de realizar series interválicas al 90% de la máxima intensidad). Paralelamente, se realizaron mediciones de respuestas fisiológicas: lactato, frecuencia cardíaca y saturación arterial de oxígeno. Uno de los objetivos principales fue estandarizar el mayor número posible de condiciones: tiempo de exposición, condiciones de hipoxia (altitud simulada y condiciones de hipoxia hipobárica), parámetros de medición del rendimiento (anaeróbico), característica de los sujetos (deportistas entrenados), ejercicios utilizados (fuerza resistencia y potencia) y descanso entre sesiones de entrenamiento. Estas medias incluyeron entre 18 y 24 horas de exposición intermitente hipobárica y con igual volumen de entrenamiento en el grupo de normoxia; la altitud simulada en los dos estudios realizados con entrenamiento fue de 2500m y 3000m. Los resultados obtenidos aportaron datos sobre el rendimiento deportivo, la respuesta metabólica del lactato, la frecuencia cardíaca, la saturación arterial de oxígeno y la intensidad de ejecución durante en entrenamiento de potencia en hipoxia y normoxia.

Los deportistas de élite siguen programas de entrenamiento basados en principios teóricos muy estructurados (ver introducción; principios de entrenamiento). El objetivo de éstos es crear modificaciones homeostáticas constantes creando ajustes que favorezcan la mejora física y fisiológica. En este tipo de deportistas, estos cambios son cada vez más difíciles de obtener en base a la alta competencia alcanzada y por ello la inclusión de estímulos de nueva orientación a los cuales responder es una alternativa óptima para seguir mejorando. Teóricamente, podría suponerse que la realización del entrenamiento de fuerza específica en condiciones de hipoxia podría favorecer el cumplimiento de varios principios entre los cuales debemos describir: 1) la importancia de la *especificidad* del entrenamiento de fuerza en el deporte; 2) el aumento de la

intensidad relativa de esfuerzo y 3) la **individualización** de los métodos de entrenamiento.

¿Por qué realizar entrenamiento de fuerza en condiciones de hipoxia intermitente? El entrenamiento de fuerza es un método universalmente utilizado en todos los deportes individuales, tales como el remo ¹²⁷, ciclismo ¹²⁸, atletismo ¹²⁹ y en deportes colectivos como el fútbol ¹³⁰. Es un componente del entrenamiento altamente específico ^{131,132} y su **especificidad** aumenta a medida que el carácter de esfuerzo del deporte se incrementa. Por ejemplo, debe ser más específico el entrenamiento de fuerza explosiva en acciones aisladas, por ejemplo durante un salto de longitud, que en un proceso continuo (carrera de larga distancia) porque sus beneficios sobre el rendimiento muscular correlacionan más directamente con las variables implicadas en la contracción muscular y el tipo de fibras. En el caso de los movimientos cíclicos continuos como el pedaleo o la zancada, si mejoramos los niveles de fuerza en los músculos implicados, un deportista puede incrementar la eficiencia neuromuscular ¹³³ a través de la mejora en el rango de activación y reclutamiento de las unidades motoras ^{22,134}. Este aspecto es importante cuando los primeros síntomas de fatiga aparecen y existe un aumento en las concentraciones de hidrogeniones (H^+) y otros residuos producidos por la glucólisis anaeróbica ^{135,136}. Por esta razón, el rendimiento deportivo final es la suma de la efectividad de los sistemas centrales (sistemas cardiovascular y respiratorio) y periféricos (músculo esquelético) que influyen en la capacidad de generar potencia de fuerza muscular en condiciones de fatiga ¹³⁷.

Durante la progresión deportiva de un deportista, la carga de entrenamiento y competición se incrementa progresivamente a un nivel similar que la **intensidad** ejecutada. En condiciones de hipoxia, la menor disponibilidad de O_2 es el principal factor que causa un aumento del estrés debido a la diferencia entre la demanda de oxígeno y la energía producida. Este proceso teóricamente se suple aumentando la participación del metabolismo anaeróbico y se describe bajo el concepto de déficit acumulado de oxígeno ¹³⁸. Cuando la intensidad del ejercicio es máxima o supramáxima, el aporte de energía se realiza a través de la síntesis de ATP y existe una acumulación intracelular de H^+ que puede provocar una reducción en la potencia generada. Esto sería debido a una inhibición de la enzima fosfofruktoquinasa (PFK) enlenteciendo la glucólisis y la producción de energía ¹³⁹ con una consecuente afectación de la contracción muscular disminuyendo la fuerza contractil ¹²⁴. Este aspecto ha sido

comprobado mecánicamente a través de la medición de la actividad mioeléctrica del músculo comparando condiciones de hipoxia y normoxia, y se ha reportado que existe una reducción de la actividad eléctrica muscular en hipoxia. Un estudio ha reportado como durante un ejercicio hasta el agotamiento, la fatiga en normoxia se alcanzaba a los 8 minutos, mientras que se reducía en hipoxia severa (2 minutos) y moderada (4 minutos) se reducía ⁶⁰. Este hecho podría explicarse por un descenso en el reclutamiento de unidades motoras producido por una acumulación de fatiga a nivel periférico (acumulación de metabolitos fruto de la glucólisis anaeróbica) y central (sistema nervioso).

Para comprobar el **rendimiento físico** anaeróbico, realizamos dos estudios en los cuales valoramos la capacidad de trabajo y el índice de fatiga. Ambos estudios adolecen de las limitaciones metodológicas debidas a que no se ha dispuesto de ningún tipo de financiación o subvención para la realización de la presente tesis doctoral. En el primer estudio, el diseño del programa de entrenamiento fue específicamente encaminado a entrenar las extremidades inferiores (sentadillas, sentadillas con salto y saltos) combinando diferentes tipos de fuerza (resistencia y explosiva), posteriormente al entrenamiento valoramos la capacidad de resistencia a la fuerza explosiva (midiendo la altura media de los saltos continuos durante 60 segundos). Este test fue descrito por Bosco ¹⁴⁰ y se ha considerado válido en la medición de la capacidad anaeróbica ^{141,142}. Los resultados obtenidos mostraron una importante mejora después del programa realizado en hipoxia y específicamente esta mejora fue muy clara en el último tramo del test (40 a 60 segundos) cuando el efecto de la fatiga es más patente. Después de estos resultados cuestionamos la aplicación de esta mejora en un movimiento o ciclo específico (zancada en carrera) y diseñamos otro estudio de similar orientación pero valorando el rendimiento en carrera. A diferencia del primer estudio, se programó un ciclo de entrenamiento incluyendo ejercicios de fuerza en circuito ¹⁴³ que los atletas clásicamente utilizaban durante la temporada. En este segundo estudio valoramos la capacidad anaeróbica láctica cuantificando el número de series que los deportistas eran capaces de realizar al 90% de la velocidad máxima en una distancia de 300 metros, con carácter interválico (recuperación incompleta de 3 minutos entre series). Este rendimiento fue medido antes y después de realizar el programa de fuerza y los deportistas no realizaron ningún entrenamiento complementario. Igual que en el primer estudio, encontramos mejoras significativas en la capacidad de realizar más series hasta

el agotamiento a la intensidad descrita. Es importante destacar que nuestros resultados concuerdan con otros estudios que también reportaron mejoras del rendimiento anaeróbico después de protocolos de entrenamiento en condiciones de hipoxia intermitente ^{144,145}. Por el contrario, esto no sucede cuando la intensidad de entrenamiento en hipoxia es proporcionalmente menor en comparación con normoxia ^{30,146}.

La valoración de la intensidad de ejercicio en hipoxia (en comparación con normoxia) es esencial para objetivar e *individualizar* la carga de entrenamiento. Para comprobar este aspecto, realizamos otro estudio en el cual observamos que no habían diferencias en la potencia generada (máxima y media) entre condiciones de hipoxia (moderada; 2500m y severa; 4000m) y normoxia. Este hecho ha sido confirmado por otros estudios donde también se han reportado mínimas reducciones en el rendimiento anaeróbico en condiciones de hipoxia ^{147,148}. Pese a estos esperanzadores resultados, deberíamos destacar varios aspectos:

1) En el estudio descrito por Calbet (2003), se destacaron diferencias entre deportistas de diferentes disciplinas deportivas (de resistencia o esprinters). Teniendo en cuenta el principio de individualidad del entrenamiento deportivo sería importante objetivar esta premisa. Pese a ello, el estudio citado concluyó que en hipoxia tanto esprinters como ciclistas de resistencia, requerían una contribución energética de la vía anaeróbica mayor para compensar la reducción en la producción de ATP por vía aeróbica. Recientemente, Bowtell ³⁵ también ha confirmado esta conclusión, mostrando como el rendimiento máximo durante 6 segundos en series interválicas (recuperación incompleta de 30 segundos) no empeora en condiciones de hipoxia (comparando entre diferentes FiO_2 (21% al 13%).

2) Pese a que existe bastante acuerdo sobre la posibilidad de mantener la intensidad de esfuerzo máximo en hipoxia (corta duración), las mediciones de lactato en estos estudios muestran datos dispares que dificultan la comprensión de la implicación metabólica anaeróbica. La causa para estas discrepancias podría tener relación con la confección de los protocolos de entrenamiento en aspectos como la duración, intensidad, tipo de ejercicio realizado, test utilizados y tiempos de recuperación entre esfuerzos que facilitarían o dificultarían la recuperación de la vía glucolítica llevando a generar mayores o menores niveles de lactato. En nuestra investigación encontramos valores equivalentes

de lactato entre hypoxia y normoxia (~7 mM) pero inferiores a los descritos por Bowtell (~11-12 mM). La recuperación entre series interválicas en nuestro estudio fue de 3 minutos (para 15 segundos de intensidad de ejercicio) mientras que en el estudio de Bowtell sólo recuperaban 30 segundos (para 6 segundos de intensidad máxima). Podría especularse que el tiempo de recuperación entre series determina en parte la intensidad subjetiva del esfuerzo y la implicación metabólica.

3) Existen relativamente pocos estudios que hayan comprobado específicamente el rendimiento anaeróbico después de programas activos en hipoxia. En muchos casos se ha evaluado como una medida complementaria a la capacidad aeróbica (VO_{2max}) y los resultados con resultados son contradictorios, describiendo incrementos mínimos¹⁴⁹⁻¹⁵¹ o significativos¹⁵² del VO_{2max} . En cambio, cuando se ha evaluado la capacidad de trabajo (la capacidad de acumular más volumen de trabajo) muchos estudios coinciden en su mejora después de programas de corta duración entrenando en hipoxia intermitente (Terrados, 1990) (Benoit H, 1992). Esta mejora ha sido también observada en nuestro segundo estudio, en la cuál hubo un aumento significativo de la capacidad de realizar más series hasta el agotamiento (en normoxia un 33% (de 21 a 28 series pre-post entrenamiento) y en hipoxia un 53,8% (de 26 a 40 pre-post entrenamiento)).

4) Parece comprobado que el entrenamiento intermitente en hipoxia no mejora la capacidad de máxima potencia (p.ej. máxima altura de salto en un único salto o mejora del tiempo máximo (100%) en la serie de 300m). Nuestros resultados no aportaron mejoras en este aspecto en línea con Geiser¹⁵³, que describió solo mejoras en la capacidad de mantenimiento de la potencia y la capacidad oxidativa muscular.

Es difícil valorar específicamente los parámetros de mejora del rendimiento anaeróbico después de protocolos de entrenamiento en hipoxia intermitente debido a las diferencias en las mediciones descritas. Sin embargo, existe un rango promedio de mejora que comprende el 3-5% en diferentes deportes empleando hipoxia activa¹⁵⁴ y pasiva^{120,155}. En comparación con estos datos, nuestros estudios muestran un incremento del 6,75% en la altura media desarrollada durante 60 segundos de saltos a máxima intensidad y un 20,5% más en el número total de series realizadas hasta el agotamiento. Pese a este incremento, los datos de más utilidad práctica son los encontrados en el mejor rendimiento en la última parte del test de 60 segundos cuando el metabolismo anaeróbico láctico es determinante (desde los 40 a los 60 segundos en el estudio de

saltos y más series hasta el agotamiento en todos los sujetos del grupo hipoxia). Ogura et al ³³, también apuntó esta mejora durante la última fase de un test de Wingate (de los 20 a los 40 segundos) posiblemente por una mejora significativa de la contribución anaeróbica. Este mantenimiento de la intensidad en la última parte del ejercicio es muy importante en los deportes de corta duración y máxima intensidad, porque la influencia de la fatiga a nivel periférico es determinante para reducir la intensidad de ejercicio ¹⁵⁶. A nivel estadístico estos datos fueron significativos comparando ambos estudios y grupos (intervalo de 45 a 60 segundos en el test final de 60 segundos en saltos en contramovimiento; $p = 0,029$ y comparando el número de series y grupos antes y después del programa de entrenamiento; $p = 0,03$).

En base a los resultados obtenidos, podemos especular que el mayor nivel de intensidad alcanzado durante los entrenamientos en hipoxia contribuyó a tolerar un mayor nivel de fatiga periférica ^{56,58,157} y contribuir a mejorar la capacidad amortiguadora del pH muscular ¹⁵⁸. Esta premisa había sido descrita anteriormente por Daniels ¹⁵⁹. Mecánicamente, podría ser que existiera una mejora en los parámetros de fuerza y potencia muscular disminuyendo el rango de afectación de la fatiga a nivel muscular ¹⁶⁰ y la mayor capacidad de activación de las enzimas glucolíticas durante el rendimiento anaeróbico ¹⁶¹. En este aspecto, la medida de la **respuesta metabólica del lactato** en este tipo de ejercicios máximos nos puede aportar una descripción simple de la respuesta individual al entrenamiento ¹⁰, la intensidad del ejercicio soportada ¹⁶² y como una medida de la glucólisis acelerada ⁵. Teóricamente, a medida que la intensidad de ejercicio es proporcionalmente mayor respecto al máximo existe una mayor implicación glucolítica para generar energía y los niveles de lactato resultan en un desplazamiento de la curva de disociación de la hemoglobina hacia la derecha (efecto Bohr) ¹⁶³, permitiendo la descarga de oxígeno de la hemoglobina y una mejor captación de las células musculares desde la circulación capilar. El déficit de oxígeno alcanzado en hipoxia se incrementa con el ejercicio de alta intensidad y el ritmo de ajuste de entrega del oxígeno desde los capilares, y en última instancia a la mitocondria, es insuficiente para compensar el aumento del metabolismo oxidativo ¹⁶⁴. En compensación existe un mayor consumo de fosfágenos y una acumulación mayor de lactato ¹⁶⁵ que puede provocar respuestas positivas en la capacidad muscular local ¹⁶⁶ a través de una mejora de la capacidad de tamponamiento muscular ¹⁶⁷. Desafortunadamente en nuestros estudios sólo hemos valorado la respuesta del lactato siguiendo las recomendaciones de

autores como Di Prampero ¹⁶⁸ que sugirió que para valorar la máxima capacidad anaeróbica láctica era necesario valorar el máximo nivel de lactato alcanzado en la última serie del ejercicio. Los niveles de lactato que observamos en el segundo estudio con corredores (series de 300m), describieron un aumento en las concentraciones de lactato al finalizar las series (individual y grupal) en el test posterior al programa de fuerza en ambos grupos ($14,6 \pm 1,6$ mmol/L para el grupo entrenado en normoxia y $15,7 \pm 1,3$ mmol/L para el grupo que entrenó en altitud simulada) en comparación con los datos alcanzados antes del protocolo ($12,5 \pm 0,9$ mmol/L en el grupo control y $11,8 \pm 1$ mmol/L para el grupo hipoxia). Estos resultados describen proporcionalmente un incremento del 16,8% en el grupo normoxia y un 24,9% del grupo hipoxia. Estos datos podrían describir diferentes mejoras específicas ^{7,162} a los siguientes niveles: a) en los procesos de producción de energía por vía anaeróbica, b) en una mayor tolerancia a altos niveles de metabolitos y c) mejoras en los procesos de aclaramiento, resíntesis y tamponamiento muscular. Otros estudios similares han descrito también las siguientes mejoras: mejoras en la capacidad oxidativa enzimática ^{66,67,169}, una mayor expresión de enzimas glucolíticas, del factor angiogénico (VEGF), con una mayor activación de la mioglobina, un aumento de la capilarización y del contenido mitocondrial en paralelo a una inducción del sistema HIF-1 pueden provocar mejoras en el rendimiento anaeróbico ¹⁷⁰.

Otro aspecto comprobado en nuestro trabajo fue que **la saturación arterial de oxígeno** disminuía durante el ejercicio anaeróbico en hipoxia provocando un déficit de oxígeno mayor que en normoxia, que principalmente podrían ser consecuencia del deterioro de la capacidad de absorción de oxígeno y la reducción de la capacidad aeróbica ^{171,172}. Manteniendo el mismo carácter e intensidad de esfuerzo, en comparación con normoxia ($\text{SaO}_2 = 96,75\% \pm 1,9$), en hipoxia hubo una disminución del contenido arterial de oxígeno ($\text{FiO}_2 = 16,5\%$; $\text{SaO}_2 = 90,7\% \pm 3,8$ y $\text{FiO}_2 = 13,5$; $\text{SaO}_2 = 81,5\% \pm 4,6$) pudiéndose relacionar con un aumento de la extracción de oxígeno por el músculo. Pese a este descenso en la SaO_2 el rendimiento no disminuyó, en esta línea Bedu también describió una similar respuesta valorando ejercicios de fuerza a 3700m ¹⁷³. Esta medida podría tener más impacto para valorar el rendimiento aeróbico ¹⁷⁴, dado que la hiperventilación inducida por los quimiorreceptores ventilatorios periféricos ¹⁷⁵ y el aumento del gasto cardiaco no logran cubrir esta demanda aeróbica reduciendo a la vez la oxigenación muscular ¹⁷⁶.

Pese a que el entrenamiento de alta intensidad (incluyendo el entrenamiento de fuerza) y las condiciones de hipoxia crean respuestas fisiológicas cardíacas, estas serán diferentes en función del tipo de entrenamiento realizado y el carácter de esfuerzo máximo o submáximo mantenido. El entrenamiento de resistencia aeróbica a máximas intensidades y volúmenes incrementa las dimensiones internas del ventrículo izquierdo y el grosor de la pared cardíaca relacionándose con un mayor volumen y diámetro interno ¹⁷⁷. Por contra, el entrenamiento de fuerza aumenta la presión sanguínea y la **frecuencia cardíaca** incluso más que los ejercicios dinámicos (correr, nadar) aunque puede reducir el diámetro interno del corazón debido a un mayor grosor del músculo cardíaco ¹⁷⁸. Sería lógico pensar en la incompatibilidad de mejorar la capacidad de resistencia aeróbica realizando conjuntamente un trabajo de fuerza que pueda engrosar el corazón y reducir los volúmenes cardiacos totales. Sin embargo, los deportes de resistencia realizan un entrenamiento de fuerza que incluye ejercicios muy específicos y transferidos al movimiento específico involucrando grandes masas musculares y zonas corporales ². Este tipo de entrenamiento tiene por objetivo estimular el sistema muscular y nervioso a la vez para obtener una mejora de la coordinación intra e intermuscular para mejorar la eficacia y eficiencia energética (economía energética). En condiciones de hipoxia, la respuesta cardíaca realizando ejercicio de carácter moderado ¹⁷⁹ o máximo ¹⁸⁰ aumenta en comparación con las condiciones de normoxia debido a un aumento de las catecolaminas circulantes ¹⁸¹ y una mayor activación del sistema nervioso simpático ^{164,182}. Este proceso se transfiere en una recuperación entre series más enlentecida y a una menor diferencia arteriovenosa de oxígeno que estimula los quimiorreceptores periféricos contribuyendo a un aumento del gasto cardíaco ¹⁸⁰. El incremento relativo de la frecuencia cardíaca en hipoxia ocurre en niveles submáximos de ejercicio independiente del grado de intensidad del ejercicio. Sin embargo, durante ejercicio máximo, tal como ha sido descrito y nosotros constatamos en nuestros estudios, no se alcanzan valores tan elevados como en normoxia pudiendo ser debido a una mayor inhibición de las catecolaminas circulantes ¹⁶⁴ y la activación del sistema nervioso simpático ¹⁸³. Aunque los valores máximos alcanzados en la frecuencia cardíaca fueron menores en el grupo que entrenó en hipoxia (HIP: pre-hipoxia $180,4 \pm 11,8$ ppm y post-hipoxia $178,8 \pm 12,5$ ppm; NOR: pre-normoxia $179,9 \pm 11,1$ ppm y post-normoxia $184 \pm 11,4$ ppm), describió mejoras en el índice de recuperación de la frecuencia cardíaca máxima durante los 3 minutos posteriores a la finalización del test. Esta respuesta puede ser debida a una mejora en la regulación simpatico-vagal y

valorada como un marcador de la actividad parasimpática¹⁸⁴, de la condición física¹⁸⁵, de la función del sistema nervioso autónomo¹⁸⁴ y ser un marcador valioso de la función cardíaca¹⁸⁶. En un sentido más clínico, esta metodología podría provocar una modulación nerviosa de la frecuencia cardíaca pudiendo ser útil en personas que precisen mejorar su regulación cardíaca y tuvieran dificultades para realizar un tipo de ejercicio más dinámico (correr, ciclismo...). Este aspecto fue comprobado en un estudio con futbolistas lesionados en los cuales aplicamos un programa de entrenamiento de fuerza (vibraciones mecánicas) en condiciones de hipoxia durante su estado de lesión. Observamos que después del programa realizado los deportistas reportaron mejores valores en el índice de recuperación de la frecuencia cardíaca indicando un mantenimiento de la condición física mayor que realizando el mismo entrenamiento en normoxia. Esta metodología de entrenamiento podría incidir directamente sobre el tono vascular de los pulmones, incrementar la ventilación y la actividad neural simpática debido a la estimulación de los quimiorreceptores periféricos¹⁸⁷.

El análisis de la **variabilidad de la frecuencia cardíaca** (VFC) se ha utilizado como un método no invasivo que describe el control de la función nerviosa autónoma^{188,189}, la regulación del tono vagal¹⁹⁰ e incluso como herramienta para regular las cargas de entrenamiento en deportistas¹⁹¹. Nosotros valoramos el efecto que una sesión de entrenamiento de potencia en hipoxia y normoxia podría provocar en estos parámetros (24 horas post entrenamiento) y analizar el posible uso de esta medición en la individualización de la carga de entrenamiento. Pese a que previamente habíamos encontrados mejoras de la regulación parasimpática después del entrenamiento de fuerza en hipoxia (estudio 1), no encontramos ninguna diferencia en los parámetros de la frecuencia cardíaca que indicaran síntomas de mayor fatiga debida al efecto de la hipoxia. La valoración de la variabilidad cardíaca se ha utilizado para monitorizar la fatiga aguda o crónica después de ciclos de entrenamiento o como medida diaria, reflejando específicamente el equilibrio del sistema nervioso autónomo^{192,193}. Nuestros resultados no describen cambios destacables en la VFC después de 24h de recuperación de un entrenamiento máximo a diferentes altitudes, indicando que no existe modificación significativa cuando la fatiga acumulada no es alta¹⁹⁴. A la vez, no se han descrito relaciones lineales entre ésta y modificaciones en la variabilidad de la frecuencia cardíaca¹⁹⁵. La monitorización de la frecuencia cardíaca basal durante el programa de entrenamiento no se consideró adecuado porque actualmente existe gran

controversia sobre su fiabilidad debido a la alta amplitud de variación y su dependencia de otros factores emocionales o ambientales ¹⁹⁶. Por ello, sería recomendable ajustar individualmente la medida de la VFC en función del protocolo realizado: fatiga acumulada (largo plazo: 24-72 h) o efecto de una carga realizada de manera independiente (un único entrenamiento) (monitorización durante las 12 horas siguientes al ejercicio).

El entrenamiento deportivo, desde sus inicios formativos a su más alto nivel, incrementa el nivel de especificidad e intensidad de carga requerida durante el tiempo. El principio de individualización del entrenamiento orienta la elección de los métodos aportados al deportista para su mejora continua y prestación física-deportiva. Los métodos de entrenamiento intensivo en hipoxia incrementan el estrés soportado por el organismo y aumentan este nivel de intensidad. Dependiendo de la disciplina deportiva, el uso de la hipoxia puede orientarse para ser activa, pasiva, crónica o intermitente. Desde un punto de vista comparativo, los métodos de entrenamiento en hipoxia para la mejora del rendimiento anaeróbico están mucho menos estudiados y aplicados que para el rendimiento aeróbico. Aún así, en base a los resultados obtenidos por nuestros estudios y a un minucioso análisis de la bibliografía disponible podemos sugerir que es un método válido y menos susceptible a las variaciones individuales que el rendimiento dependiente del metabolismo aeróbico. Para mejorar la aplicación de los métodos de exposición y entrenamiento en hipoxia, deberían estandarizarse los protocolos de estudio respetando diferentes parámetros como: 1) la altitud de exposición, 2) la duración de las sesiones, 3) los ejercicios específicos a realizar en cada deporte, 4) el tiempo de separación entre sesiones de entrenamiento en hipoxia y competición, 5) el entrenamiento complementario en métodos de hipoxia intermitente activa y 6) estandarizar los parámetros de medición de las respuestas fisiológicas específicas.

En resumen, podemos afirmar que durante la realización de ejercicio físico intenso en condiciones de hipoxia se experimenta un mayor estrés incrementando a la vez el nivel de estimulación soportado a diferentes niveles sistémicos. En respuesta a estas condiciones, el organismo desarrolla estrategias para compensar la menor disponibilidad de oxígeno a nivel muscular y en sus respuestas asociadas. En deportistas entrenados, estos ajustes cumplen claramente los principios de especificidad e intensidad descritos en la teoría del entrenamiento ¹, ya que aumentan tanto la intensidad como la especificidad del metabolismo implicado para generar energía (anaeróbico). En nuestros

estudios, la realización de un programa de fuerza en condiciones de hipoxia intermitente ha estado acompañada de ajustes a nivel metabólico y del sistema nervioso autónomo que han contribuido a provocar mejoras en el rendimiento anaeróbico. Por ello, podemos concluir que los reajustes fisiológicos desencadenados por este programa de entrenamiento pueden ser utilizados como método de entrenamiento para mejorar el rendimiento anaeróbico y durante procesos de readaptación física. Estos ajustes se relacionan con una mayor capacidad de implicar el metabolismo anaeróbico durante el ejercicio máximo, una mejora en los procesos de recuperación de la frecuencia cardíaca entre ejercicios máximos y posiblemente también a una mayor tolerancia percibida durante el esfuerzo. Teniendo en cuenta que el entrenamiento de fuerza es común en la preparación deportiva y la rehabilitación física, este método podría tener potenciales aplicaciones para incrementar el rendimiento físico y la salud.

CONCLUSIONES

- 1- Un programa de entrenamiento de fuerza resistencia (extremidades inferiores) de 12 sesiones de duración en hipoxia hipobárica (18 horas de exposición) ha mostrado ser un estímulo más eficaz que el mismo programa realizado en normoxia para mejorar la capacidad de recuperación de la frecuencia cardíaca después de un ejercicio máximo de 60 segundos.
- 2- El protocolo descrito en el punto 1 mejoró la capacidad de mantener un promedio de altura de salto mayor durante 60 segundos de saltos continuos. Durante el test los sujetos que entrenaron en hipoxia mostraron resultados significativamente mejores en el rendimiento durante todos los intervalos valorados (0-15, 15-30, 30-45 y 45-60 segundos) en comparación con el grupo que entrenó en normoxia. Esta mejora fue claramente mayor en la última parte del test (45-60 segundos) cuando la fatiga era mayor.
- 3- No observamos que las condiciones de hipoxia (moderada y severa) provocaran un descenso en la capacidad de generar potencia de fuerza durante saltos continuos (15 segundos). Sin embargo, durante hipoxia severa (4000m) observamos como la SaO₂ describió una tendencia claramente descendiente a medida que la fatiga aumentaba. Este descenso fue mayor también en hipoxia moderada en comparación con normoxia.
- 4- Los niveles de lactato asociados al ejercicio de fuerza resistencia en hipoxia pueden ser estadísticamente similares si el tiempo de recuperación entre ejercicios de carácter anaeróbico es suficiente para permitir una recuperación de la vía energética.
- 5- Después de realizar un programa de entrenamiento en hipoxia de fuerza en circuito (3000m durante 4 semanas y 12 sesiones), un grupo de corredores entrenados mejoró su capacidad de realizar un mayor número de series hasta el agotamiento en un test de carácter anaeróbico intermitente. Esta mejora fue correlacionó con un nivel más elevado de lactato acumulado al finalizar la última serie. Estas mejoras fueron claramente mejores que las reportadas por un grupo que entrenó en normoxia en igualdad de condiciones.

BIBLIOGRAFIA

1. Weineck J. *Optimales Training*. 14. Auflage, Balingen: Spitta Verlag. 2004:777. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Optimales+Training.+14#1>.
2. Izquierdo M, Hakkinen K, Gonzalez-Badillo JJ, Ibanez J, Gorostiaga EM. Effects of long-term training specificity on maximal strength and power of the upper and lower extremities in athletes from different sports. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2002;87(3):264–271.
3. Rusko HK, Tikkanen HO, Peltonen JE. Altitude and endurance training. *J. Sports Sci.* 2004;22(10):928–44; discussion 945.
4. Komi P V, Rusko H, Vos J, Vihko V. Anaerobic performance capacity in athletes. *Acta Physiol. Scand.* 1977;100:107–114.
5. Hill A V., Long CNH, Lupton H. Muscular Exercise, Lactic Acid and the Supply and Utilisation of Oxygen. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 1924;97:155–176.
6. Margaria R, Edwards HT, Dill DB. The possible mechanisms of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction. *Am. J. Physiol.* 1933; 106: 689–715.
7. Green S, Dawson B. Measurement of anaerobic capacities in humans. Definitions, limitations and unsolved problems. *Sports Med.* 1993;15(5):312–327.
8. Noakes TD. The Central Governor Model in 2012: eight new papers deepen our understanding of the regulation of human exercise performance. *Br. J. Sports Med.* 2012;46:1–3.
9. Burke LM, Claassen A, Hawley JA, Noakes TD. Carbohydrate intake during prolonged cycling minimizes effect of glycemic index of preexercise meal. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985)*. 1998;85(6):2220–2226.
10. Vandewalle H, Peres G, Monod H. Standard anaerobic exercise tests. *Sports Med.* 1987;4(4):268–289.
11. Bangsbo J, Graham TE, Kiens B, Saltin B. Elevated muscle glycogen and anaerobic energy production during exhaustive exercise in man. *J. Physiol.* 1992;451:205–227.
12. Wadley GD, Lee-Young RS, Canny BJ, et al. Effect of exercise intensity and hypoxia on skeletal muscle AMPK signaling and substrate metabolism in humans. *Am. J. Physiol. Metab.* 2006;290(4):E694–702.

13. Parolin ML, Chesley A, Matsos MP, Spriet LL, Jones NL, Heigenhauser GJ. Regulation of skeletal muscle glycogen phosphorylase and PDH during maximal intermittent exercise. *Am. J. Physiol.* 1999;277(5 Pt 1):E890–900.
14. Parolin ML, Spriet LL, Hultman E, Hollidge-Horvat MG, Jones NL, Heigenhauser GJ. Regulation of glycogen phosphorylase and PDH during exercise in human skeletal muscle during hypoxia. *Am. J. Physiol. Metab.* 2000;278(3):E522–34.
15. Rowell LB, Blackmon JR, Kenny MA, Escourrou P. Splanchnic vasomotor and metabolic adjustments to hypoxia and exercise in humans. *Am. J. Physiol.* 1984;247(2 Pt 2):H251–8.
16. Kjaer M, Hanel B, Worm L, et al. Cardiovascular and neuroendocrine responses to exercise in hypoxia during impaired neural feedback from muscle. *Am. J. Physiol.* 1999;277(1 Pt 2):R76–85.
17. Hespel P, Vergauwen L, Vandenberghe K, Richter EA. Important role of insulin and flow in stimulating glucose uptake in contracting skeletal muscle. *Diabetes.* 1995;44(2):210–215.
18. Knuttgen HG KP V. Basic considerations for exercise. In: Komi P V, ed. *Strength and power in sport*. Vol 2nd ed. UK: Blackwell science ltd; 2003:4.
19. Komi P V. Strength and Power in Sport. *IOC Med. Comm. Publ.* 2003;3.
20. Bangsbo J. Energy demands in competitive soccer. *J. Sports Sci.* 1994;12 Spec No:S5–12.
21. Mohr M, Krustrup P, Bangsbo J. Fatigue in soccer: a brief review. *J. Sports Sci.* 2005;23(6):593–599.
22. Paavolainen L, Hakkinen K, Hamalainen I, Nummela A, Rusko H. Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1999;86(5):1527–1533.
23. Bailey DM, Davies B. Physiological implications of altitude training for endurance performance at sea level: a review. *Br. J. Sports Med.* 1997;31(3):183–190.
24. Bonetti DL, Hopkins WG. Sea-level exercise performance following adaptation to hypoxia: a meta-analysis. *Sports Med.* 2009;39(2):107–127.
25. Levine BD, Stray-Gundersen J. A practical approach to altitude training: where to live and train for optimal performance enhancement. *Int. J. Sports Med.* 1992;13 Suppl 1:S209–12.
26. Salgado R. The effects of hypoxic manipulation on sea-level performance and VO₂max: a meta-analysis. 2010.

27. Neubauer JA. Invited review: Physiological and pathophysiological responses to intermittent hypoxia. *J. Appl. Physiol.* 2001;90:1593–1599.
28. Faiss R, Leger B, Vesin JM, et al. Significant molecular and systemic adaptations after repeated sprint training in hypoxia. *PLoS One.* 2013;8(2):e56522.
29. Galvin HM, Cooke K, Sumners DP, Mileva KN, Bowtell JL. Repeated sprint training in normobaric hypoxia. *Br. J. Sports Med.* 2013;47 Suppl 1:i74–i79.
30. Truijens MJ, Toussaint HM, Dow J, Levine BD. Effect of high-intensity hypoxic training on sea-level swimming performances. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 2003;94(2):733–743.
31. Faiss R, Girard O, Millet GP. Advancing hypoxic training in team sports: from intermittent hypoxic training to repeated sprint training in hypoxia. *Br. J. Sports Med.* 2013;47 Suppl 1:i45–i50.
32. Calbet JA, De Paz JA, Garatachea N, Cabeza de Vaca S, Chavarren J. Anaerobic energy provision does not limit Wingate exercise performance in endurance-trained cyclists. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 2003;94(2):668–676.
33. Ogura Y, Katamoto S, Uchimar J, Takahashi K, Naito H. Effects of low and high levels of moderate hypoxia on anaerobic energy release during supramaximal cycle exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2006;98(1):41–47.
34. Friedmann B, Frese F, Menold E, Bartsch P. Effects of acute moderate hypoxia on anaerobic capacity in endurance-trained runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2007;101(1):67–73.
35. Bowtell JL, Cooke K, Turner R, Mileva KN, Sumners DP. Acute physiological and performance responses to repeated sprints in varying degrees of hypoxia. *J. Sci. Med. Sport.* 2013.
36. Wortman MD. Training variables of the live low-train high training model: a meta-analysis. 2011.
37. Conkin J, Wessel 3rd JH. Critique of the equivalent air altitude model. *Aviat. Space. Environ. Med.* 2008;79(10):975–982.
38. Bligh J, Johnson KG. Glossary of terms for thermal physiology. *J. Appl. Physiol.* 1973;35(6):941–961.
39. Millet GP, Faiss R. Hypoxic conditions and exercise-to-rest ratio are likely paramount. *Sports Med.* 2012;42(12):1081–1085.
40. Millet GP, Faiss R, Pialoux V. Point: Hypobaric hypoxia induces different physiological responses from normobaric hypoxia. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 2012;112(10):1783–1784.

41. Hendriksen IJ, Meeuwse T. The effect of intermittent training in hypobaric hypoxia on sea-level exercise: a cross-over study in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2003;88(4-5):396–403.
42. Mazzeo RS. Physiological responses to exercise at altitude: an update. *Sports Med.* 2008;38(1):1–8.
43. Wehrlin JP, Hallen J. Linear decrease in $\dot{V}O_{2\max}$ and performance with increasing altitude in endurance athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2006;96(4):404–412.
44. Niermeyer S, Moore LG, ZS. High altitude: An exploration of human adaptation. In: Hornbein TF, SRB, ed. *The People*. New York: Marcel Dekker; 2001:43–100.
45. Bakonyi T, RZ. High Altitude and free radicals. *J Sport. sci med.* 2004;(3):64–69.
46. Gilbert DL. The first documented report of mountain sickness: the China or Headache Mountain story. *Respir. Physiol.* 1983;52(3):315–326.
47. Pugh LG, Gill MB, Lahiri S, Milledge JS, Ward MP, West JB. Muscular Exercise at Great Altitudes. *J. Appl. Physiol.* 1964;19:431–440.
48. Sutton J, Young JD, Lazarus L, Hickie JB, Garmendia F, Velasquez T. Hormonal response to altitude. *Lancet.* 1970;2(7684):1194.
49. Xing G, Qualls C, Huicho L, et al. Adaptation and mal-adaptation to ambient hypoxia; Andean, Ethiopian and Himalayan patterns. *PLoS One.* 2008;3(6):e2342.
50. Dejours P, Kellogg P, Pace N. Regulation of respiration and heart rate response in exercise during altitude acclimatization. *J. Appl. Physiol.* 1963;18:10–18.
51. Truijens MJ. Altitude and hypoxic training in swimming. In: Seifert L, Chollet D, Mujika I, eds. *World Book of Swimming: from science to performance*. Nova science publishers, Inc.; 2010:393–408.
52. Baker AJ, Kostov KG, Miller RG, Weiner MW. Slow force recovery after long-duration exercise: metabolic and activation factors in muscle fatigue. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1993;74(5):2294–2300.
53. Kent-Braun JA. Central and peripheral contributions to muscle fatigue in humans during sustained maximal effort. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1999;80(1):57–63.
54. Miller RG, Giannini D, Milner-Brown HS, et al. Effects of fatiguing exercise on high-energy phosphates, force, and EMG: evidence for three phases of recovery. *Muscle Nerve.* 1987;10(9):810–821.

55. Enoka RM. Mechanisms of muscle fatigue: Central factors and task dependency. *J. Electromyogr. Kinesiol.* 1995;5(3):141–149.
56. Noakes TD, Peltonen JE, Rusko HK. Evidence that a central governor regulates exercise performance during acute hypoxia and hyperoxia. *J. Exp. Biol.* 2001;204(Pt 18):3225–3234.
57. Vybiral S, Lesna I, Jansky L, Zeman V. Thermoregulation in winter swimmers and physiological significance of human catecholamine thermogenesis. *Exp. Physiol.* 2000;85(3):321–326.
58. Amann M, Eldridge MW, Lovering AT, Stickland MK, Pegelow DF, Dempsey JA. Arterial oxygenation influences central motor output and exercise performance via effects on peripheral locomotor muscle fatigue in humans. *J. Physiol.* 2006;575(Pt 3):937–952.
59. Boushel R, Calbet JA, Radegran G, Sondergaard H, Wagner PD, Saltin B. Parasympathetic neural activity accounts for the lowering of exercise heart rate at high altitude. *Circulation.* 2001;104(15):1785–1791.
60. Amann M, Pegelow DF, Jacques AJ, Dempsey JA. Inspiratory muscle work in acute hypoxia influences locomotor muscle fatigue and exercise performance of healthy humans. *Am. J. Physiol. Integr. Comp. Physiol.* 2007;293(5):R2036–45.
61. Subudhi AW, Olin JT, Dimmen AC, Polaner DM, Kayser B, Roach RC. Does cerebral oxygen delivery limit incremental exercise performance? *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 2011;111(6):1727–1734.
62. Goodall S, González-Alonso J, Ali L, Ross EZ, Romer LM. Supraspinal fatigue after normoxic and hypoxic exercise in humans. *J. Physiol.* 2012;590:2767–82.
63. Levine BD. Intermittent hypoxic training: fact and fancy. *High Alt. Med. Biol.* 2002;3(2):177–193.
64. Rusko HK. Measurement of maximal and submaximal anaerobic power: an introduction. *Int. J. Sports Med.* 1996;17 Suppl 2:S89–90.
65. Banchero N. Cardiovascular responses to chronic hypoxia. *Annu. Rev. Physiol.* 1987;49:465–476.
66. Terrados N, Melichna J, Sylven C, Jansson E, Kaijser L. Effects of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1988;57(2):203–209.
67. Terrados N, Jansson E, Sylven C, Kaijser L. Is hypoxia a stimulus for synthesis of oxidative enzymes and myoglobin? *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1990;68(6):2369–2372.

68. Desplanches D, Hoppeler H, Linossier MT, et al. Effects of training in normoxia and normobaric hypoxia on human muscle ultrastructure. *Pflugers Arch.* 1993;425(3-4):263–267.
69. Melissa L, MacDougall JD, Tarnopolsky MA, Cipriano N, Green HJ. Skeletal muscle adaptations to training under normobaric hypoxic versus normoxic conditions. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1997;29(2):238–243.
70. Emonson DL, Aminuddin AH, Wight RL, Scroop GC, Gore CJ. Training-induced increases in sea level VO₂max and endurance are not enhanced by acute hypobaric exposure. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1997;76(1):8–12.
71. Desplanches D, Hoppeler H, Tüscher L, et al. *Muscle tissue adaptations of high-altitude natives to training in chronic hypoxia or acute normoxia.*; 1996:1946–1951.
72. Gore CJ, Hahn AG, Scroop GC, et al. Increased arterial desaturation in trained cyclists during maximal exercise at 580 m altitude. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1996;80(6):2204–2210.
73. Gore CJ, Little SC, Hahn AG, et al. Reduced performance of male and female athletes at 580 m altitude. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1997;75(2):136–143.
74. Koistinen P, Takala T, Martikkala V, Leppaluoto J. Aerobic fitness influences the response of maximal oxygen uptake and lactate threshold in acute hypobaric hypoxia. *Int. J. Sports Med.* 1995;16(2):78–81.
75. Svedenhag J, Piehl-Aulin K, Skog C, Saltin B. Increased left ventricular muscle mass after long-term altitude training in athletes. *Acta Physiol. Scand.* 1997;161(1):63–70.
76. Bernardi L, Passino C, Serebrovskaya Z, Serebrovskaya T, Appenzeller O. Respiratory and cardiovascular adaptations to progressive hypoxia; effect of interval hypoxic training. *Eur. Heart J.* 2001;22(10):879–886.
77. Vogiatzis I, Georgiadou O, Koskolou M, et al. Effects of hypoxia on diaphragmatic fatigue in highly trained athletes. *J. Physiol.* 2007;581(Pt 1):299–308.
78. Rusko HR. New aspects of altitude training. *Am. J. Sports Med.* 1996;24(6 Suppl):S48–52.
79. Nummela A, Mero A, Stray-Gundersen J, Rusko H. Important determinants of anaerobic running performance in male athletes and non-athletes. *Int. J. Sports Med.* 1996;17 Suppl 2:S91–6.

80. Eckardt KU, Dittmer J, Neumann R, Bauer C, Kurtz A. Decline of erythropoietin formation at continuous hypoxia is not due to feedback inhibition. *Am. J. Physiol.* 1990;258(5 Pt 2):F1432–7.
81. Ge R-L, Witkowski S, Zhang Y, et al. Determinants of erythropoietin release in response to short-term hypobaric hypoxia. *J. Appl. Physiol.* 2002;92(6):2361–2367.
82. Berglund B. High-altitude training. Aspects of haematological adaptation. *Sports Med.* 1992;14(5):289–303.
83. Ingjer F, Myhre K. Physiological effects of altitude training on elite male cross-country skiers. *J. Sports Sci.* 1992;10(1):37–47.
84. Levine BD, Stray-Gundersen J. “Living high-training low”: effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1997;83(1):102–112.
85. Blegen M, Cheatham C, Caine-Bish N, Woolverton C, Marcinkiewicz J, Glickman E. The immunological and metabolic responses to exercise of varying intensities in normoxic and hypoxic environments. *J. Strength Cond. Res.* 2008;22:1638–1644.
86. Parry-Billings M, Blomstrand E, McAndrew N, Newsholme EA. A communicational link between skeletal muscle, brain, and cells of the immune system. *Int. J. Sports Med.* 1990;11 Suppl 2:S122–8.
87. Roels B, Bentley DJ, Coste O, Mercier J, Millet GP. Effects of intermittent hypoxic training on cycling performance in well-trained athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2007;101(3):359–368.
88. Geiser J, Vogt M, Billeter R, Zuleger C, Belforti F, Hoppeler H. Training high–living low: changes of aerobic performance and muscle structure with training at simulated altitude. *Int. J. Sports Med.* 2001;22(8):579–585.
89. Roberts AD, Clark SA, Townsend NE, Anderson ME, Gore CJ, Hahn AG. Changes in performance, maximal oxygen uptake and maximal accumulated oxygen deficit after 5, 10 and 15 days of live high:train low altitude exposure. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2003;88(4-5):390–395.
90. Favier R, Spielvogel H, Desplanches D, et al. Training in hypoxia vs. training in normoxia in high-altitude natives. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1995;78(6):2286–2293.
91. Zoll J, Ponsot E, Dufour S, et al. Exercise training in normobaric hypoxia in endurance runners. III. Muscular adjustments of selected gene transcripts. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 2006;100(4):1258–1266.
92. Jelkmann W, Hellwig-Burgel T. Biology of erythropoietin. *Adv. Exp. Med. Biol.* 2001;502:169–187.

93. Lahiri S, Di Giulio C, Roy A. Lessons from chronic intermittent and sustained hypoxia at high altitudes. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2002;130(3):223–233.
94. Roberts AC, Reeves JT, Butterfield GE, et al. Altitude and beta-blockade augment glucose utilization during submaximal exercise. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1996;80(2):605–615.
95. Roberts AC, Butterfield GE, Cymerman A, Reeves JT, Wolfel EE, Brooks GA. Acclimatization to 4,300-m altitude decreases reliance on fat as a substrate. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1996;81(4):1762–1771.
96. Evans AM. AMP-activated protein kinase underpins hypoxic pulmonary vasoconstriction and carotid body excitation by hypoxia in mammals. *Exp. Physiol.* 2006;91:821–827.
97. Kemp BE, Mitchelhill KI, Stapleton D, Michell BJ, Chen ZP, Witters LA. Dealing with energy demand: the AMP-activated protein kinase. *Trends Biochem. Sci.* 1999;24(1):22–25.
98. Brooks GA, Wolfel EE, Groves BM, et al. Muscle accounts for glucose disposal but not blood lactate appearance during exercise after acclimatization to 4,300 m. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1992;72(6):2435–2445.
99. Roels B, Millet GP, Marcoux CJ, Coste O, Bentley DJ, Candau RB. Effects of hypoxic interval training on cycling performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2005;37(1):138–146.
100. Katayama K, Goto K, Ishida K, Ogita F. Substrate utilization during exercise and recovery at moderate altitude. *Metabolism.* 2010;59(7):959–966.
101. Mizuno M, Juel C, Bro-Rasmussen T, et al. Limb skeletal muscle adaptation in athletes after training at altitude. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1990;68(2):496–502.
102. Hahn AG, Gore CJ. The effect of altitude on cycling performance: a challenge to traditional concepts. *Sports Med.* 2001;31(7):533–557.
103. Kurth-Kraczek EJ, Hirshman MF, Goodyear LJ, Winder WW. 5' AMP-activated protein kinase activation causes GLUT4 translocation in skeletal muscle. *Diabetes.* 1999;48(8):1667–1671.
104. Katz A, Sahlin K. Effect of decreased oxygen availability on NADH and lactate contents in human skeletal muscle during exercise. *Acta Physiol. Scand.* 1987;131(1):119–127.
105. Sahlin K. Lactate formation and tissue hypoxia. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1989;67(6):2640.

106. Kjaer M, Bangsbo J, Lortie G, Galbo H. Hormonal response to exercise in humans: influence of hypoxia and physical training. *Am. J. Physiol.* 1988;254(2 Pt 2):R197–203.
107. Lundby C, Van Hall G. Substrate utilization in sea level residents during exercise in acute hypoxia and after 4 weeks of acclimatization to 4100 m. *Acta Physiol. Scand.* 2002;176(3):195–201.
108. Noakes TD, Calbet JA, Boushel R, et al. Central regulation of skeletal muscle recruitment explains the reduced maximal cardiac output during exercise in hypoxia. *Am. J. Physiol. Integr. Comp. Physiol.* 2004;287(4):R996–9; author reply R999–1002.
109. Rees BB, Boily P, Williamson LA. Exercise- and hypoxia-induced anaerobic metabolism and recovery: a student laboratory exercise using teleost fish. *Adv. Physiol. Educ.* 2009;33(1):72–77.
110. Hoppeler H, Vogt M. Hypoxia training for sea-level performance. Training high-living low. *Adv. Exp. Med. Biol.* 2001;502:61–73.
111. Semenza GL. HIF-1: mediator of physiological and pathophysiological responses to hypoxia. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 2000;88(4):1474–1480.
112. Hochachka PW. Mechanism and evolution of hypoxia-tolerance in humans. *J. Exp. Biol.* 1998;201(Pt 8):1243–1254.
113. Baker A, Hopkins WG. *Altitude training for sea-level competition.* (Wallace MA, ed.). <http://sports.org/traintech/altitude/wgh.html>: Internet Society for Sport Science; 1998.
114. Chapman RF, Stray-Gundersen J, Levine BD. Individual variation in response to altitude training. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1998;85(4):1448–1456.
115. Levine BD, Friedman DB, Engfred K, et al. The effect of normoxic or hypobaric hypoxic endurance training on the hypoxic ventilatory response. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1992;24(7):769–775.
116. Ricart A, Casas H, Casas M, et al. Acclimatization near home? Early respiratory changes after short-term intermittent exposure to simulated altitude. *Wilderness Environ. Med.* 2000;11(2):84–88.
117. Noakes TD. Physiological models to understand exercise fatigue and the adaptations that predict or enhance athletic performance. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 2000;10(3):123–145.
118. Hoppeler H, Kleinert E, Schlegel C, et al. Morphological adaptations of human skeletal muscle to chronic hypoxia. *Int. J. Sports Med.* 1990;11 Suppl 1:S3–9.

119. Howald H, Pette D, Simoneau JA, Uber A, Hoppeler H, Cerretelli P. Effect of chronic hypoxia on muscle enzyme activities. *Int. J. Sports Med.* 1990;11 Suppl 1:S10–4.
120. Hendriksen IJ, Meeuwssen T. The effect of intermittent training in hypobaric hypoxia on sea-level exercise: a cross-over study in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2003;88(4-5):396–403.
121. 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.
122. Robertson EY, Aughey RJ, Anson JM, Hopkins WG, Pyne DB. Effects of simulated and real altitude exposure in elite swimmers. *J. Strength Cond. Res.* 2010;24(2):487–493.
123. Nummela A, Rusko H. Acclimatization to altitude and normoxic training improve 400-m running performance at sea level. *J. Sports Sci.* 2000;18(6):411–419.
124. Bonetti DL, Hopkins WG, Kilding AE. High-intensity kayak performance after adaptation to intermittent hypoxia. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 2006;1(3):246–260.
125. Gore CJ, Hopkins WG. Counterpoint: positive effects of intermittent hypoxia (live high:train low) on exercise performance are not mediated primarily by augmented red cell volume. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 2005;99(5):2055–2058.
126. Millet GP, Roels B, Schmitt L, Woorons X, Richalet JP. Combining hypoxic methods for peak performance. *Sports Med.* 2010;40(1):1–25.
127. Lawton TW, Cronin JB, McGuigan MR. Strength, power and muscular endurance exercise and elite rowing ergometer performance. *J. Strength Cond. Res.* 2012.
128. Aagaard P, Andersen JL, Bennekou M, et al. Effects of resistance training on endurance capacity and muscle fiber composition in young top-level cyclists. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 2011;21(6):e298–307.
129. Paavolainen LM, Nummela AT, Rusko HK. Neuromuscular characteristics and muscle power as determinants of 5-km running performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1999;31(1):124–130.
130. Buchheit M, Mendez-Villanueva A, Delhomel G, Brughelli M, Ahmaidi S. Improving repeated sprint ability in young elite soccer players: repeated shuttle sprints vs. explosive strength training. *J. Strength Cond. Res.* 2010;24:2715–2722.

131. Hickson RC, Dvorak BA, Gorostiaga EM, Kurowski TT, Foster C. Potential for strength and endurance training to amplify endurance performance. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985)*. 1988;65(5):2285–2290.
132. Millet GP, Jaouen B, Borrani F, Candau R. Effects of concurrent endurance and strength training on running economy and $\dot{V}O_2$ kinetics. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2002;34(8):1351–1359.
133. Hakkinen K, Kallinen M. Distribution of strength training volume into one or two daily sessions and neuromuscular adaptations in female athletes. *Electromyogr. Clin. Neurophysiol.* 1994;34(2):117–124.
134. Hakkinen K, Komi P V, Alen M. Effect of explosive type strength training on isometric force- and relaxation-time, electromyographic and muscle fibre characteristics of leg extensor muscles. *Acta Physiol. Scand.* 1985;125(4):587–600.
135. Mainwood GW, Renaud JM. The effect of acid-base balance on fatigue of skeletal muscle. *Can. J. Physiol. Pharmacol.* 1985;63(5):403–416.
136. Rusko HK, Nummela A. Measurement of maximal and submaximal anaerobic performance capacity: concluding chapter. *Int. J. Sports Med.* 1996;17 Suppl 2:S125–9.
137. Noakes TD. Implications of exercise testing for prediction of athletic performance: a contemporary perspective. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1988;20(4):319–330.
138. Gustin PB, Costill DL, Lawson DL, Krzeminski K, McConell GK. *Accumulated oxygen deficit during supramaximal all-out and constant intensity exercise.*; 1995:255–263.
139. Trivedi B, Danforth WH. Effect of pH on the kinetics of frog muscle phosphofructokinase. *J. Biol. Chem.* 1966;241:4110–4112.
140. Bosco C, Luhtanen P, Komi P V. A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1983;50(2):273–282.
141. Mcneal JL, Sands WA, Stone MH. Effects of Fatigue on Kinetic and Kinematic Variables During a 60-Second Repeated Jumps Test. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 2010;5:218–229.
142. Sands WA, McNeal JR, Ochi MT, Urbanek TL, Jemni M, Stone MH. Comparison of the Wingate and Bosco anaerobic tests. *J. Strength Cond. Res.* 2004;18(4):810–815.
143. Adamson GT. Circuit training. *Ergonomics.* 1959;2(2):183–186.

144. Faiss R, Leger B, Vesin JM, et al. Significant molecular and systemic adaptations after repeated sprint training in hypoxia. *PLoS One*. 2013;8(2):e56522.
145. Galvin HM, Cooke K, Sumners DP, Mileva KN, Bowtell JL. Repeated sprint training in normobaric hypoxia. *Br. J. Sports Med*. 2013;47 Suppl 1:i74–9.
146. Morton JP, Cable NT. Effects of intermittent hypoxic training on aerobic and anaerobic performance. *Ergonomics*. 2005;48(11-14):1535–1546.
147. McLellan TM, Kavanagh MF, Jacobs I. The effect of hypoxia on performance during 30 s or 45 s of supramaximal exercise. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol*. 1990;60(2):155–161.
148. Calbet JA, De Paz JA, Garatachea N, Cabeza de Vaca S, Chavarren J. Anaerobic energy provision does not limit Wingate exercise performance in endurance-trained cyclists. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985)*. 2003;94(2):668–676.
149. Engfred K, Kjaer M, Secher NH, et al. Hypoxia and training-induced adaptation of hormonal responses to exercise in humans. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol*. 1994;68(4):303–309.
150. 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. Occup. Physiol*. 1996;73(5):471–478.
151. Geiser J, Vogt M, Billeter R, Zuleger C, Belforti F, Hoppeler H. Training high–living low: changes of aerobic performance and muscle structure with training at simulated altitude. *Int. J. Sports Med*. 2001;22(8):579–585.
152. Robertson EY, Saunders PU, Pyne DB, Gore CJ, Anson JM. Effectiveness of intermittent training in hypoxia combined with live high/train low. *Eur. J. Appl. Physiol*. 2010;110(2):379–387.
153. Vogt M, Puntchart A, Geiser J, Zuleger C, Billeter R, Hoppeler H. Molecular adaptations in human skeletal muscle to endurance training under simulated hypoxic conditions. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985)*. 2001;91(1):173–182.
154. Hamlin MJ, Marshall HC, Hellemans J, Ainslie PN, Anglem N. Effect of intermittent hypoxic training on 20 km time trial and 30 s anaerobic performance. *Scand. J. Med. Sci. Sports*. 2010;20(4):651–661.
155. Meeuwsen T, Hendriksen IJ, Holewijn M. Training-induced increases in sea-level performance are enhanced by acute intermittent hypobaric hypoxia. *Eur. J. Appl. Physiol*. 2001;84(4):283–290.
156. Billaut F, Gore CJ, Aughey RJ. Enhancing team-sport athlete performance: is altitude training relevant? *Sports Med*. 2012;42(9):751–767.

157. Friedmann B, Bauer T, Menold E, Bartsch P. Exercise with the intensity of the individual anaerobic threshold in acute hypoxia. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2004;36(10):1737–1742.
158. Edge J, Bishop D, Goodman C. The effects of training intensity on muscle buffer capacity in females. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2006;96(1):97–105.
159. Daniels JT, Yarbrough RA, Foster C. Changes in VO₂ max and running performance with training. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1978;39(4):249–254.
160. Robinson JM, Stone MH, Johnson RL, Penland CM, Warren BJ, Lewis RD. Effects of Different Weight Training Exercise/Rest Intervals on Strength, Power, and High Intensity Exercise Endurance. *J. Strength Cond. Res.* 1995;9:216–221.
161. Fournier M, Ricci J, Taylor AW, Ferguson RJ, Montpetit RR, Chaitman BR. Skeletal muscle adaptation in adolescent boys: sprint and endurance training and detraining. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1982;14:453–456.
162. Billat VL, Hill DW, Pinoteau J, Petit B, Koralsztein JP. Effect of protocol on determination of velocity at VO₂ max and on its time to exhaustion. *Arch. Physiol. Biochem.* 1996;104(3):313–321.
163. Benesch R, Benesch R. The chemistry of the Bohr effect. *J Biol Chem.* 1961;236.
164. Engelen M, Porszasz J, Riley M, Wasserman K, Maehara K, Barstow TJ. Effects of hypoxic hypoxia on O₂ uptake and heart rate kinetics during heavy exercise. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1996;81(6):2500–2508.
165. Linnarsson D, Karlsson J, Fagraeus L, Saltin B. Muscle metabolites and oxygen deficit with exercise in hypoxia and hyperoxia. *J. Appl. Physiol.* 1974;36(4):399–402.
166. Saunders PU, Telford RD, Pyne DB, et al. Improved running economy in elite runners after 20 days of simulated moderate-altitude exposure. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 2004;96(3):931–937.
167. Gore CJ, Hahn AG, Aughey RJ, et al. Live high:train low increases muscle buffer capacity and submaximal cycling efficiency. *Acta Physiol. Scand.* 2001;173(3):275–286.
168. Di Prampero PE, Atchou G, Bruckner JC, Moia C. The energetics of endurance running. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1986;55(3):259–266.
169. Weston AR, Karamizrak O, Smith A, Noakes TD, Myburgh KH. African runners exhibit greater fatigue resistance, lower lactate accumulation, and higher oxidative enzyme activity. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1999;86(3):915–923.

170. Vogt M, Billeter R, Hoppeler H. Effect of hypoxia on muscular performance capacity: “living low--training high.” *Ther. Umschau.Revue Ther.* 2003;60(7):419–424.
171. Heubert RA, Quaresima V, Laffite LP, Koralsztein JP, Billat VL. Acute moderate hypoxia affects the oxygen desaturation and the performance but not the oxygen uptake response. *Int. J. Sports Med.* 2005;26(7):542–551.
172. Wilber RL, Holm PL, Morris DM, et al. Effect of FIO₂ on oxidative stress during interval training at moderate altitude. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2004;36(11):1888–1894.
173. Bedu M, Fellmann N, Spielvogel H, Falgairette G, Van Praagh E, Coudert J. Force-velocity and 30-s Wingate tests in boys at high and low altitudes. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1991;70(3):1031–1037.
174. Lawler J, Powers SK, Thompson D. Linear relationship between VO₂max and VO₂max decrement during exposure to acute hypoxia. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1988;64(4):1486–1492.
175. Benoit H, Busso T, Castells J, Denis C, Geysant A. Influence of hypoxic ventilatory response on arterial O₂ saturation during maximal exercise in acute hypoxia. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1995;72(1-2):101–105.
176. Katayama K, Sato Y, Morotome Y, et al. Intermittent hypoxia increases ventilation and Sa(O₂) during hypoxic exercise and hypoxic chemosensitivity. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 2001;90(4):1431–1440.
177. Pluim BM, Zwinderman AH, Laarse A Van Der, Van EE. The Athlete’s Heart: A Meta-Analysis of Cardiac Structure and Function Babette M. Pluim, Aeilko H. Zwinderman, Arnoud van der Laarse and Ernst E. van der Wall *Circulation* 2000;101;336-344. *Circulation.* 2000;101:336–344.
178. MacDougall JD, Tuxen D, Sale DG, Moroz JR, Sutton JR. Arterial blood pressure response to heavy resistance exercise. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1985;58(3):785–790.
179. Springer C, Barstow TJ, Wasserman K, Cooper DM. Oxygen uptake and heart rate responses during hypoxic exercise in children and adults. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1991;23(1):71–79.
180. Linnarsson D, Karlsson J, Fagraeus L, Saltin B. Muscle metabolites and oxygen deficit with exercise in hypoxia and hyperoxia. *J. Appl. Physiol.* 1974;36(4):399–402.
181. Escourrou P, Johnson DG, Rowell LB. Hypoxemia increases plasma catecholamine concentrations in exercising humans. *J. Appl. Physiol.* 1984;57(5):1507–1511.

182. Watanabe J, Thamilarasan M, Blackstone EH, Thomas JD, Lauer MS. Heart rate recovery immediately after treadmill exercise and left ventricular systolic dysfunction as predictors of mortality: the case of stress echocardiography. *Circulation*. 2001;104(16):1911–1916.
183. Robinson BF, Epstein SE, Beiser GD, Braunwald E. Control of heart rate by the autonomic nervous system. Studies in man on the interrelation between baroreceptor mechanisms and exercise. *Circ. Res.* 1966;19(2):400–411.
184. Ribisl PM, Gaussoin SA, Lang W, et al. Lifestyle intervention improves heart rate recovery from exercise in adults with type 2 diabetes: results from the Look AHEAD study. *J. Obes.* 2012;2012:309196.
185. Trevizani GA, Benchimol-Barbosa PR, Nadal J. Effects of age and aerobic fitness on heart rate recovery in adult men. *Arq. Bras. Cardiol.* 2012;99(3):802–810.
186. Carroll S, Marshall P, Ingle L, Borkoles E. Cardiorespiratory fitness and heart rate recovery in obese premenopausal women. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 2012;22(6):e133–9.
187. Perini R, Orizio C, Comande A, Castellano M, Beschi M, Veicsteinas A. Plasma norepinephrine and heart rate dynamics during recovery from submaximal exercise in man. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1989;58(8):879–883.
188. Kannankeril PJ, Le FK, Kadish AH, Goldberger JJ. Parasympathetic effects on heart rate recovery after exercise. *J. Investig. Med.* 2004;52(6):394–401.
189. Buchheit M, Simon C, Viola AU, Doutreleau S, Piquard F, Brandenberger G. Heart rate variability in sportive elderly: relationship with daily physical activity. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2004;36(4):601–605.
190. Povea C, Schmitt L, Brugniaux J, Nicolet G, Richalet JP, Fouillot JP. Effects of intermittent hypoxia on heart rate variability during rest and exercise. *High Alt. Med. Biol.* 2005;6(3):215–225.
191. Pichot V, Roche F, Gaspoz JM, et al. Relation between heart rate variability and training load in middle-distance runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2000;32(10):1729–1736.
192. Hayashi N, Nakamura Y, Muraoka I. Cardiac autonomic regulation after moderate and exhaustive exercises. *Ann. Physiol. Anthropol.* 1992;11(3):333–338.
193. Furlan R, Piazza S, Dell’Orto S, et al. Early and late effects of exercise and athletic training on neural mechanisms controlling heart rate. *Cardiovasc. Res.* 1993;27(3):482–488.

194. Heffernan KS, Fahs CA, Shinsako KK, Jae SY, Fernhall B. Heart rate recovery and heart rate complexity following resistance exercise training and detraining in young men. *Am. J. Physiol. Circ. Physiol.* 2007;293(5):H3180–6.
195. Javorka M, Zila I, Balharek T, Javorka K. On- and off-responses of heart rate to exercise - relations to heart rate variability. *Clin. Physiol. Funct. Imaging.* 2003;23(1):1–8.
196. Uusitalo AL, Uusitalo AJ, Rusko HK. Exhaustive endurance training for 6-9 weeks did not induce changes in intrinsic heart rate and cardiac autonomic modulation in female athletes. *Int. J. Sports Med.* 1998;19(8):532–540.
197. GW S. The effects of oxygen on the circulatory system in conditions of anoxia and asphyxia. *Can.J. Res.* 1945;23e(6):175–194.
198. Astrand PO, Astrand I. Heart rate during muscular work in man exposed to prolonged hypoxia. *J. Appl. Physiol.* 1958;13(1):75–80.
199. West JB, Lahiri S, Gill MB, Milledge JS, Pugh LG, Ward MP. Arterial oxygen saturation during exercise at high altitude. *J. Appl. Physiol.* 1962;17:617–621.
200. Cronin RF, Macintosh DJ. The effect of induced hypoxia on oxygen uptake during muscular exercise in normal subjects. *Can. J. Biochem. Physiol.* 1962;40:717–726.
201. Pugh LG. Blood Volume and Haemoglobin Concentration at Altitudes Above 18,000 Ft. (5500 M). *J. Physiol.* 1964;170:344–354.
202. Greksa LP, Haas JD, Leatherman TL, et al. Maximal aerobic power in trained youths at high altitude. *Ann. Hum. Biol.* 1982;9(3):201–209.
203. Ohyabu Y, Yoshida A, Hayashi F, et al. Ventilatory and heart rate responses to hypoxia in well-trained judo athletes. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1984;52(4):451–456.
204. Tepperman J, Tepperman HM. On the blood lactic acid response to measured exercise in hypoxic human subjects. *J. Clin. Invest.* 1948;27(2):176–186.
205. Cunningham DA, Magel JR. The effect of moderate altitude on post-exercise blood lactate. *Int. Z. Angew. Physiol.* 1970;29(1):94–100.
206. Lorentzen F V. Lactic acid in blood after various combinations of exercise and hypoxia. *J. Appl. Physiol.* 1962;17:661–664.
207. Hornbein TF. Adrenal cortical response to chronic hypoxia. *J. Appl. Physiol.* 1962;17:246–248.

208. Jones NL, Robertson DG, Kane JW, Hart RA. Effect of hypoxia on free fatty acid metabolism during exercise. *J. Appl. Physiol.* 1972;33(6):733–738.
209. Cunningham DA, Critz JB. Effect of hypoxia and physical activity on plasma enzyme levels in man. *Int. Z. Angew. Physiol.* 1972;30(4):302–308.
210. Buskirk ER, Mendez J. Nutrition, environment and work performance with special reference to altitude. *Fed. Proc.* 1967;26(6):1760–1767.
211. Grover RF, Reeves JT. Exercise performance of athletes at sea level and 3100 meters altitude. *Schweiz. Z. Sportmed.* 1966;14(1):130–148.
212. Shephard RJ. A possible deterioration in performance of short-term Olympic events at altitude. *Can. Med. Assoc. J.* 1967;97(23):1414.
213. Jokl E, Jokl P, Seaton DC. Effect of altitude upon 1968 Olympic Games running performances. *Int. J. Biometeorol.* 1969;13(3):309–311.
214. Di Prampero PE, Pinera Limas F, Sassi G. Maximal muscular power, aerobic and anaerobic, in 116 athletes performing at the XIXth olympic games in Mexico. *Ergonomics.* 1970;13(6):665–674.
215. Shephard RJ. Altitude training camps. *Br. J. Sports Med.* 1974;8(1):38–45.
216. Dempsey JA, Gledhill N, Reddan WG, Forster H V, Hanson PG, Claremont AD. Pulmonary adaptation to exercise: effects of exercise type and duration, chronic hypoxia and physical training. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1977;301:243–261.
217. Lahiri S, Kao FF, Velasquez T, Martinez C, Pezzia W. Respiration of man during exercise at high altitude: highlander vs lowlander. *Respir. Physiol.* 1970;8(3):361–375.
218. Mithoefer JC, Remmers JE, Zubieta G, Mithoefer MC. Pulmonary gas exchange in Andean natives at high altitude. *Respir. Physiol.* 1972;15(2):182–189.
219. Dempsey JA, Thomson JM, Forster H V, Cerny FC, Chosy LW. HbO₂ dissociation in man during prolonged work in chronic hypoxia. *J. Appl. Physiol.* 1975;38(6):1022–1029.
220. Boutellier U, Howald H, di Prampero PE, Giezendanner D, Cerretelli P. Human muscle adaptations to chronic hypoxia. *Prog. Clin. Biol. Res.* 1983;136:273–285.
221. Mairbaur H, Schobersberger W. Red cell O₂ transport at altitude and altitude training. *Adv. Exp. Med. Biol.* 1985;191:495–504.
222. Mairbaur H, Schobersberger W, Humpeler E, Hasibeder W, Fischer W, Raas E. Beneficial effects of exercising at moderate altitude on red cell oxygen transport and on exercise performance. *Pflugers Arch.* 1986;406(6):594–599.

223. Kjaer M, Bangsbo J, Lortie G, Galbo H. Hormonal response to exercise in humans: influence of hypoxia and physical training. *Am. J. Physiol.* 1988;254(2 Pt 2):R197–203.
224. Bigard AX, Brunet A, Guezennec CY, Monod H. Skeletal muscle changes after endurance training at high altitude. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1991;71(6):2114–2121.
225. Hoppeler H, Desplanches D. Muscle structural modifications in hypoxia. *Int. J. Sports Med.* 1992;13 Suppl 1:S166–8.
226. Ferretti G, Boutellier U, Pendergast DR, et al. Oxygen transport system before and after exposure to chronic hypoxia. *Int. J. Sports Med.* 1990;11 Suppl 1:S15–20.
227. Ingjer F, Myhre K. Physiological effects of altitude training on elite male cross-country skiers. *J. Sports Sci.* 1992;10(1):37–47.
228. Burtscher M, Nachbauer W, Baumgartl P, Philadelphia M. Benefits of training at moderate altitude versus sea level training in amateur runners. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1996;74(6):558–563.
229. Gamperl AK, Axelsson M, Farrell AP. Effects of swimming and environmental hypoxia on coronary blood flow in rainbow trout. *Am. J. Physiol.* 1995;269(5 Pt 2):R1258–66.
230. Brosnan MJ, Martin DT, Hahn AG, Gore CJ, Hawley JA. Impaired interval exercise responses in elite female cyclists at moderate simulated altitude. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 2000;89(5):1819–1824.
231. Truijens MJ, Toussaint HM, Dow J, Levine BD. Effect of high-intensity hypoxic training on sea-level swimming performances. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 2003;94(2):733–743.
232. Álvarez-Herms J, Pagès T, Viscor G, Corbi F J-SS. Lactic anaerobic capacity enhancement by explosive endurance training under simulated altitude conditions. *Sleep Breath.* 2012;16(1):247.
233. Loeppky JA, Bynum WA. Effects of periodic exposure to hypobaria and exercise on physical work capacity. *J. Sports Med. Phys. Fitness.* 1970;10(4):238–247.
234. Balsom PD, Gaitanos GC, Ekblom B, Sjodin B. Reduced oxygen availability during high intensity intermittent exercise impairs performance. *Acta Physiol. Scand.* 1994;152(3):279–285.
235. Weyand PG, Lee CS, Martinez-Ruiz R, Bundle MW, Bellizzi MJ, Wright S. High-speed running performance is largely unaffected by hypoxic reductions in aerobic power. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985).* 1999;86(6):2059–2064.

236. Calbet JA, De Paz JA, Garatachea N, Cabeza de Vaca S, Chavarren J. Anaerobic energy provision does not limit Wingate exercise performance in endurance-trained cyclists. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985)*. 2003;94(2):668–676.
237. Ogawa T, Ohba K, Nabekura Y, et al. Intermittent short-term graded running performance in middle-distance runners in hypobaric hypoxia. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2005;94(3):254–261.
238. Dufour S, Ponsot E, Zoll J, Richard R. Comments on Point:Counterpoint “Positive effects of intermittent hypoxia (live high:train low) on exercise performance are/are not mediated primarily by augmented red cell volume.” *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985)*. 2005;99(6):2455.
239. Bonetti DL, Hopkins WG, Kilding AE. High-intensity kayak performance after adaptation to intermittent hypoxia. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 2006;1(3):246–260.
240. Wood MR, M.N D, W.G. H. Running performance after adaptation to acutely intermittent hypoxia. *Eur J Sport Sci.* 2006;6:163–172.
241. Friedmann B, Frese F, Menold E, Bartsch P. Effects of acute moderate hypoxia on anaerobic capacity in endurance-trained runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2007;101(1):67–73.
242. 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.
243. Hamlin MJ, Marshall HC, Hellemans J, Ainslie PN, Anglem N. Effect of intermittent hypoxic training on 20 km time trial and 30 s anaerobic performance. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 2010;20(4):651–661.
244. Robertson EY, Saunders PU, Pyne DB, Gore CJ, Anson JM. Effectiveness of intermittent training in hypoxia combined with live high/train low. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2010;110(2):379–387.
245. Holliss BA, Fulford J, Vanhatalo A, Pedlar CR, Jones AM. Influence of intermittent hypoxic training on muscle energetics and exercise tolerance. *J. Appl. Physiol. (Bethesda, Md. 1985)*. 2013;114(5):611–619.
246. Puype J, Van Proeyen K, Raymackers J-M, Deldicque L, Hespel P. Sprint interval training in hypoxia stimulates glycolytic enzyme activity. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2013;45:2166–74.

ANEXOS

ANEXO 1

Resumen de las palabras clave más destacadas en los estudios que incluyen las palabras “hipoxia” y “ejercicio físico”. Información extraída del portal:

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>

En función de las fechas:

1800 a 1959

- Cardiorespiratory
- Oxygen uptake
- heart rate
- Blood Flow
- Testing exercise
- coronary diseases

1960-69

- Respiratory quotient
- Hipercapnia
- Pulmonar pressure
- Oxygen transfer
- Circulatory response
- Cardiac hypertrophy
- Gas exchange
- Acclimatization
- Adaptation
- Oxygen deficit
- Pyruvate
- lactate
- ECG
- angina pectoris
- Coronary circulation
- sclerosis coronary

1970-79

- Hipercapnia
- Cardiorespiratory
- physical exercise
- Ventilatory responses
- Women and mountain
- Exercise
- Lipoproteins in mountain
- Mountain sickness
- Viscerosomatic reflex

1980-89

- Ventilation
- Heart rate
- Ventilatory control
- Acclimatization
- Gas exchange
- Systolic blood pressure
- Elevations
- Maximal exercise

- Respiratory hemodynamic
- Edema
- Lactate
- Acclimatization
- Respiratory frequency rhythm
- Fluid-electrolyte shift
- Rennin-aldosterone responses
- Polyunsaturated fatty acid diet
- Hemorrhheological response
- Venomotor responses
- Plasma estradiol
- Serum erythropoietin
- Cardiac responses
- Catecholamines
- Hemoglobin flow
- Maximal oxygen uptake
- Lung function
- Physical loading
- Hyperventilatory response
- Molecular mechanism of defense against o2 deficit
- Growth hormone
- Cortisol responses
- Beta-adrenergic blockade
- Ventilation
- Gas exchange
- Lactate
- Acid-base
- Arterial blood gases
- Cutaneous blood flow
- Coagulation system
- Sympathetic response
- Cardiac response
- Glucose metabolism
- Pulmonary hypertension
- Arterial saturation of oxygen
- Maximum oxygen consumption
- Physical exercise protects against hypoxia
- Pulmonary circulation – control – changes in breath 13(O₂) 12(CO₂)
- Anaerobic threshold
- Muscle volume

- Retinal vessel after acclimatization
- Cardiac function
- Catecholaminuria
- Blood levels of oxygen
- Carbon dioxide
- Hydrogen ions
- Blood lactate

1990-99

1999

- VEGF gene expression in skeletal muscle
- Pulmonary gas exchange (cycling)
- Plasma-electrolytes in natives after marathon at different altitudes
- Sao2 affected by hypoxia at submaximal running
- Breathing pattern
- Cardiovascular and neuroendocrine responses to exercise
- Effects on respiratory gases, acid-base balance and pulmonary artery pressure
- Appetite at high altitude
- Skeletal muscle restore phosphocreatine in exercise
- VEGF after hypoxia
- Downregulation of NA⁺, K⁺ and ATPase pumps in skeletal muscle
- SaO₂ influence Vo₂max
- Breathlessness
- Role of the rightventricle
- Erythropoiesis and aerobic performance
- Mathematical modeling of oxygen transport to skeletal muscle during exercise, hypoxia and VO₂max

- Vascular growth
 - Pulmonary hemodynamics
 - Clinic-functional effect of IHE in patients with chronic obstructive bronchitis and bronchial asthma
 - Cardiac arrhythmias at high altitude
- 1998
- Arterial lactate at high altitude
 - Serum testosterone and corticosterone (rats)
 - Medical implications in altitude
 - Oxygen extraction maintains O₂ uptake during submaximal exercise with beta-adrenergic blockade at 4300m
 - Carbohydrates
 - Ventilator responses
 - Hypercapnia
 - Dyspnea
 - Expiratory flow limitation
 - Mental effects
 - Glucose transport
 - Ventilator muscle function
 - Coronary heart disease
 - Evolution of hypoxia-tolerance
 - Human adaptation
 - Lung diffusing capacity
 - Sodium regulating hormones at high altitude
 - Effects of physical exercise at high altitude on adrenocortical function
- 1997
- Cardiovascular responses
 - Inflammatory processes may predispose children to high altitude pulmonary edema
 - Platelet alpha 2-receptors
 - Oxygen uptake during submaximal and constant workload
- Carbon monoxide on muscle oxygenation
 - Pulse oximetry
 - Myoelectric evidence of peripheral muscle fatigue
 - Decreases Vo₂max
 - Pulmonary circulation
- 1996
- Heart rate kinetics
 - Lactate-epinephrine during exercise in natives
 - Oxidative enzyme activity
 - Tuberculosis patients
 - Muscle tissue adaptations of high altitude natives
 - Muscle fatigue
 - Acclimatization to 4300m decreases reliance on fat as substrate
 - Heart rate variability
 - Respiratory mechanisms during exhaustive exercise in hypoxia
 - Maximal muscle oxygenation is not limited by pulmonary ventilation
 - Skeletal muscle properties (rats)
 - Hormonal and metabolic adjustments
 - Cardiorespiratory responses
 - Lactate
 - Plasma free and sulphoconjugated catecholamines
 - Triathlon
- 1995
- Pulmonary edema in Japan
 - Angiotensin II-induced pulmonary vasoconstrictions
 - Swimming and hypoxia on coronary blood flow
 - Gas exchange, blood lactate and plasma catecholamines in hypoxia and normoxia
 - Medicine and mechanisms in altitude sickness
 - Training in hypoxia versus training in normoxia in high altitude natives
- Maximal exercise performance in chronic hypoxia and normoxia in high altitude natives
 - Stress hormones after prolonged training (rats)
 - Natural killers cell response to exercise
 - Morphofunctional state of mass cells of the submaximal exercise
 - Connective tissue
 - Muscle oxygenation and metabolism
 - Growth hormone – insulin-like growth factor I axis
 - Sodium citrate ingestion and muscle performance
 - Systolic and diastolic function on the left ventricle at rest and exercise using echocardiography
 - Increase of serum insulin and stable c-peptide concentrations
 - Diaphragmatic fatigue
 - Oxygen sensor that controls EPO production
 - Modification of the responses of endothelin-1
 - Patients with ischemic heart disease after aortocoronary bypass
- 1994
- Acclimatization on motor unit activation pattern
 - Ventilation in natives
 - Exercise performance in natives
 - Immune system
 - Cardiovascular response
 - Muscle fatigue (rats)
 - Arterial potassium
 - Albuminuria and overall capillary permeability of albumin
 - Ferrum metabolism after high altitude expedition
 - Nutrition and energetic of exercise

- Neuropeptide Y release from human muscle heart is enhanced with prolonged exercise
 - Red blood cell function
 - Fatigue and exhaustion in chronic hypobaric
 - Beta-adrenergic blockade does not prevent the lactate response to exercise after acclimatization
 - Hormonal responses
 - Muscle energetic in elite Nordic skiers
 - Ventilation, lactate and electromyographic threshold
 - Autonomic nervous control of the heart rate
- 1993
- Vo₂max determinant at high altitude (rats)
 - Perceived exertion
 - Pulmonary arterial pressure and pulmonary vasoconstrictive responses to hypoxia in natives
 - Hormonal responses to exercise in high altitude natives and COPD patients
 - Plasma erythropoietin in high altitude residents
 - Reduction of postprandial lipemia after acute hypoxia
 - VO₂max on trained and untrained athletes
 - Pulmonary function and ventilatory response
 - Susceptible to high altitude pulmonary edema
 - Severe hypoxia decreases oxygen uptake
 - Effect and duration of exposure to hypoxia on supramaximal exercise after exercise
 - Circulating leucocyte subpopulations after exercise
 - Minimal hypoxic pulmonary hypertension in normal Tibetans
- 1992
- Hypoxia causes glycogenolysis without an increase in percent phosphorylase in rat skeletal muscle
 - Sinoatrial node activity
 - Acclimatization energy metabolic adaptations in skeletal muscle
 - Internal carotid arterial flow velocity in natives
 - Renal and endocrine function in hydrated subjects
 - 1 year stay at altitude on ventilatory, metabolism and work capacity
 - Salt and water control at altitude
 - Pulmonary circulation
 - Muscle structural modifications
 - Muscular adaptations at extreme altitude
 - Metabolic implications
 - Peptides
 - Nutrition
 - Enzyme mechanisms for pyruvate-to-lactate flux attenuation natives
 - Amino acid metabolism, muscular fatigue and muscle wasting
 - Control of cardiac chronotropic function
 - Pathophysiology, prevention and therapy of altitude pulmonary edema
 - ECGs of young black men
 - Individuality of breathing patterns
 - Peak O₂ uptake during arm stroke
 - Magnesium distribution in rats after maximal exercise
 - Changes in volume densities and distribution of mitochondria in rat skeletal muscle
 - Alkalosis on Vo₂max
- 1991
- Vo₂max during swimming
 - Oxygen transport
 - Lactate paradox
 - Muscle energetic and ultrastructure in chronic hypoxia
- 1990
- Oximetry
 - Pulmonary arterial pressure under hypoxia in rats
 - Frequency domain analysis of ventilation and gas exchange kinetics
 - Internal carotid flow velocity with exercise before and after acclimatization at 4300m
 - Muscle capillarity in rats
 - Sympathetic neural activation
 - Plasma changes in beta-endorphin
 - Antidepressive agents on tolerance of hypoxia and exercise
 - Catecholamines and beta-receptors in ventilation responses during exercise
 - Neutral peptide hydrolase activity in human blood
 - Arterial desaturation with increased chemosensitivity
 - Stimulation of glucose transport in skeletal muscle
 - Psychomotor performance
 - Beta-adrenergic blockade on plasma lactate concentration
 - Muscle sympathetic nerve responsiveness to static contraction is not altered under hypoxia
 - Oxygen uptake and heart rate response in children and adults
 - Combined therapy of patients with chronic bronchitis
- Hypercapnia on perceived

- breathlessness during exercise
 - Coronary stress of skiing
 - Coronary circulation
 - Limitating factors for exercise at extremes altitudes
 - Exercise in normoxia and hypoxia tolerance in man following acetazolamide
 - Neuropeptide Y is released together with noradrenaline from the human heart during exercise and hypoxia
 - Everest neuromuscular performance
 - Muscle enzyme activity
 - Does arterial Pco2 interfere with hypoxia in muscular metabolism
 - Effect of hypoxia on performance during 30-45 s of supramaximal exercise
 - L-Carnitine on Vo2max and the aerobic-anaerobic threshold in normoxia and hypoxia
 - Saliva flow and composition in human exposed to hypoxia
 - Metabolic consequences of reduced frequency breathing in submaximal exercise
 - Atrial natriuretic peptide during and after maximal and submaximal exercise
 - Effect of caffeine on ventilatory responses to hypercapnia
 - MIBG scintigraphic assessment of cardiac adrenergic activity in response to altitude
- 2000-2013**
- 2000
- Peak heart rate
 - Pathophysiological responses
- Intermittent Hypoxia Exercise
 - Female cycling
 - Chronic heart failure
 - PDH activation
 - Dichloacetate
 - Human skeletal muscle
 - Metabolic modulation
 - Sympathetic vasoconstriction
 - Human skeletal muscle
 - Amlodipine
 - Respiratory and pulmonary vascularisation
 - Nocturnal hypoxia
 - Pulmonary hemodynamics
 - Patients
 - Obstructive pulmonary
 - Sleep apnea
 - UCP-3 expression
 - AMP-activated protein kinase
 - Stress doppler echocardiography
 - Interval hypoxia training
 - Physical work in woman
 - Vasopressin release
 - Intravascular fluid
 - Regulation of glycogen phosphorylation
 - PDH
 - Living Low – Training High in rats
 - Glutamine metabolism
 - Metabolism
 - Cardiovascular risk factors
- 2001
- Training High- Living Low training
 - Skeletal muscle angiogenesis
 - Capitalization
 - Gender differences
 - Endocrine
 - Metabolism
 - Pulse oximetry
 - Maximal exercise
 - Live High – Training Low
 - Muscle buffering capacity
 - Submaximal cycling efficiency
 - Lipid peroxidation
- Antioxidant defense systems
 - Human blood
 - Rest
 - Blood lactate
 - Aldosterone
 - Oxidative metabolism
 - Human calf muscle
 - Peak heart rate
 - Severity of acute hypoxia
 - Ventilatory
 - Cardiovascular
 - Highlanders
 - Intermittent Hypoxia Training
 - Lipid peroxidation
 - Interleukin-6
 - Alpha-adrenergic blockade
 - Endurance training
 - Myoglobin content
 - Parasympathetic neural activity
 - Heart rate
 - Central governor
 - Muscle tissue
 - Pulmonary blood flow
 - Chronic hypoxia
 - Myocardic adrenergic
 - Muscarinic receptor number
 - Skeletal muscle capillary
 - Angiogenic mRNA
 - Acclimatization
 - Beta-adrenergic
 - Parasympathetic inhibition
 - Heart
 - Cardiac output
 - Arterial saturation of oxygen
 - Coordination
 - Breathing
 - Cycling rhythms in woman
 - Blood ammonia
- 2002
- Menstrual cycle
 - Cardiorespiratory response
 - Intermittent Hypoxia Exposure
 - Hypobaric
 - Leukocytes
 - Interleukin-6-shared mechanisms
 - Ventilatory response
 - Pulmonary edema
 - Substrate utilization
 - Sea-level residents
 - Acute hypoxia
 - Acclimatization

- Maximal oxygen uptake
- Severe acute hypoxia
- Plasma volume
- Carbohydrate supplement
- Feeding behaviour
- Oxidative stress
- Antioxidant nutrients
- Calcitonin-gene-related
- Peptide
- Adrenomedullin release
- Blood gases
- Restrictive lung disease
- Intermittent Hypoxia Exposure
- Spirometry values
- Highlanders
- Chemosensitivity
- ANS
- Maximal cardiac output
- Sodium citrate intake
- Anaerobic performance
- Sudden ascent

2003

- Acute moderate exposure
- Growth hormone
- Lactate paradox
- Chemoreflex drive
- Ventilation
- Gas exchange
- Intermittent Hypoxia Exposure
- Endurance performance
- Submaximal exercise efficiency
- Proteinous amino acids
- Muscle cytosol
- Live High – Training Low
- Lactate metabolism
- Trained athletes
- Muscular performance
- Live Low – Training High
- Interleukin-6 response
- Acute hypoxia
- Chronic hypoxia
- Coronary flow reserve
- Peak heart rate
- Brain monoamine
- Strength training
- Muscle structure
- Gene expression

2004

- Maximal exercise trained and sedentary woman
- Intermittent Hypoxia Training
- Cycling performance
- GLUT4 protein expression
- Hydroxydeoxyguanosine and glutathione levels in the liver
- Chemoreflex
- Metaboreflex control
- Static exercise
- Individual anaerobic threshold
- Fluid-regulatory hormone responses
- Time to exhaustion
- Intermittent Hypoxia Exposure
- Glucose tolerance
- Muscle GLUT4 protein expression
- HIF and VEGF
- Sciatic nerve stimulation
- Antioxidant supplementation
- Oxidative stress
- Leukocyte counts
- Neutrophil activity
- Chronic bronchitis
- Bronchial asthma
- Red muscle of rainbow trout
- Central regulation
- Skeletal muscle recruitment
- Maximal cardiac output
- Granulocyte activation
- Human muscle sarcoplasmic reticulum function
- Submaximal exercise
- Obstructive pulmonary disease
- Pulmonary gas exchange
- Maximal exercise
- Messenger system
- Highlanders
- Lowlanders
- Blood viscosity
- Cardiac function
- Cardiac troponin T
- Human muscle Na, k+, ATPase 2005
- Serum creatin kinase
- LDH
- ALT
- Rowing
- Sildenafil
- Hypoxaemia

- Training status
- Muscle Na-K+ pump
- Fatigue responses
- Trekking
- Circulating endothelial cells
- Functional magnetic resonance signal
- Aortic endothelium-dependent vasorelaxed
- L-arginine
- Norepinephrine
- HYF-1
- Mucosal immunity
- Edema
- Oxidative stress
- Human muscle sarcoplasmic reticulum function
- Cardiorespiratory system
- Overweight people
- Chronic intermittent hypoxia
- Muscle in vivo maximal Na⁺, K⁺, ATPase activity
- Well-trained athletes
- Acute hypoxia
- Anaerobic threshold
- Heart rate

2006

- Mine workers acclimatization
- Decrease in peak heart rate in acute hypoxia: arterial hypoxaemia
- Genes
- Cytokine response
- Chronic mountain sickness
- Hypoventilation in chronic mountain sickness a mechanism to preserve energy
- Human response at extreme altitude
- Role of maximal heart rate and arterial O₂ on the decrement of Vo₂max in moderate acute hypoxia
- Inspiratory muscle work
- Role of nitric oxide in cardiovascular adaptation to IHE
- Performance skiers
- Acute severe hypoxia on peripheral fatigue
- HI kayak performance after adaptation to IHE

- Improvement of myocardial perfusion in coronary patients after IHE
 - Hypoxia on muscle response to tendon vibration
 - Short-term hypoxia at rest and during exercise reduces lung water
 - Low and high levels of moderate hypoxia on anaerobic energy release during submaximal cycle
 - Gene transcripts
 - Aerobic performance
 - Ventilatory threshold
 - Voluntary muscle function after creatine supplementation in acute high altitude exercise training on contractile function of rat cardiomyocyte
 - Moderate exercise in hypoxia induces a greater saO_2 in trained than untrained athletes
 - Antioxidant/pro-oxidant balance
 - Substrate utilization
 - Skeletal muscle protein synthesis after active/passive exercise
 - Muscle O_2 extraction in acclimatizing lowlanders and highlanders
 - Exercise performance in hypoxia after novel erythropoiesis stimulating protein treatment
 - Factors limiting exercise in hypoxia
 - Mitochondrial properties
 - AMP deamination delays muscle acidification during heavy exercise and hypoxia
 - AMPK signaling and substrate metabolism in humans
 - Pulmonary edema
 - Acute hypoxia decreases plasma VEGF concentration
 - ROS
- 2007
- Alveolar PCO_2 oscillations and ventilation
 - L-Carnitine supplementation on endurance
 - Power performance cyclist in rat skeletal muscle
 - Differential effects of metaboreceptor and chemoreceptor activation on sympathetic and cardiac baroreflex control
 - Inspiratory muscle work in acute hypoxia influences locomotor muscle fatigue
 - Exercise training in normobaric hypoxia: is carbonic anhydrase II the best marker of hypoxia?
 - Resting ventilatory chemosensitivity and $\text{Vo}_{2\text{max}}$ in moderate hypobaric hypoxia
 - The regulation, control and consequences of mitochondrial O_2 utilization and disposition in the heart skeletal muscle during hypoxia
 - Cardiovascular adjustments for life at high altitude
 - Effects of acetazolamide on aerobic exercise capacity and pulmonary hemodynamics at high altitude
 - $\text{Vo}_{2\text{max}}$
 - Accumulated O_2 deficit during IHE nonacclimatized
 - Autonomic nervous system
 - Adaptation and quantitative of human muscle mitochondrial
 - Exercise economy does not change after acclimatization to moderate to very high altitude
 - Anaerobic capacity in trained athletes
 - Chronic intermittent hypoxia modulates eosinophil-and neutrophil platelet aggregation and inflammatory cytokine secretion caused by strenuous exercise
 - Short-term vibration and hypoxia during high intermittent cycling exercise on circulating levels of angiogenic regulators
 - Acute cerebral and muscle oxygenation incremental
 - Spirometry and respiratory muscle function during ascent to high altitude
 - Peripheral circulation monitored by surface temperature and autonomic nervous function in hypobaric hypoxia: submaximal exercise
 - IHE not increase exercise ventilation at simulate moderate altitude
 - Acute on diaphragmatic fatigue
 - Left ventricular function
- 2008
- IHE not improve endurance at altitude
 - Football
 - Mountain sickness
 - Cerebral hypoperfusion during hypoxia exercise following two different hypoxia exposures: independence from changes in dynamic autoregulation and reactivity
 - Intrapulmonary and intracardiac shunting
 - Immunological and metabolic responses
 - Respiratory control during air-breathing
 - Cellular distribution of HSP70 expression
 - Do high altitude natives have enhanced exercise performance at altitude?
 - Catecholamines
 - EPO
 - Gene expression
 - Cerebrovascular

- Sildenafil
 - Biventricular function at high altitude
 - Weight loss
- 2009
- Sympathetic retrain of muscle blood flow
 - Severe hypoxia on prefrontal cortex and muscle oxygenation respiration at rest and during exhaustive exercise
 - Meta-analysis
 - Frontal and motor cortex oxygenation maximal exercise in normoxia and hypoxia
 - Lactate paradox
 - Hypoxia tolerance and retinal vein occlusion
 - High energy phosphate concentrations and AMPK phosphorylation in skeletal muscle mice with inherited
 - Role of adipose tissue hypoxia in obesity and insulin resistance
 - Role of muscle mass
 - IHT on HIF gene expression and leukocytes
 - IHE on the cerebrovascular responses to submaximal exercise
 - Normobaric training on metabolic risk markers
 - Role of microvolt T-Wave alternans
 - Muscle tissue
 - NIRS signal during exercise in hypoxia
 - Effects of interval hypoxia on exercise tolerance
 - Special focus on patients with CAD or COPD
 - Pulmonary vascular response
 - Adenosine receptor antagonist and augmented vasodilation during hypoxic exercise
 - HRV
 - Nervous system function
 - Air to muscle O₂ delivery
- Hypoxia and metabolic risk markers in overweight to obese subjects
 - Plasticity of the muscle proteome to exercise
 - Changes in muscle contractive properties
 - Antioxidant and redox status after maximal aerobic exercise in highlanders and lowlanders
- 2010
- Heart rate dynamics at 8230m
 - Changes in skeletal muscle oxygenation during exercise measured by near-infrared spectroscopy
 - Substrate utilization during exercise and recovery at moderate altitude
 - Nitric oxide contributes to the augmented vasodilation during hypoxic exercise
 - Myocellular limitations of human performance and their modification through genome-dependent response at altitude
 - Training in hypoxia fails to further enhance endurance performance and lactate clearance in well-trained men
 - Glucose metabolism
 - Pulmonary system
 - Hypoxia training increases metabolic enzyme activity and composition of alpha-myosin heavy chain isoform in rats ventricular cells
 - Myocardium
 - Systemic hypoxia promotes lymphocyte apoptosis induced by oxidative stress
- 2011
- Effect of chronic IHE on exercise
 - Ischemic preconditioning of lower extremity
- attenuates the normal hypoxia increase in pulmonary artery systolic pressure
 - Does cerebral oxygen delivery limit incremental exercise performance
 - Dietary nitrate reduces muscle metabolic perturbation and improves exercise tolerance in hypoxia
 - Effects of beta-blockade on exercise performance at high altitude
 - Improved Vo₂ uptake kinetics and shift in muscle fiber type on trekking
 - Changes in HIF-1 protein, pyruvate dehydrogenase phosphorylation and activity with exercise in acute and chronic hypoxia
 - Similar quantitative and qualitative changes of mitochondrial respiration following strength and endurance training
 - Effects of hypoxia on muscle protein synthesis and anabolic signaling
 - Frontal cerebral cortex blood flow, O₂ delivery and oxygenation in normoxia and hypoxia
 - Effects of exercise in hypoxic and normoxic conditions on endothelin-1 and arterial compliance
 - Gene expression in obesity
 - Adenosine, exercise and moderate acute hypoxia on energy substrate utilization of human skeletal muscle
 - Rest and exercise at 4000m on appetite, energy intake, plasma concentrations of acylated ghrelin and peptide YY
 - LHTL
 - Insulin resistance in type 2 diabetes
 - Augmented skeletal muscle hyperaemia

- during hypoxia exposure is blunted by combined inhibition of nitric oxide and vasodilating prostaglandins
 - Hypoxia augments muscle sympathetic neural response to leg cycling
 - Moderate hypoxia on tolerance high intermittent exercise
 - Hypoxia exercise promotes antitumor cytotoxicity of natural killer cells
 - Haematological changes
 - Effects of carvedilol on O_2 uptake and heart rate kinetics in patients with chronic heart failure at hypoxia
 - Effects of acetazolamide and dexamethasone on cerebral hemodynamics in hypoxia
 - HIF signaling and overall gene expression changes during hypoxia and normoxia
 - Impairment of 3000m run-time at altitude is influenced by arterial oxyhemoglobin saturation
 - Acute hypoxia and exercise improve insulin sensitivity in diabetes type 2
 - Nutritional status in chronic obstructive pulmonary disease: role of hypoxia
 - Effect of repeated normobaric hypoxia exposure during sleep on acute mountain sickness, exercise performance and sleep during exposure to terrestrial altitude
 - High altitude on exercise capacity
 - Energy metabolism
 - Hypoxic exercise reduces senescent T-lymphocyte subset in blood
 - Daily hypoxia increases basal
- monocyte HSP72 expression
 - 2012
 - Review
 - ROS and redox-signaling
 - Older
 - Normobaric hypoxia at rest: effects on performance at normoxia and hypoxia
 - HRV, immune response and orthostatic stress
 - Low load resistance training combined with blood flow restriction on hypoxia on muscle function
 - Travel to high altitude during pregnancy
 - Compensatory vasodilatation during hypoxic exercise
 - Acute on post-exercise parasympathetic reactivation
 - Angiogenic growth factors to exercise, hypoxia and exercise in hypoxia
 - Red blood cell volume and the capacity
 - Impact acute normobaric hypoxia on regional and global myocardial function: a speckle tracking echocardiography study
 - High-carbohydrate versus high-protein meal on acute responses to hypoxia at rest and exercise
 - Dietary nitrate improves muscle but not cerebral oxygenation status during exercise in hypoxia
 - Age responses
 - Team sports
 - Role of haemoglobin mass on Vo_{2max} following normobaric LHTL in endurance athletes
 - Hypobaric versus normobaric hypoxia
 - Heat acclimatization
 - Work at high altitude: risk factors
- HIF-3 mRNA expression changes in different tissues and their role in adaptation to intermittent hypoxia
 - Increased oxidative stress and anaerobic energy release, but blunted Thr172-AMPKa phosphorylation in response to sprint exercise in severe acute hypoxia
 - Exercise performance in hypoxia after novel erythropoiesis stimulating protein treatment
 - Factors limiting exercise in hypoxia
 - Mitochondrial properties
 - AMP deamination delays muscle acidification during heavy exercise and hypoxia
 - AMPK signaling and substrate metabolism in humans
 - Edema
 - Acute decreases plasma VEGF concentration
 - ROS
 - 2013
 - Increase in carbohydrate utilization in high altitude natives
 - Hypoxia-energy balance and obesity
 - O_2 therapy
 - Altitude training induced alterations in erythrocyte rheological properties (rats)
 - Hypoxia on sympathetic vasomotor outflow and blood pressure during exercise with inspiratory resistance
 - Peak O_2 uptake and regional oxygenation in response to a 10 days normobaric
 - MRI evidence: acute mountain sickness is not associated with cerebral edema formation during simulate high altitude

- Cardiac output, O₂ delivery and kinetics acute normobaric hypoxia
- Resistance training combined vascular occlusion and hypoxia on neuromuscular function in athletes
- Blood oxidative stress markers during high altitude trekking
- HRV and acute mountain sickness
- Acute on muscle blood flow, vo₂ and kinetics in older man
- LHTL induces physiological cardiac hypertrophy accompanied by down-regulation and redistribution of the rennin-angiotensin system
- The regulation of the partial pressure of O₂ by the serotonergic nervous system
- IHE training on muscle energetic and exercise tolerance
- Moderate and severe IHE on vascular endothelial function and haemodynamics
- Autonomic nervous system
- 23 days of acute IHE
- Medicine at high altitude
- Acetazolamide on pulmonary and muscle gas exchange

ANEXO 2:

Estudios iniciales que concuerdan con los resultados específicos de este trabajo (en diferentes campos):

Respuesta cardiorrespiratoria y circulatoria:(en comparación con las condiciones de normoxia)

- Aumento del trabajo cardíaco y circulatorio ^{197,198}.
- Descenso de la SaO₂ a medida que la altitud de exposición aumenta ¹⁹⁹.
- Descenso en la capacidad aeróbica (VO_{2max}) ²⁰⁰.
- Primeros estudios con alpinistas que hacen referencia a la importancia de la aclimatación previa ^{47,201}.
- Respuestas específicas en deportistas altamente entrenados ^{202,203}.

Respuestas metabólicas

- Descripción de la respuesta metabólica al ejercicio (aeróbico o anaeróbico) mediante la valoración del lactato (descrita anteriormente por Hill ⁵ con gran relevancia durante el siglo XX hasta la actualidad en el campo de la fisiología deportiva.
- Análisis del lactato en condiciones de hipoxia ^{204,205}.
- Mayores niveles de lactato en condiciones de hipoxia ²⁰⁶.
- Mayor estrés metabólico soportado en hipoxia moderada ²⁰⁷ o severa (5800 metros) ⁴⁷ en comparación con las condiciones de normoxia.
- Otros estudios iniciales valoraron la respuesta de los ácidos grasos libres ²⁰⁸, hormonal ⁴⁸ o enzimas en plasma ²⁰⁹ sin conclusiones destacables.

Rendimiento deportivo en hipoxia

- Descenso del VO_{2max} (26% a 4000 metros) ²¹⁰ en comparación con el ejercicio a nivel del mar ^{211,212} y con ello un menor rendimiento aeróbico.
- Estos primeros estudios previos a los JJOO de 1968 concluían que el entrenamiento en altitud no provocaba una mejora deportiva aplicable al rendimiento deportivo poniendo en duda su uso ^{213,214}.
- Debido a los resultados tan destacables de deportistas residentes en altitud en pruebas de resistencia (posteriormente llamados highlanders), se empezó a valorar (más empírica que científicamente) el uso de la altitud como método de

mejora del rendimiento de resistencia. A tal efecto, estudios que valoraron el efecto de los campos de entrenamiento en altitud ²¹⁵ ayudaron a ir construyendo protocolos de entrenamiento combinando el tipo de altitud (severa, moderada), el tiempo de exposición (aguda, crónica) y los efectos del entrenamiento ²¹⁶.

- Es de importancia destacar que contribuyó a la mejora de estos métodos de individualización del entrenamiento la descripción de las respuestas específicas de los sujetos residentes en altitud (highlanders) ^{217,218}.

Respuesta hematopoyética

- Relación directa entre la respuesta hematopoyética provocada por la hipoxia y el incremento de la resistencia física. Esta mejora viene inducida por una mayor capacidad de absorción y transporte de oxígeno incrementando la oxigenación tisular ²¹⁹.
- Este beneficio implícito y determinante en el rendimiento de resistencia ha sido ampliamente valorado como un factor clave en la prescripción de la exposición y entrenamiento en altitud (Boutellier, Howald, di Prampero, Giezendanner, & Cerretelli, 1983; Mairbaurl & Schobersberger, 1985; Mairbaurl et al., 1986). Proporcionalmente es el campo más investigado en la temática.

Respuesta periférica (muscular)

- La evolución en los procesos de medición científica ha contribuido a aumentar el número de estudios que analizan respuestas específicas: hormonales (Kjaer, Bangsbo, Lortie, & Galbo, 1988b), enzimáticas o metabólicas (Bigard, Brunet, Guezennec, & Monod, 1991; Hoppeler & Desplanches, 1992; Mizuno et al., 1990; Terrados et al., 1988) relacionadas con la contracción del músculo esquelético en respuesta a la exposición y entrenamiento en condiciones de hipoxia ²²⁶.

Protocolización de métodos de entrenamiento en hipoxia

- Crecimiento exponencial del número de estudios que valoraban métodos de entrenamiento y/o exposición a hipoxia simulada e intermitente desde la década de 1990 ¹¹⁵. Simulando las condiciones de hipoxia se pretendieron paliar los inconvenientes de las estancias en campos de entrenamiento en altitud natural.

El alto coste económico y logístico que supone el desplazamiento a estos lugares naturales ha dificultado siempre el acceso a deportistas no profesionales o con menos recursos. Además de estos aspectos, las condiciones climáticas durante largas épocas del año imposibilita su uso. La disminución en la calidad de entrenamientos en altitud debido a la mala tolerancia de algunos deportistas (malos respondedores) y el deterioramiento de los procesos de absorción y transporte de oxígeno ²³.

- La popularidad de los métodos de hipoxia intermitente ha llegado a múltiples niveles y deportes ⁶⁸, esquiadores de fondo ²²⁷, corredores ²²⁸ o nadadores ²²⁹.
- Incremento en el uso de los métodos intensivos de entrenamiento en condiciones de hipoxia (método "Living High-Training Low") basado en la premisa de que la exposición pasiva a hipoxia mejora la respuesta hematopoyética ("Living High, donde se prescribe pasar el mayor tiempo posible en altitud sin ejercitarse activamente) y el entrenamiento de carga intensiva y específica se realiza en condiciones de normoxia o baja altitud para garantizar la calidad de los estímulos de entrenamiento ("Training Low").

Rendimiento anaeróbico y altitud

- En la última década encontramos estudios que valoran las posibles mejoras del rendimiento anaeróbico con el uso del entrenamiento o exposición a altitud.
- Su uso es debatido y los resultados inconclusos debido a la falta de protocolización general en la confección de los estudios y las variables analizadas.
- Estos estudios han analizado la respuesta en el rendimiento después de ejercicio combinando hipoxia y entrenamiento interválico ^{99,230}, de alta intensidad de entrenamiento ²³¹ y de carga moderada ^{41,121,155}.
- Los resultados de estos estudios aportan datos interesantes coincidiendo en su beneficio sobre el rendimiento anaeróbico con la aplicación de protocolos de entrenamiento en hipoxia moderadas de duración corta (4 semanas, 12 sesiones) ^{28,29,232}. Revisiones científicas también concluyen estos resultados reforzando la hipótesis de que existen ventajas con la exposición y entrenamiento en condiciones de hipoxia sobre el rendimiento anaeróbico ^{24,26,36}

ANEXO 3

Estudios relevantes que describen respuestas en el rendimiento anaeróbico con métodos de entrenamiento y exposición intermitente a hipoxia:

<i>Referencia</i>	<i>Método</i>	<i>Diseño</i>	<i>Tiempo post-altitud, test de rendimiento (valoración)</i>
Loeppky and Bynum (1970) ²³³	Hipoxia intermitente (hipobárica)	Test en cinta de correr.	Mejora de un 65% en la capacidad de trabajo del grupo hipoxia respecto al grupo normoxia. (139 segundos frente a 49 del grupo normoxia).
Terrados et al (1988) ⁶⁶	Hipoxia intermitente (activa) (hipobárica)	8 Ciclistas de competición. 4 semanas a 2300 metros (hipobarica). Entrenamiento 1,5 a 2 horas durante 4-5 días por semana. (60-90 minutos continuos y 45-60 intermitentes)	Incremento en la capacidad de trabajo máxima del grupo hipoxia (33%) frente al grupo normoxia (22%). No mejora del VO ² max. Test incremental hasta la fatiga cicloergómetro. Mejora significativa del grupo hipoxia en la capacidad de trabajo. MEJORA DEL RENDIMIENTO
Mizuno et al (1990) ¹⁰¹	Hipoxia natural (TH-LH)	10 esquiadores de fondo de élite. 2 semanas a 2100 metros (vida) y entrenamientos a 2700 metros	Mejoras del 6% en la capacidad buffer muscular y un 17% en resistencia aneróbica (p<0,05). No hubo grupo control. MEJORA DEL RENDIMIENTO ANAERÓBICO
Balsom P et al (1994) ²³⁴	Hipoxia intermitente (activa) (hipobárica)	7 estudiantes de educación física realizaron 10 series de 6 segundos a máxima intensidad en cicloergómetro en condiciones de hipoxia y normoxia para valorar la potencia desarrollada, los valores de lactato alcanzados y el consumo de oxígeno.	En ambas condiciones durante las 3 primeras series mantuvieron la misma potencia. A partir de la tercera serie en ambas condiciones no se mantuvo la potencia de las primeras. Esta reducción fue más grande en hipoxia (p<0,05) alcanzando valores más altos de lactato (p<0,05) y un consumo de oxígeno alcanzado menor (p<0,05).
Favier R et al (1995) ⁹⁰	Hipoxia natural (TH-LH)	30 hombres sedentarios residentes en altitud realizaron 3 modelos de entrenamiento idéntico en diferentes condiciones. La carga de trabajo fue realizada a la misma	En nativos: 1) Entrenar en normoxia para estos sujetos se traduce en un descenso en la capacidad de tamponamiento

		intensidad relativa en normoxia (10 sujetos), absoluta en hipoxia (10 sujetos) o en hipoxia (10 sujetos).	muscular. 2) No se observaron mejoras en el consumo máximo de oxígeno por entrenar en normoxia o hipoxia. Alcanzaron niveles de lactato más alto entrenando en normoxia
Martino et al 1996 {285 Martino, M. 1996}	Hipoxia natural (TH-LH)	3 semanas a 2800 metros en nadadores de élite.	Test de 100 metros libres con mejoras de 2,4 segundos con respecto al grupo control (normoxia). MEJORA DEL RENDIMIENTO ANAERÓBICO
Weyand P et al (1999) ²³⁵	Hipoxia intermitente (activa) (normobárica)	4 sujetos físicamente activos realizaron una sesión de entrenamiento consistente en 15 series desde 15 a 180 segundos a máxima intensidad de sprints. La sesión se realizó en normoxia y hipoxia (13% O ²).	Se apreciaron reducciones en el rendimiento aeróbico en condiciones de hipoxia pero no así en el rendimiento anaeróbico en series menores de 60 segundos y muy ligeramente en series hasta 120 segundos. Esto fue posible debido a que aumentó un 18% la contribución de la vía anaeróbica en condiciones de hipoxia para compensar las reducciones en la producción de energía aeróbica.
Nummela et al (2000) ¹²³	Hipoxia intermitente (pasiva) (normobárica) (LH-TL)	6 corredores de élite. 10 días viviendo arriba (2200 metros) y entrenando abajo (nivel del mar). En corredores de 400 metros.	Mejora significativa del tiempo en 400metros 2,2% (p<0,05) y velocidad fija de lactato a 5 mmol(p<0,05). En comparación con grupo control normoxia. MEJORA DEL RENDIMIENTO ANAERÓBICO
Geiser J et al (2001) ¹⁵¹	Hipoxia intermitente (activa) (normobárica)	33 sujetos físicamente activos. Entrenamiento en cicloergómetro 30 minutos día. 5 días a la semana durante 6 semanas. 2 grupos entrenaron en hipoxia a 3850 metros y 2 grupos en normoxia 560 metros. De los dos grupos uno entrenó a ritmo de umbral anaeróbico y el otro un 25% por debajo del umbral anaeróbico.	Aumento en todos los grupos del total de la mitocondria. Solo los grupos que entrenaron en hipoxia incrementaron la densidad del subsarcolemma mitocondrial (cerca de los capilares). Solo el grupo que entrenó en hipoxia mostró un incremento significativo en el volumen total mitocondrial (+59%) y la densidad capilar (+17%) y la capacidad oxidativa.

			Los que entrenaron en hipoxia aumentaron más su potencia máxima y rendimiento. MEJORA DEL RENDIMIENTO
Meeuwsen et al (2001) ¹⁵⁵	Hipoxia intermitente (activa) (hipobárica)	16 triatletas. 10 días de entrenamiento 2 h/d. Cicloergómetro. Hipoxia hipobárica de 2500 metros. Intensidad: 60-70% Frecuencia cardíaca.	Incremento rendimiento; 9 días posterior al entrenamiento en hipoxia: aeróbico (7,4%) y anaeróbico (5%) en grupo hipoxia. No mejoras significativas en grupo normoxia. Test: Wingate. Conclusión: MEJORA DEL RENDIMIENTO ANAERÓBICO
Hendriksen et al (2003) ⁴¹	Hipoxia intermitente (activa) (hipobárica)	16 triatletas, 2h/d a 2500m (hipoxia hipobárica). Intensidad 60-70% FCmaxima. Cicloergómetro 10 días.	Incremento rendimiento aeróbico (5,2%) y anaeróbico (3,8%) en grupo hipoxia. En grupo control un incremento rendimiento aeróbico de 3,7% 2 días después del último entrenamiento. Test Wingate. En potencia: máxima (5,2%), potencia anaeróbica media (4,1), pico potencia aneróbica (3,8). No mejoras significativas en grupo normoxia. MEJORA DEL RENDIMIENTO ANAERÓBICO
Truijens et al (2003) ²³¹	Hipoxia natural (TH-LH)	5 semanas de entrenamiento a 2500 altitud normobárica. 16 Nadadores de rendimiento. 12,30 minutos por día. 3 días por semana.	No existe mejoras significativas en el rendimiento comparando grupo hipoxia y control. Si MEJORAS DEL RENDIMIENTO ANAERÓBICO.
Katayama et al (2003) ¹²¹	Hipoxia intermitente (pasiva) (simulada)	Grupo hipoxia expuesto 90 minutos 3 veces por semana durante 3 semanas a 4500 metros. Exposición pasiva. 12 atletas bien élite continuaron con su entrenamiento normal. Medidas de 3000m carrera.	El grupo de hipoxia mejoró en el tiempo de 3000 metros de carrera y en el test de tiempo hasta el agotamiento. Parametros hematológicos y cardiorrespiratorios no cambiaron en ambos grupos. Estas mejoran duraron hasta las 3 semanas. MEJORA DEL RENDIMIENTO

Calbet JA et al (2003) ²³⁶	Hipoxia intermitente (activa) (normobárica)	10 ciclistas de élite realizaron un test de Wingate en condiciones de hipoxia ($FiO_2=10\%$) y normoxia para valorar los efectos en el rendimiento deportivo y metabólico de un entrenamiento. 5 ciclistas eran esprinter y 5 de resistencia (rodadores).	Durante el test de Wingate en hipoxia el rendimiento es mantenido en comparación con normoxia. El efecto de la hipoxia aguda puede depender del nivel de entrenamiento individual de los sujetos así como la propia respuesta individual a la hipoxia.
Roels et al (2005 y 2007) ⁹⁹	Varios protocolos (hipoxia intermitente) (activa y pasiva) (normobárica) (TH-LL)	(2005) 33 ciclistas de élite. 3 grupos de entrenamiento: hipoxia (normobárica), entrenamiento intermitente en hipoxia y normoxia. 2d/semana de entrenamiento alta intensidad (90-100% potencia máxima). 7 semanas. Entrenamiento en bicicleta (rodillo). (2007) 19 atletas. 2 grupos: normoxia (9), hipoxia (10). 1-1,5h/d 5 días a la semana, 3 semanas. 3000m grupo hipoxia	Entrenamiento interválico de alta intensidad. No diferencias significativas entre grupos hipoxia y normoxia. NO MEJORA DEL RENDIMIENTO PERO SIRVE PARA ACLIMATACIÓN PARA EJERCICIO EN ALTITUD
Morton et al (2005) ¹⁴⁶	Hipoxia intermitente (activa) (normobárica)	8 deportistas colectivos. Entrenamiento interválico (series de 3 minutos submáximas) a 2750 metros hipoxia normobárica. 4 semanas, 30 minutos por día durante 3 días por semana en cicloergometro.	4-7 días después del último entrenamiento: test de wingate. Incrementos de máxima potencia en ambos grupos pero sin diferencias significativas. NO DIFERENCIAS ENTRE HIPOXIA Y NORMOXIA.
Ogawa et al (2005) ²³⁷	Hipoxia intermitente (activa) (hipobárica)	7 corredores de élite realizaron un test aeróbico y otro anaeróbico en hipoxia (2500m) y normoxia.	Durante el test aeróbico en hipoxia hubo un descenso en el VO_{2max} significativo en comparación con normoxia (18%). A la vez, se alcanzaron niveles más altos de lactato en hipoxia que en normoxia en cargas submáximas. Pese a ello, en el test anaeróbico no se vieron descensos significativos del rendimiento comparando ambos grupos (hipoxia y normoxia).
Dufour et al (2006) ²³⁸	Hipoxia intermitente (activa) (normobárica)	6 semanas de entrenamiento interválico. 18 corredores (2x12, 2x16 y 2x20 minutos incrementando a lo largo del estudio). 3000 metros hipoxia simulada.	Incremento de un 5% en el Vo_{2max} y un 35% en el tiempo hasta la fatiga en el grupo que entreno en hipoxia. No en grupo normoxia. En atletas altamente entrenados: estimulo metabólico

			y adaptaciones periféricas. MEJORAS DEL RENDIMIENTO ANAERÓBICO
Bonetti DL et al (2006) ²³⁹	Hipoxia intermitente (pasiva) (normobárica)	10 competidores subelite de kayak-sprint realizaron un protocolo de 3 semanas. Grupo hipoxia durante 5 días a la semana se exponía durante 5 minutos cada hora.	3 días post-protocolo el grupo de hipoxia mostró un incremento en máximo potencia (+6,8% ±5,2), la media de potencia en series interválicas (5x100metros) (+8,3%±6,7). Aumento en la concentración de hemoglobina 3,6% ±3,2). Estos resultados eran presentes 10 días post-exposición. MEJORA DEL RENDIMIENTO ANAERÓBICO
Ogura Y et al (2006) ³³	Hipoxia intermitente (activa) (normobárica)	7 hombres de nivel amateur realizaron 12 sesiones consistentes en tests ciclistas a intensidad submáxima para establecer la relación entre la carga de trabajo y la demanda de O ² . A la vez realizaron 3 test de Wingate de 40 segundos en normoxia y dos condiciones de hipoxia (FiO ₂ = 16,4 y 12,7 %).	No se encontraron diferencias en la demanda de oxígeno en la condición de 16,4% de O ₂ . Sin embargo para el ejercicio en 12,7% de O ₂ el % de contribución anaeróbica en la ultima fase del test de wingate (20 a 40 s) fue significativamente más alta que en normoxia (p<0,05). Por ello a altos niveles de hipoxia se aumenta significativamente la contribución anaeróbica en relación a normoxia o hipoxia moderada.
Wood MR et al (2006) ²⁴⁰	Hipoxia intermitente (pasiva) (normobárica)	29 hombres entrenados de hockey y fútbol realizaron un estudio que incluyó un grupo que realizaba diariamente durante 15 días un protocolo de 6 minutos de respiración en hipoxia alternado con 4 minutos de normoxia (durante 1 hora al día). El grupo control no realizaba ninguna exposición. Se valoraron test incrementales en tapiz rodante seguidos de 6 sprints de velocidad.	El grupo que entreno 15 días en condiciones de respiración en hipoxia mejoró post-protocolo de manera significativa en comparación con el grupo control en los sprints máximo y la velocidad del test incremental (alta intensidad). A la vez reportaron menores niveles de lactato.
Friedmann B et al (2007) ²⁴¹	Hipoxia intermitente (pasiva) (normobárica)	18 hombres (triatletas y corredores entrenados realizaron 2 supramaximos test en tapiz rodante. 1 en normoxia y otro 4h después de exposición pasiva a hipoxia	No diferencias en el máximo déficit de oxígeno alcanzado. En el grupo hipoxia hubo una significante reducción en el

		normobárica ($FiO_2 = 15\%$). Se valoró el máximo déficit de oxígeno acumulado, lactato y amonio.	tiempo hasta el agotamiento que correlacionó con el déficit acumulado de oxígeno. Los valores de amonio y lactato tuvieron una tendencia a ser menores en condiciones de hipoxia. La conclusión de este estudio describe que la reducción del rendimiento en pruebas de máxima intensidad y corta duración depende a la reducción en la capacidad aeróbica (que ocurre en hipoxia).
Tadibi V et al (2007) ²⁴²	Hipoxia intermitente (pasiva) (normobárica)	20 deportistas entrenados realizaron durante 15 días consecutivos a un hipoxicador a diferentes FiO_2 durante 6 minutos 6 veces por día. Antes y después del protocolo se valoró un test en cicloergómetro (Wingate y un test incremental).	Los resultados demostraron que 1 hora de exposición a hipoxia intermitente (via hipoxicador) no mejoró ni el rendimiento aeróbico ni anaeróbico.
Hamlin M et al (2009) ²⁴³	Hipoxia intermitente (activa) (normobárica)	16 atletas de alto nivel. 10 días consecutivos de entrenamiento (90 minutos al 60-70% de la Frecuencia cardíaca y finalizando con 2 series de 30 segundos en cicloergómetro. 9 sujetos entrenaron en condiciones de hipoxia normobárica con saturaciones de oxígeno entre 88-82% y 7 atletas en normoxia.	Test: a los 2 y 9 días posteriores a finalizar el protocolo. En comparación con el grupo de normoxia; el grupo hipoxia mejoró un 3 y 1,7% (a los 2 y 9 días) en las dos series de 30 segundos (wingate). Se indica una mejora en la capacidad glucolítica en el grupo entrenador en condiciones de hipoxia.
Robertson et al (2010) ²⁴⁴	Hipoxia intermitente (pasiva) (LH-TL) (normobárica)	17 corredores élite. 4 semanas de entrenamiento en hipoxia normobárica y normoxia. Combinando vivir arriba-entrenar abajo + entrenar alto.	Mejoras del Vo_{2max} y de la masa hemoglobina en corredores bien entrenados. Pequeña mejora en carrera de 3000 metros a máxima intensidad 2 días después de la intervención en el grupo de hipoxia. MEJORA DEL RENDIMIENTO
Holliss BA et al (2013) ²⁴⁵	Hipoxia intermitente (activa) (normobárica)	9 sujetos físicamente activos, protocolo de 3 semanas. Entrenamiento de fuerza (extensión de piernas) en hipoxia normobárica (FiO_2 14,5%). 25 minutos entrenamiento. 1 pierna entrenaba en hipoxia y la otra en normoxia (control).	Test: 1 serie de trabajo submáximo constante, 24 segundos de trabajo de máxima intensidad y el control de la recuperación de la fosfofructoquinasa y un test incremental hasta el

			agotamiento. La recuperación de la fosfofructoquinasa después de ejercicio máximo era mejorada en la pierna entrenada en hipoxia (respecto a la pierna entrenada en normoxia). No se describieron cambios en los metabolitos musculares comparando ambas piernas en los test realizados.
Puype J et al (2013) ²⁴⁶	Hipoxia intermitente (activa) (normobárica)	19 deportistas amateurs realizaron 6 semanas de entrenamiento interválico en cicloergómetro . 10 sujetos en hipoxia ($FiO_2 = 14,4$) y 9 en normoxia. Después del entrenamiento se valoró un test máximo incremental de 10 minutos simulando una contrareloj.	La actividad de la fosfofruktokinasa mejoró más en el grupo de hipoxia que normoxia (59% vs. 17%). La potencia máxima desarrollada durante el test también fue incrementada significativamente en el grupo de hipoxia vs. normoxia a la intensidad de 4 mmol.l-1 de lactato. Se concluyó que el entrenamiento en hipoxia mejoró la actividad glucolítica y el rendimiento en umbral anaeróbico en comparación con el entrenamiento en normoxia.
Faiss R et al (2013) ²⁸	Hipoxia intermitente (activa) (normobárica)	40 deportistas entrenados completaron 8 sesiones de entrenamiento (sprints repetidos interválicos) en hipoxia (3000m) y normoxia (400m).	Después del entrenamiento el grupo que entrenó en hipoxia mejoró el número total de series hasta el agotamiento ($p < 0.01$) en comparación con el grupo que entrenó en normoxia (pre vs. post). Sin embargo la potencia generada mejoró en un 6-7% en ambos grupos post entrenamiento. Además se apreciaron mejoras en adaptaciones moleculares y una mayor perfusión sanguínea a los músculos durante ejercicio en el grupo que entrenó en hipoxia.
Bowtell L et al (2013) ³⁵	Hipoxia intermitente (activa) (normobárica)	9 hombres bien entrenados realizaron 10 series de 6 segundos de sprints máximos con 30 segundos de recuperación en 5 condiciones diferentes de FiO_2 (21, 15, 14, 13, 12 %).	En condiciones de hipoxia se constataron las siguientes respuestas: mayor frecuencia cardíaca, mayor ventilación, niveles de lactato, mayor

			desoxigenación muscular y menor activación muscular (EMG) ($p < 0,05$) que en condiciones de normoxia. Pese a estos datos, el nivel de rendimiento en los sprints solo se vió disminuido en las condiciones de 12% de O^2 en comparación con normoxia.
Galvin H et al (2013) ²⁹	Hipoxia intermitente (activa) (normobárica)	30 jugadores de rugby completaron 12 sesiones de sprints repetidos (10x6 segundos con 30 segundos de recuperación) en condiciones de hipoxia ($FiO^2 = 13$) o normoxia (21% O^2). El test se realizó en tapiz rodante pre-post entrenamiento.	El grupo que entrenó en condiciones de hipoxia reportó las siguientes mejoras en comparación con el grupo de normoxia: En un test Yo-Yo (nivel 1) el grupo mejoró significativamente en comparación con el grupo de normoxia ($p < 0,05$).
Álvarez-Herms, 2014 (In press)	Hipoxia intermitente (activa) (hipobárica)	12 sujetos entrenados completaron 12 sesiones de entrenamiento de fuerza resistencia sobre extremidades inferiores (sentadillas, sentadillas con salto y saltos) en hipoxia hipobárica (2500m) (n=6) y normoxia (n=6) durante 4 semanas. Antes y después del entrenamiento se valoró el rendimiento en un test de Bosco de saltos continuos durante 60 segundos valorando la altura de vuelo mantenida durante el tiempo y en periodos de 15 segundos.	Después del entrenamiento en hipoxia existió una mejora en comparación con el grupo de normoxia de 6,75% de altura media de vuelo en el test de 60 segundos de saltos continuos ($p < 0,05$). Lo más destacable fue que el el periodo de 45 a 60 segundos la altura media mantenida por el grupo de hipoxia fue significativamente más alta en el grupo de hipoxia ($p < 0,01$).

Tabla 2. Estudios que valoran alguna medición de rendimiento anaeróbico después de intervenciones de entrenamiento en hipoxia