



Universidad de Valladolid



**Facultad
de Fisioterapia
de Soria**

FACULTAD DE FISIOTERAPIA DE SORIA

Grado en Fisioterapia

TRABAJO FIN DE GRADO

ENTRENAMIENTO EN HIPOXIA Y RENDIMIENTO MUSCULAR

Autor/a: Joseba Díaz López

Tutor/a: Alfredo Córdova Martínez

Cotutor: Diego Fernández Lázaro

SORIA, 9 de junio de 2017

ÍNDICE:

RESUMEN:.....PAG.2

INTRODUCCIÓN:.....PAG.3-4

JUSTIFICACIÓN:.....PAG.5

OBJETIVOS:.....PAG.6

MATERIAL Y MÉTODOS:.....PAG.7-10

RESULTADOS Y DISCUSIÓN:.....PAG.11-19

CONCLUSIÓN:.....PAG.20-21

BIBLIOGRAFÍA:.....PAG.22-25

RESUMEN:

INTRODUCCIÓN: La hipoxia unida al entrenamiento físico está cada vez más aprovechada por los deportistas para conseguir la mejora del rendimiento deportivo. De los distintos tipos de metodología, la hipoxia normobárica e hipobárica, son utilizadas para la mejora del rendimiento muscular. Los cambios moleculares, bioquímicos y funcionales provocados a nivel muscular, por la hipoxia, serán imprescindibles para comprender los progresos de los deportistas.

OBJETIVO: El conocimiento de los efectos fisiológicos, sobre el músculo esquelético durante el entrenamiento deportivo combinado con diferentes tipos de hipoxia.

MATERIAL Y MÉTODOS: Se realiza una revisión narrativa acerca del uso de la hipoxia y el rendimiento muscular. Se utiliza la base de datos Medline, la biblioteca Cochrane y libros de difusión científica especializados en deporte.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN: En hipoxia, la hipertrofia se ve favorecida por un aumento de la secreción de hormonas anabólicas. Aunque varios estudios muestran cambios favorables en las cualidades de fuerza-potencia, queda por describir una correcta pauta de entrenamiento-hipoxia. Es indudable que la hipoxia provoca cambios en los eventos moleculares capaces de general modificaciones en el rendimiento deportivo.

CONCLUSIÓN: Las condiciones de hipoxia normobárica provocan una mayor hipertrofia que en situaciones de normoxia aplicando la misma pauta de entrenamientos. La hipoxia mejora significativamente las cualidades musculares de fuerza y potencia en comparación a la normoxia siempre y cuando apliquemos protocolos de baja intensidad. La inclusión de la hipoxia en los protocolos de tratamiento de fisioterapia, podría ser un elemento acelerador de la recuperación de las patologías musculares

1.INTRODUCCIÓN:

El entrenamiento en altitud y el entrenamiento en hipoxia simulada producen distintas adaptaciones fisiológicas y/o bioquímicas en los atletas, que permiten mejorar el rendimiento.^{1,2}

La hipoxia se define como la reducción del contenido o de la presión parcial de oxígeno (O_2) a nivel celular. Se conocen varios tipos de hipoxia atendiendo a las causas que la provocan y al tiempo de exposición. En relación a las causas, se encuentran la hipoxia anémica, la hipoxia por estancamiento, citotóxica y la hipoxémica. La hipoxia hipoxémica, que es la reducción del contenido de O_2 en sangre, es la más relevante para conseguir una mejora del rendimiento muscular. Aquí, encontramos dos subgrupos: Hipobárica y normobárica. La hipoxia hipobárica, se consigue al producirse una reducción de la presión atmosférica, manteniendo la misma concentración de O_2 en el aire (20,9%) por ejemplo, cuando ascendemos a las montañas. La hipoxia normobárica, se consigue mediante distintos dispositivos que permiten respirar aire a baja concentración de oxígeno como son las máscaras con mezclas de gases, las tiendas hipóxicas o las máscaras normobáricas. Cuando nos referimos al tiempo de exposición la hipoxia se clasifica en tres subgrupos; aguda, crónica o intermitente. La hipoxia aguda, que consiste en la exposición durante un corto periodo de tiempo. Las personas nacidas en altitud o que viven permanentemente en ella, están expuestas al fenómeno de hipoxia crónica. La hipoxia intermitente, cuyo fundamento es alternar ciclos de hipoxia y normoxia. Es la más empleada para conseguir una mejora del rendimiento deportivo^{3,4}.

Uno de los valores determinantes en el control del entrenamiento en altura es la saturación arterial de oxígeno (SaO_2) dado que, para generar mecanismos de adaptación es necesario que la SaO_2 se reduzca hasta valores inferiores al 92%⁵. Dicho valor se consigue a partir de los 2000-3000 m de altitud, con 15,5 % O_2 en caso de hipoxia normobárica o a una altitud inferior de 1500-2000 m sobre el nivel del mar realizando actividad física moderada o intensa³.

La molécula responsable de la mayor parte de respuestas ocasionadas por la hipoxia, es el factor inducible por la hipoxia (HIF-1), un heterodímero compuesto por dos sub-unidades HIF-1 α e HIF-1 β ¹. En hipoxia, la fosforilación del HIF-1 por la acción de las quinasas, permite su activación y translocación al núcleo, lo que lo convierte en un factor activador en la transcripción génica¹, mediado por la subunidad β del HIF-1 y la actuación del co-activador CBP/p300. Los genes que se transcriben son el de la eritropoyetina (EPO), el factor de crecimiento endotelial (VEGF) y la óxido nítrico sintasa (NOS), genes cuyo efecto fisiológico principal es el de mejorar la oxigenación tisular.^{1,2,3.}

Es importante conocer las adaptaciones fisiológicas de la hipoxia y la aplicación del estímulo hipóxico correcto a los deportistas. De esta forma, se evitara reacciones que potencialmente perjudiquen la salud y como consecuencia, disminuyan el rendimiento del deportista^{6,7}

2.JUSTIFICACIÓN:

La hipoxia como método combinado de entrenamiento, adquirió más importancia tras las olimpiadas de México 1968, intensificándose los estudios científicos en los deportistas en los años siguientes hasta la actualidad.

En la actualidad, el deporte de alta competición, cada vez más igualado, hace que los deportistas busquen métodos de entrenamiento que les den una ventaja frente a los rivales para conseguir el éxito.

En el presente trabajo, tratamos de comprender los efectos del entrenamiento deportivo combinado con la hipoxia, que permitirá el conocimiento que los efectos fisiológicos tienen sobre el organismo pero centrando nuestra investigación a nivel del músculo esquelético.

La revisión nos capacitará sobre la inclusión de la hipoxia, como elemento añadido a nivel asistencial, en los protocolos de tratamiento estandarizado de las diversas patologías musculares. De ahí la relevancia de este trabajo.

3. OBJETIVOS:

-Objetivo principal: El conocimiento de los efectos fisiológicos, sobre el músculo esquelético, del entrenamiento deportivo combinado con diferentes tipos de hipoxia.

-Objetivos secundarios:

-Analizar la existencia de distintos fenómenos de crecimiento en tamaño de células musculares, lo que provoca un aumento de tamaño de fibras musculares, hipertrofia.

-Estudiar los componentes del estado físico muscular como son la fuerza y la potencia.

-Comprensión de los eventos moleculares y bioquímicos que suceden en el tejido muscular.

4.MATERIAL Y MÉTODOS:

Para la realización de este trabajo, se realizó una búsqueda bibliográfica de artículos relacionados con el entrenamiento en hipoxia y los cambios que genera, con el fin de descubrir los beneficios e inconvenientes del mismo en el músculo. Se utiliza la base de datos Medline en la cual se incluyen artículos publicados en los últimos 5 años.

En esta revisión narrativa, se incluyen aquellos textos relacionados con la actividad física y el músculo. Además, se emplearon varios artículos para comprender los mecanismos generales de la hipoxia.

Todas aquellas publicaciones con más de 5 años de antigüedad y todos los textos relacionados con diversas patologías no musculares, fueron descartadas.

Se realizan dos tipos de búsqueda. Para la introducción se han consultado dos artículos de Córdova et al, un libro relacionado con la fisiología de la hipoxia y un artículo de Coppel J et al⁴. También se consulta el Google académico pero se descartan los 3 artículos encontrados por ser innecesarios. La base de datos Medline sirve para seleccionar aquellos artículos que ayuden a comprender los efectos generales de la hipoxia. La bibliografía del libro consultada, sirve para realizar una búsqueda de dichos artículos y ampliar los conocimientos.

Como se ha mencionado anteriormente, para la realización de la revisión propiamente dicha y para dar respuesta a los objetivos planteados, se utiliza la base de datos Medline.

En un principio también se plantea la posibilidad de utilizar la biblioteca Cochrane pero la falta de artículos (19, todos ellos relacionados con patologías), hace que se descarte dicha posibilidad.

En cuanto a la estrategia de búsqueda, se utilizan varios términos y el operador booleano “AND” como nexos de búsqueda (Tabla 1). Las palabras son seleccionadas teniendo en cuenta los objetivos que se pretenden conseguir. No

se utiliza el operador booleano “OR” debido a que se pretende relacionar la hipoxia y el músculo y no cada término por separado.

Tabla 1: Términos utilizados junto al operador booleano “AND”

Término en inglés	Término en castellano
Hypoxia AND muscle performance	Hipoxia AND rendimiento muscular
Hypoxia training AND muscle	Entrenamiento en hipoxia AND músculo
Intermittent hipoxia AND muscle	Hipoxia intermitente AND músculo

Para reducir el número de artículos se utilizan los siguientes filtros:

- Publicados en los últimos 5 años
- Realizados en humanos

A continuación se procede a introducir los términos de uno en uno. En la tabla 2 se puede observar en número de artículos totales encontrados con los filtros aplicados.

Tabla 2: Relación de términos de búsqueda y publicaciones encontradas

Término de búsqueda	Número de publicaciones
Hypoxia AND muscle performance	82
Hypoxia training AND muscle	112
Intermittent hipoxia AND muscle	47

Tras realizar la búsqueda se comenzó a leer los títulos de cada artículo. Para la selección de los mismos se aplican distintos criterios de inclusión y exclusión. Los criterios aplicados son los siguientes:

-Criterios de inclusión:

- 1) Artículos relacionados con el entrenamiento en hipoxia.
- 2) Tener relación directa con el músculo.
- 3) Relacionados con la actividad deportiva.

-Criterios de exclusión:

- 1) Relacionado con patologías no musculares.
- 2) Estudios no referentes al músculo.

Se procedió a leer el abstract con el fin de reducir más la búsqueda y seleccionar los artículos válidos. Se descartan aquellos que no siguen una evolución del paciente o los relacionados únicamente con el aspecto celular. (Tabla 3).

Tabla 3: Relación de artículos relacionados por el título y por el abstract

Término de búsqueda	Artículos seleccionados por título	Artículos seleccionados tras abstract
Hypoxia AND muscle performance	14	13
Hypoxia training AND muscle	17	6
Intermittent Hypoxia AND muscle	10	1

A parte de la búsqueda realizada en Medline, en la revisión se analiza la bibliografía de las tres revisiones encontradas^{1,4,8} para comprender algunos mecanismos de acción y para contrastar más resultados. Además, ha sido consultado el libro *Inmunidad en el deporte* de Córdova A²⁵. y *Fisiología de la hipoxia y entrenamientos en altitud* de Urdampilleta A³.

5.RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

El entrenamiento deportivo combinado al entrenamiento hipóxico, muestra varias adaptaciones fisiológicas y bioquímicas. Además, las exposiciones a hipoxia aguda con más de dos meses de duración también pueden crear cambios estructurales en el músculo esquelético¹. Las modificaciones más importantes que afectan al sistema muscular se presentan a continuación.

Hipertrofia:

En el estudio realizado por Feriche et al⁸, se concluye que los entrenamientos en hipoxia para conseguir cambios hipertróficos, se deberán realizar a unas altitudes simuladas de 13-16% de concentración de O₂ en el aire o bien, a 2500-3000m de altitud. El entrenamiento deberá ser de baja resistencia ($\leq 30\%$ 1RM) para favorecer el aumento de repeticiones con menores periodos de descanso. Los cambios en el volumen muscular se deben a las adaptaciones metabólicas como son el aumento de testosterona, hormona del crecimiento y citoquinas⁹. Si se pretenden conseguir los mismos cambios musculares más rápidamente, se realizarán ejercicios con 6-12 repeticiones y a intensidades mayores del 65% de 1RM manteniendo iguales el resto de condiciones de hipoxia⁸.

Nishimura et al¹⁰, comprobaron mediante el uso de un dispositivo de hipoxia normobárica, que durante un entrenamiento de 6 semanas, trabajando al 70% de 1RM y en un 16% de concentración de O₂ de aire, se conseguían incrementos significativos en el volumen muscular.

Manimmanakorn et al¹¹ observaron un aumento del tamaño muscular de un 3,2% tras un entrenamiento de 5 semanas a bajas resistencias (20% de 1RM) en saturaciones de oxígeno del 80% conseguidas mediante hipoxia normobárica.

Kurobe et al¹², realizaron un estudio donde los deportistas se dividieron en dos grupos. Uno de ellos, se entrenó en normoxia (20,9% de FiO₂) mientras que otro grupo se ejercitó en hipoxia normobarica durante 95 minutos y con una concentración de oxígeno de 12,7%. Ambos grupos realizaban tres

repeticiones de extensión de hombro a 10 RM hasta el fallo en intervalos de 1 minuto, 3 veces a la semana durante 8 semanas.

Se comprobó un aumento más significativo del diámetro del tríceps y de los niveles de hormona del crecimiento (GH) en el grupo entrenado en hipoxia en comparación con el entrenado en normoxia. A su vez, los deportistas en el grupo hipoxia son capaces de realizar un mayor número de repeticiones

Por último, el estudio llevado a cabo por Scott et al¹³, muestran como el entrenamiento con cargas de trabajo altas (>80% 1RM) y realizado en hipoxia normobárica (16%-13% de fracción inspirada de O₂ FiO₂) no surge un efecto significativo en el rendimiento con respecto al realizado en normoxia.

La mayor parte de los autores^{8,10,11,12} muestran que la utilización de la hipoxia provoca modificaciones hipertróficas en la musculatura esquelética. El aumento de volumen muscular observado por Feriche et al, Nishimura et al y Kurobe et al es significativo en comparación a los deportistas entrenados en normoxia independientemente de la pauta de entrenamiento ejecutada. El denominador común entre los estudios, es la utilización de la hipoxia normobárica como método de reducción de O₂ sanguíneo.

Contrariamente, Scott et al¹³, no muestra unos cambios hipertróficos significativos entre los grupos de normoxia e hipoxia. Quizás, por una inadecuada combinación de entrenamiento físico e hipoxia.

Fuerza y potencia:

La influencia del entrenamiento muscular combinado con la hipoxia muestra resultados poco concluyentes y controvertidos en el desarrollo en las cualidades de fuerza y potencia en deportistas. Los resultados de los diferentes artículos se relatan a continuación.

Hamlin et al¹⁴ vieron como en hipoxia hipobárica se producía un aumento del reclutamiento de las fibras musculares rápidas. De este modo, se verán favorecidos aquellos deportes en los que la potencia es fundamental como son los deportes de velocidad, saltos y lanzamientos.

Ferliche et al¹⁵, comprobaron en luchadores profesionales, como la fuerza y la potencia se veían aumentadas gracias a la combinación de una correcta pauta de entrenamientos y la utilización de la hipoxia hipobárica. En este estudio se divide a 28 luchadores profesionales en dos grupos. Uno de ellos trabaja en normoxia y a continuación tras 48 horas de descanso acuden a 2300 m y se ejercitan en hipoxia hipobárica. El otro grupo se ejercita en normoxia y tras 48 horas de descanso se ejercita en hipoxia normobárica a 2300 m simulados. Se miden la velocidad, potencia y fuerza máxima en una press banca. El entrenamiento en hipoxia hipobárica provoca una mayor potencia media y una mayor potencia máxima (3,29%) con respecto al grupo entrenado en hipoxia. También se provoca un aumento de la fuerza máxima (6%).

La literatura describe varios estudios que no presentan diferencias significativas en la fuerza y en la potencia tras la combinación de ejercicio físico y entrenamiento en hipoxia.^{16,17,18}

Ramos et al¹⁶ estudiaron a 12 atletas en un circuito con ejercicios de alta intensidad. Fueron divididos en tres grupos: Normoxia, hipoxia normobárica moderada (FiO₂ 16% 2100m) e hipoxia normobárica alta (FiO₂ 13% 3800m). La potencia generada y el pico de potencia fueron menores en el grupo de hipoxia en comparación con el de normoxia (p<0,05). El gasto energético fue mayor en los dos grupos de hipoxia en comparación con el grupo normoxia (p≤0,01).

En el estudio de Turner et al¹⁷, 9 atletas fueron entrenados en condiciones de hipoxia normobárica moderada FiO₂ 17% y en normoxia. Realizaron una sesión de bicicleta de 40 minutos con esprines intercalados. Se midió la potencia máxima, la potencia media generada y la fuerza aplicada en el sprint con mayor potencia (en watos W), observándose una reducción de todos los parámetros en los sujetos entrenados en hipoxia. Los datos obtenidos son; 944±155 W vs. 983±167 W en potencia máxima, 900±176 vs. 853±177 W en potencia media y 102±20 vs. 108±20 kJ en fuerza aplicada.

En el estudio de Ho et al¹⁸, se combinaron ejercicios de baja resistencia realizados en una hipoxia normobárica de 15% de FiO₂. Dieciocho sujetos fueron divididos en dos grupos (normoxia e hipoxia) y se entrenaron durante 6

semanas. No se observaron diferencias significativas entre los dos grupos en la mejora de los parámetros relacionados con la fuerza.

Los resultados muestran disparidad en los hallazgos. Feriche et al¹⁵ y Hamlin et al¹⁴, demuestran la efectividad del entrenamiento combinado para mejorar significativamente las cualidades musculares de fuerza y potencia. De entre los distintos tipos de hipoxia, la hipoxia hipobárica se muestra como la más efectiva a la hora de provocar cambios en la fuerza y en la potencia de los deportistas¹⁵.

Sin embargo, según otros autores^{16,17} la hipoxia normobárica afecta negativamente al rendimiento muscular provocando una reducción en los valores de fuerza y potencia. Ramos et al¹⁶ y Turner et al¹⁷, combinan la hipoxia con ejercicio de alta intensidad, aumentando significativamente el estrés y pudiendo provocar un descenso en las cualidades musculares.

Cambios moleculares:

La hipoxia estimula distintos cambios en eventos moleculares y en distintas rutas bioquímicas.

En el trabajo de Córdova et al¹, se observa que la combinación de ejercicio físico e hipoxia, modula la expresión génica de la mioglobina, aumentando los niveles de ARNm gracias a la acción reguladora del HIF-1. Ello provoca una mejora en el transporte de oxígeno a nivel muscular. Además de lo anterior, también reportan que el ejercicio físico y la hipoxia traerán una disminución de la actividad inmune junto a un aumento de la interleukina-6 (IL-6) debido a la mayor respuesta simpática, siendo beneficioso para el rendimiento deportivo debido a la respuesta adaptativa.

Ciclistas profesionales fueron tratados con hipoxia intermitente a 12,6% de FiO₂ a intervalos de 5 minutos durante 20 minutos totales después de una etapa de una vuelta ciclista. Se observó cómo los ciclistas tratados con hipoxia intermitente sufrían un aumento significativo de los niveles de EPO al final de la vuelta ciclista de 3 semanas en comparación al grupo control tratado sin hipoxia².

Uno de los estudios más novedosos pone de manifiesto los rápidos beneficios de los atletas entrenados en hipoxia. Es el descrito por Kasai N et al¹⁹ en 2017, realizaron un estudio a 18 atletas. Fueron repartidos en dos grupos, un grupo realizó un entrenamiento de sprints durante seis días consecutivos en normoxia. El otro, realizó la misma pauta de entrenamiento pero en hipoxia normobárica con una fracción de oxígeno de 14,5%. Fueron medidas 10x6 segundos de sprints, un sprint máximo de 30 s, el volumen máximo de oxígeno y una carrera de 60 m. Se observó una ventaja en aquellos individuos entrenados en hipoxia normobárica frente a los entrenados en normoxia. Este beneficio, se tradujo en un aumento de la actividad de la enzima creatinquinasa (CK) lo que evidentemente, provoca un aumento significativo de la fosfocreatina ($p < 0,05$) (medida por resonancia espectroscópica). Como consecuencia, a nivel de rendimiento deportivo, los sujetos entrenados en hipoxia presentaron una mayor potencia de arranque.

La hipoxia se debe combinar adecuadamente con el ejercicio físico. Esta premisa se pone de manifiesto en el reciente estudio (2017) de Brocherie²⁰. En él, además de combinar el ejercicio físico y la hipoxia, se establece la novedad de vivir en altitud. El protocolo de investigación que se realizó a los deportistas, consistió en vivir durante 14 días en hipoxia normobárica (más de 14 h día con fracción de O₂ de 14,5-14,2%) realizando ejercicio específico en normoxia pero con 6 repeticiones de un ejercicio de máxima intensidad a una altitud simulada de 3000 m (hipoxia normobárica). Las mediciones se hicieron antes de los entrenamientos, 2-3 días después y 3 semanas después. Este estudio muestra un aumento de los niveles de HIF-1, VEGF y de mioglobina (Mb) pero sólo duraderos durante 3 semanas. Así, estos cambios moleculares deberán coincidir con el ciclo competitivo.

El regulador de la biogénesis mitocondrial PGC-1 y la citrato sintasa (CS) se aumentaban junto a la óxido nítrico sintasa endotelial (NOSe) y neuronal (NOSn). Los niveles de monocarboxilasa transportador MCT1 y el GLUT-1 se observaban más elevados. Todos estos cambios provocan una adaptación en la captación y transporte de oxígeno y un cambio enzimático en el metabolismo mitocondrial, viéndose mejorado significativamente el rendimiento.

En el estudio de Sumi et al²¹, 9 atletas entrenados fueron estudiados en normoxia y en hipoxia. Así, en normoxia, realizaron 10x3 min a 95% de VO₂max con descanso de 1 min a 60%VO₂max seguido de carrera continua durante 30 min a 85% VO₂max. Tras unos días realizaron el mismo entrenamiento pero en hipoxia normobárica con 14,5% de FiO₂. Se evaluó el daño muscular y la respuesta inflamatoria inducida por el ejercicio en hipoxia moderada. Los niveles de lactato deshidrogenasa (LDH) y por tanto de su producto, el lactato, de Mb y de la IL-6 no mostraban cambios significativos entre ambos grupos. Concluyeron que el ejercicio no producía un aumento mayor del daño o de la inflamación muscular en los sujetos entrenados en hipoxia en comparación con los entrenados en normoxia.

En el trabajo de Faiss et al²², se ponen de manifiesto las ventajas del entrenamiento interválico de esprints junto con la hipoxia. Un aumento de Mb y de CS facilita el aumento del reclutamiento de fibras rápidas, la mejor utilización del oxígeno y las adaptaciones moleculares de las fibras de la musculatura esquelética.

Uno de los estudios que pone en duda los beneficios del entrenamiento en hipoxia combinado con el ejercicio deportivo es el realizado por Hollis y su grupo de trabajo²³. Nueve sujetos entrenados, realizaron un entrenamiento de los extensores de rodilla durante 3 semanas. Una extremidad la ejercitaban en normoxia y la otra en hipoxia normobárica durante 25 min y FiO₂ de 14,5%. Antes y después del entrenamiento se realizaba ejercicio submáximo y 24 segundos de ejercicio máximo. A pesar de producirse un aumento de la fosfocreatina por el incremento de la creatinquinasa, no se mostraron diferencias significativas en el tiempo de agotamiento entre los dos grupos.

En la misma línea, Puype et al²⁴, observaron que el entrenamiento interválico de esprints en hipoxia normobárica de 14% de FiO₂, no producía variaciones significativas en el rendimiento en comparación con el grupo de normoxia. Se realizó un entrenamiento interválico de esprints durante 6 semanas con 4 esprints de 30 segundos y 4,5 min de descanso y aumentando el número de esprints cada semana. Se observó que la fosfofructokinasa (FFK-1) muscular aumentaba en mayor medida en los sujetos que entrenaron

en hipoxia en comparación con los entrenados en normoxia. Sin embargo, no se tradujo en ningún efecto fisiológico en la ruta glucolítica, al no disponer de sustrato la FFK-1.

Se observan claros beneficios significativos en la combinación del entrenamiento físico y la hipoxia^{1,2,19,20,21,22} (tabla 4). Las exposiciones simuladas de 14,5%-12,6% de FiO_2 son efectivas para la mejora del rendimiento muscular gracias al aumento de diversas enzimas metabólicas. La exposición a hipoxia hipobárica también muestra mejorías en el rendimiento físico del deportista.

Sin embargo, el trabajo con altas intensidades en hipoxia, no favorece la mejora del rendimiento deportivo a pesar de producir cambios moleculares. Hollies et al²³ y Puype et al²⁴, no muestran diferencias significativas en los sujetos entrenados en hipoxia en comparación con los entrenados en normoxia. Creemos que los ejercicios a altas intensidades son los limitadores de la mejora de las cualidades del deportista y no el protocolo de hipoxia empleado. Esto se puede deber a que los ejercicios de gran intensidad reducen la inmunidad del organismo y el rendimiento físico, mientras que las actividades aeróbicas provocan unas reacciones antiinflamatorias y de adaptación para defenderse del estrés.²⁵

Riesgos:

Las estancias en altitud entrañan ciertos riesgos como son los descritos por Chaudhary y su grupo de trabajo²⁶. Observaron cómo alturas mayores de 5500 m provocan una pérdida de masa muscular del 15% y una pérdida de fuerza del 6,4%. Esto se puede deber al balance negativo entre síntesis y degradación de proteínas.

Otros autores que describen las consecuencias adversas, son aquellas que se han observado en alpinistas. Estancias de hipoxia hipobárica de 5300 metros durante más de dos semanas, provocan una disminución del 30% de las enzimas implicadas en la obtención de energía (ATP) que participan en la fosforilación oxidativa, ciclo de Krebs y en el catabolismo de los ácidos grasos⁶. Además de producirse la reducción de la peroxisome proliferator-activated

receptor gamma coactivator 1 (PGC-1)⁷. Este déficit energético ocasiona rápidamente un desgaste progresivo, fundamentalmente a nivel muscular, hasta llegar a la fatiga⁶.

Es de resaltar que en los trabajos analizados, los detalles de la dieta que llevan los deportistas durante el periodo de entrenamiento no son considerados. Durante las exposiciones a la hipoxia tanto normobárica como hipobárica, las demandas energéticas aumentan debido al mayor incremento de las hormonas simpático-adrenales. Por esa razón, es necesario un mayor aporte de kilocalorías en el entrenamiento en hipoxia, debido a que un deficiente aporte calórico provocará una disminución del rendimiento y una nula mejoría en las cualidades musculares del deportista.³

De este modo Michalczyk et al²⁷, observan que sin un correcto aporte de nutrientes y una buena hidratación, la hipoxia puede perjudicar significativamente tanto la salud como el rendimiento del deportista en comparación con la misma pauta de entrenamientos llevada a cabo en normoxia. La ingesta de carbohidratos será fundamental (12g/kg peso)³ debido a la mayor utilización de hidratos de carbono como combustible¹. En el caso de potenciar las cualidades musculares, se deberá acompañar de una rica ingesta de proteínas (1,6g/kg)³. El aporte de hierro y de antioxidantes también será fundamental para mantener altos los niveles de eritrocitos y evitar la fatiga. La suplementación con magnesio es esencial para el rendimiento deportivo²⁸. Además, bajo condiciones hipóxicas, tal y como reportan Córdova et al²⁹, se produce un descenso de magnesio en corazón, hígado, riñón y lo más importante, la musculatura esquelética, gastrocnemios. Ello indicaría la obligatoria suplementación con magnesio a la hora de realizar ejercicio en hipoxia.

Otra de las limitaciones de los estudios analizados, es la de no tener en consideración la propia genética de los deportistas. Los deportistas se clasifican en respondedores y en no respondedores según la magnitud de respuesta a la hipoxia y la adaptación a la misma. En los estudios que no se han mostrado resultados favorables^{13,16,17,18,23,24}, (tabla 4) los factores genéticos

de los deportistas quizás sean de sujetos no respondedores³, lo que llevaría a una mala estrategia molecular para regular la HIF-1.¹

La presencia de la variante beneficiosa del gen peroxisome proliferator-activated receptor A (PPARA), presente en los Sherpas del Himalaya, provocará una menor utilización de los ácidos grasos a nivel muscular, una mejora en la actividad energética muscular y una protección frente al estrés oxidativo.³⁰ Por tanto, sería aconsejable aplicar un estímulo hipóxico en aquellos deportistas que tuvieran una expresión significativa de este gen. Además, otros de los genes presentes en los sujetos de los estudios con resultados favorables (ver tabla 4), serían los genes EGLN1, EPAS Y BHLE4, mostrando así una mayor influencia en el rendimiento de aquellos deportistas que responden favorablemente al estímulo de hipoxia.³¹

Como hemos observado, las estancias en altitud pueden tener componentes perjudiciales para la salud^{6,7,26}. Sin embargo, la utilización de la hipoxia normobárica a unos niveles adecuados, carece de aspectos perjudiciales en la salud y por tanto, en la disminución del rendimiento deportivo.

6.CONCLUSIÓN:

-Las condiciones de hipoxia normobárica provocan una mayor hipertrofia que en situaciones de normoxia aplicando la misma pauta de entrenamientos.

-La hipoxia mejora significativamente las cualidades musculares de fuerza y potencia en comparación a la normoxia siempre y cuando apliquemos protocolos de baja intensidad.

-La hipoxia normobárica provoca cambios favorecedores de los eventos moleculares y bioquímicos del tejido muscular para mejorar el rendimiento.

- La inclusión de la hipoxia en los protocolos de tratamiento de fisioterapia, podría ser un elemento acelerador de la recuperación de las patologías musculares.

Tabla 4: Relación de autores y efectos obtenidos en cada apartado analizado

<u>HIPERTROFIA</u>		<u>FUERZA Y POTENCIA</u>		<u>CAMBIOS MOLECULARES</u>	
+	-	+	-	+	-
Feriche ⁸	Scott ¹³	Hamlin ¹⁴	Ramos ¹⁶	Córdova ¹	Hollis ²³
Mannimmanakorn ¹¹		Feriche ¹⁵	Turner ¹⁷	Córdova ²	Puype ²⁴
Nishimura ¹⁰			Ho ¹⁸	Kasai ¹⁹	
Kurobe ¹²				Brocherie ²⁰	
				Sumi ²¹	
				Faiss ²²	

7.BIBLIOGRAFÍA:

1: Córdova A, Pascual J, Fernandez D, Alvarez M. Muscular and heart adaptations of exercise in hypoxia. Is training in slow hypoxia healthy? *Med Clin* 2017; 23;148: 469-474.

2: Villa JG, Lucía A, Marroyo JA, Avila C, Jiménez F, Garcia-López J, et al. Does intermittent hypoxia increase erythropoiesis in professional cyclists during a 3-week race?. *Can J Appl Physiol*. 2005; 30: 61-73

3: Urdampilleta A. Fisiología de la hipoxia y entrenamientos en altitud. Ed: primera. Ed: ErikaEsport San Sebastian; 2015

4: Coppel J, Hennis P, Gilbert-Kawai E, Grocott MP. The physiological effects of hypobaric hypoxia versus normobaric hypoxia: a systematic review of crossover trials. *Extrem Physiol Med*. 2015; 4: 1-19

5: Urdampilleta A. Eficacia de un programa de entrenamiento interválico de Fuerza-Resistencia en hipoxia intermitente combinado a un plan Dietético-Nutricional en la preparación integral de Alpinistas. Tesis doctoral. Universidad Miguel Hernández Elche. 2015

6: Levett DZ, Viganò A, Capitanio D, Vasso M, De Palma S, Moriggi M et al. Changes in muscle proteomics in the course of the Caudwell Research Expedition to Mt. Everest. *Proteomics*. 2015; 15: 160-171

7: Levett DZ, Radford EJ, Menassa DA, Graber EF, Morash AJ, Hoppeler H et al. Acclimatization of skeletal muscle mitochondria to high-altitude hypoxia during an ascent of Everest. *FASEB J*. 2012; 26: 1431-1441

8: Feriche B, García-Ramos A, Morales AJ, y Padial P. Resistance Training Using Different Hypoxic Training Strategies: a Basis for Hypertrophy and Muscle Power Development. *Sports Med Open*. 2017; 3: 1-12

9: Abe T, Yasuda T, Midorikawa T, Sato Y, Kearns CF, Inoue K et al. Skeletal muscle size and circulating IGF-1 are increased after two weeks of twice daily 'KAATSU' resistance training. *Int J Kaatsu Training Res*. 2005; 1: 6–12

- 10: Nishimura A, Sugita M, Kato K, Fukuda A, Sudo A, Uchida A. Hypoxia increases muscle hypertrophy induced by resistance training. *Int J Sports Physiol Perform.* 2010; 497-508
- 11: Manimmanakorn A, Manimmanakorn N, Taylor R, Draper N, Billaut F, Shearman JP, et al. Effects of resistance training combined with vascular occlusion or hypoxia on neuromuscular function in athletes. *Eur J Appl Physiol.* 2013; 113: 1767-1774.
- 12: Kurobe K, Huang Z, Nishiwaki M, Yamamoto M, Kanehisa H, Ogita F. Effects of resistance training under hypoxic conditions on muscle hypertrophy and strength. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2015; 35: 197-202
- 13: Scott BR, Slattery KM, Sculley DV, Hodson JA, Dascombe BJ. Physical performance during high-intensity resistance exercise in normoxic and hypoxic conditions. *J Strength Cond Res.* 2015; 29: 807-815
- 14: Hamlin MJ, Hopkins WG, Hollings SC. Effects of altitude on performance of elite track-and-field athletes. *Int J Sports Physiol Perform.* 2015; 10: 881-887
- 15: Feriche B, García-Ramos A, Calderón C, Drobic F, Bonitch-Góngora JG, Galilea PA et al. Effect of acute exposure to moderate altitude on muscle power: hypobaric hypoxia vs. normobaric hypoxia. *PLoS One.* 2014; 4; 9: 1-13
- 16: Ramos DJ, Rubio JA, Freitas TT, Camacho A, Jiménez JF, Alcaraz PE. Acute Physiological and Performance Responses to High-Intensity Resistance Circuit Training in Hypoxic and Normoxic Conditions. *J Strength Cond Res.* 2017;31: 1040-1047
- 17: Turner G, Gibson OR, Maxwell NS. Simulated moderate hypoxia reduces intermittent sprint performance in games players. *J Sports Med Phys Fitness.* 2014; 54: 566-574
- 18: Ho JY, Kuo TY, Liu KL, Dong XY, Tung K. Combining normobaric hypoxia with short-term resistance training has no additive beneficial effect on muscular performance and body composition. *J Strength Cond Res.* 2014; 28: 935-941

- 19: Kasai N, Mizuno S, Ishimoto S, Sakamoto E, Maruta M, Kurihara T et al. Impact of 6 consecutive days of sprint training in hypoxia on performance in competitive sprint runners. *J Strength Cond Res.* 2017; 1-32
- 20: Brocherie F, Millet GP, D'Hulst G, Van Thienen R, Deldicque L, Girard O. Repeated maximal-intensity hypoxic exercise superimposed to hypoxic residence boosts skeletal muscle transcriptional responses in elite team-sport athletes. *Acta Physiol (Oxf).* 2017; 19: 1-26
- 21: Sumi D, Kojima C, Goto K. Impact of Endurance Exercise in Hypoxia on Muscle Damage, Inflammatory and Performance Responses. *J Strength Cond Res.* 2017; 1-36
- 22: 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: 45-50
- 23: Holliss BA, Fulford J, Vanhatalo A, Pedlar CR, Jones AM. Influence of intermittent hypoxic training on muscle energetics and exercise tolerance. *J Appl Physiol (1985).* 2013; 114: 611-619.
- 24: Puype J, Van Proeyen K, Raymackers JM, Deldicque L, Hespel P. Sprint interval training in hypoxia stimulates glycolytic enzyme activity. *Med Sci Sports Exerc.* 2013; 45: 2166-2174
- 25: Córdova A, Álvarez M. Inmunidad en el deporte. Ed. Gymnos. Madrid, 2001
- 26: Chaudhary P, Suryakumar G, Prasad R, Singh SN, Ali S, Ilavazhagan G. Chronic hypobaric hypoxia mediated skeletal muscle atrophy: role of ubiquitin-proteasome pathway and calpains. *Mol Cell Biochem.* 2012; 364: 101-113
- 27: Michalczyk M, Czuba M, Zydek G, Zajac A, Langfort J. Dietary Recommendations for Cyclists during Altitude Training. *Nutrients.* 2016; 8: 1-16
- 28: Córdova A, Fernandez-Lázaro D, Mielgo-Ayuso J, Bonilla L. Behaviour of serum magnesium during a 3-weeks stage race in cyclists. *Euro. J. Sports. Exerc. Sci.* 2017; 5: 10-17

29: Córdova A, Escanero JF, Gimenez M. Magnesium distribution in rats after maximal exercise in air and under hypoxic conditions. *Magnes Res.* 1992; 5: 23-27

30: Horscroft JA, Kotwica AO, Laner V, West JA, Hennis PJ, Levett DZ et al. Metabolic basis to Sherpa altitude adaptation. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2017

31: Lorenzo FR, Huff C, Myllymäki M, Olenchock B, Swierczek S, Tashi T et al. A genetic mechanism for Tibetan high-altitude adaptation. *Nat Genet.* 2014; 46: 951-6