



# COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

ICADE

CIHS

Curso 2023/2024 Grado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte:

## “EFECTOS DEL MÉTODO DE ENTRENAMIENTO LIVE HIGH-LOW TRAINING EN DEPORTISTAS DE RESISTENCIA CÍCLICOS.”



**Autor: Ion García Lucas**

**Tutor: José Carlos Calero**

# Índice

1.	Resumen/palabras clave.....	3
2.	Introducción o Justificación del tema elegido.....	6
3.	Marco Teórico.....	7
3.1	Entrenamiento deportistas de resistencia.....	7
3.2	Consumo de oxígeno.....	9
3.3	Volumen máximo de oxígeno.....	9
3.4	Factores limitantes del consumo máximo de oxígeno.....	11
3.5	Métodos entrenamiento en altura.....	14
3.5.1	Live High – Train High (LHTH).....	14
3.5.2	Intermitent Hipoxia Training (IHT).....	15
3.5.3	Living High - Training Low (LHTL).....	15
3.6	Variación del consumo máximo de oxígeno con la altura.....	17
4.	Objetivos.....	19
5.	Material y métodos.....	21
6.	Resultados.....	24
7.	Discusión o análisis de la información recopilada.....	30
8.	Conclusiones.....	36
9.	Futuras líneas de investigación.....	38
10.	Referencias bibliográficas.....	40

## **1. Resumen/palabras clave.**

En esta revisión bibliográfica se han explorado los efectos del método de entrenamiento en altura Living High – Training Low (LHTL) en atletas de deportes de resistencia cíclicos. Para su elaboración se ha examinado la bibliografía existente para comprender las adaptaciones fisiológicas y el impacto en el rendimiento inducidas por este método de entrenamiento. Para poder realizar un estudio más fiable, se ha realizado una búsqueda bibliográfica en base a los criterios de inclusión y exclusión, tras ello, se han seleccionado los 12 artículos más recientes y relevantes que han estudiado el método de entrenamiento LHTL. Los resultados obtenidos en estos estudios demuestran que el LHTL produce mejoras significativas en el consumo máximo de oxígeno ( $VO_{2\text{máx.}}$ ), en la masa de hemoglobina ( $Hb_{\text{mass.}}$ ), en el umbral de lactato y en la capacidad aeróbica. Estas adaptaciones se traducen en una mayor eficiencia en la entrega de oxígeno a los tejidos musculares durante el ejercicio, produciendo un mayor rendimiento deportivo. Además de esto, se evalúan diferentes factores que pueden influir en el éxito de LHTL, como la duración del estudio, las horas totales en hipoxia o la altura a la que se realiza la investigación. Considerando una altura óptima para la estancia en altura los 3000m y una duración entre los 18 y 28 días. Para finalizar se propone el estudio de los efectos a largo plazo de LHTL, el estudio del método de entrenamiento en grupos de sujetos más específicos y el estudio de estrategias de recuperación y optimización de la carga.

## **Resume.**

This work is a literature review that explores the effects of the Living High – Training Low (LHTL) altitude training method on athletes on cyclic endurance sports. To carry out this review, existing literature has been examined to understand the physiological adaptations and the impact on performance induced by this training method. In order to carry out a more reliable study, the 12 most recent and relevant articles that have studied the LHTL training method have been selected. The results obtained in these studies demonstrate that LHTL produces significant improvements in maximal oxygen consumption ( $VO_{2max.}$ ), hemoglobin mass ( $Hb_{mass.}$ ), lactate threshold and aerobic capacity. These adaptations translate into a greater efficiency in the delivery of oxygen to muscle tissues during exercise, resulting in enhanced athletic performance. In addition to this, various factors that may influence the success of LHTL are evaluated, such as study duration, total hours in hypoxia or altitude at which the study is performed. The main results obtained show us that the LHTL training method produces significant improvements in  $VO_{2max.}$ ,  $Hb_{mass.}$ ,  $O_2$  transport, lactate threshold and aerobic capacity. An optimal height for staying at altitude is 3000m and with a duration between 18 and 28 days. Finally, the study suggests examining the long-term effects of LHTL, the studying the training method in more specific groups of subjects and exploring recovery strategies and load optimization.

**Palabras clave:** entrenamiento en altura, Live High – Train Lo, LHTL,  $VO_{2\text{máx.}}$ ,  $H_{\text{bmass.}}$ , deportes de resistencia cíclicos.

**Key words:** altitude training, Live High – Train Low, LHTL,  $VO_{2\text{max.}}$ ,  $H_{\text{bmass.}}$ , cyclic endurance sports.

## **2. Introducción o Justificación del tema elegido.**

El presente trabajo se trata de un TFG de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte elaborado en el 5º curso del doble grado de CAFYDE y Magisterio. En este TFG se trata de abordar los efectos del  $VO_2$  con la metodología del entrenamiento en altitud Live High-Train Low (LHTL), este tema ha sido elegido debido a que soy deportista de alto rendimiento en esquí de montaña y durante los últimos años he realizado ciertas estancias en altura. Por este motivo, me interesan los deportes de resistencia cíclicos, en especial, el ciclismo, carreras por montaña, rollerski y esquí de montaña, ya que durante todo el año los practico a diario para entrenar. Debido a las características de mi deporte, durante las concentraciones en altura, siempre se lleva a cabo la metodología de entrenamiento Living High-Training High (LHTH) por lo que me gustaría conocer más a fondo otras metodologías utilizadas en altura. Tras leer algún artículo y a deportistas del esquí de fondo nórdicos realizar la metodología de entrenamiento en altura Living High-Training Low (LHTL), he decidido investigar los posibles efectos que esta tiene sobre el  $VO_2$ .

### **3. Marco Teórico.**

Como se ha expuesto en el apartado anterior, a continuación, se va a exponer un análisis más detallado acerca del efecto en el  $VO_2$  mediante el método de entrenamiento LHTL en deportes de resistencia cíclicos. Para poder llevar a cabo esta investigación se ha agrupado la información en diferentes temáticas, las cuales irán de lo más general a lo más concreto donde nos encontraremos los cambios obtenidos en los diferentes estudios en el  $VO_{2m\acute{a}x}$ .

#### **3.1 Entrenamiento deportistas de resistencia.**

Como bien nos explica Jornet et al. (2019) el entrenamiento en deportistas de resistencia tiene como principal objetivo realizar el deporte de resistencia que practiquemos durante el mayor tiempo posible, y en el caso de la competición realizarlo a la máxima intensidad y en el menor tiempo posible. Para poder lograr este objetivo, los deportistas dependen de la fatiga, esta es la limitación que tiene el cuerpo ante los deportes de resistencia. La fatiga hace que nos volvamos más lentos, bajando de esta forma nuestro rendimiento, debido a la complejidad de nuestro organismo, esta se desarrolla en varios sistemas interconectados simultáneamente, estos son:

- El cerebro y el sistema nervioso central.
- El sistema de suministro de oxígeno.
- El sistema de utilización de oxígeno.
- El sistema muscular.

Usualmente, los deportistas de resistencia, para aumentar su rendimiento, buscan mejorar 3 apartados/limitaciones del rendimiento (Jornet et al., 2019):

- Volumen Máximo de Oxígeno.
- Economía del movimiento: va a permitir un menor gasto energético ante una misma actividad, aumentando también el rendimiento (Edward, 2005; Menza, 2011).
- Umbral de lactato.

Para completar los tres apartados anteriores, aunque puede que no sean los parámetros más importantes, es imprescindible aumentar la fuerza muscular mediante sesiones de fuerza, no solo para obtener una mejora en el rendimiento, sino para la prevención de lesiones (Bompa & Buzzichelli, 2017), además de realizar una planificación y estrategia de carrera, habitualmente pasada desapercibida, la cual consiste en la gestión de la energía durante la actividad física (Menza, 2011).

Como bien se ha advertido anteriormente, los deportes de resistencia cíclicos se caracterizan por la complejidad y variedad, es por ello que, en un deportista de resistencia, podemos aplicar una gran variedad de tipos de entrenamientos, entre los que pueden destacar: entrenamiento de base (entrenamientos de larga duración a una baja intensidad para aumentar la resistencia aeróbica), entrenamientos de intervalos (destacan por tener un gama inmensa de posibilidades, pero se basan en realizar intervalos de alta intensidad intercalados con periodos de recuperación a una menor intensidad), entrenamiento de fuerza (desarrollo de la fuerza muscular para la mejora de la resistencia muscular y prevención de lesiones), entrenamiento técnico



(mejora de la fuerza) o entrenamiento de simulación de carrera (para habituarse al ritmo de carrera) (García-Orea et al., 2016).

### **3.2 Consumo de oxígeno.**

El consumo de oxígeno o  $VO_2$  se trata de un término el cual nos indica la cantidad de oxígeno que el organismo consume en un momento determinado. Usualmente este término es utilizado en la fisiología del ejercicio para evaluar y determinar la capacidad aeróbica y del sistema respiratorio y cardiovascular de un deportista (Joyner, 2008; McArdle et al., 2010).

### **3.3 Volumen máximo de oxígeno.**

El  $VO_{2m\acute{a}x.}$  o también llamado consumo máximo de oxígeno, se trata de un parámetro fundamental dentro de la fisiología del ejercicio ya que tiene un papel crucial dentro de los deportes de resistencia. El  $VO_{2m\acute{a}x.}$  hace referencia a la cantidad máxima de oxígeno que el organismo puede utilizar durante una actividad física intensa y duradera (Jornet et al., 2019). En resumen, se trata de la capacidad del sistema respiratorio y cardiovascular para suministrar oxígeno a los músculos utilizados durante una actividad física y la capacidad de ellos para utilizar el oxígeno durante un esfuerzo aeróbico. La forma más común de medir este parámetro, al igual que el  $VO_2$ , es en mililitros de oxígeno por kilogramo de peso corporal por minuto (ml/kg/min) (Joyner, 2008).

Según la revisión de Bassett (2000) el  $VO_{2m\acute{a}x.}$  es uno de los parámetros más relevantes en los deportes de resistencia de larga duración como el ciclismo en ruta,

la carrera, natación, esquí de montaña, etc. algunas de las razones por las que a atletas y entrenadores les es tan relevante el valor del  $VO_{2m\acute{a}x}$ . son las siguientes (Bassett & Howley, 2000):

Es un marcador directo de la capacidad aeróbica del deportista, ya que cuanto mayor sea el  $VO_2$  el organismo tendrá una mayor capacidad de distribuir oxígeno a los músculos lo cual tendrá de resultado un mayor rendimiento en actividades de una larga duración.

El  $VO_{2m\acute{a}x}$ . es un indicador del umbral anaeróbico, este es el punto en el cual el organismo genera una cantidad de lactato mayor a la que puede aclarar, este se acumula generando fatiga y una disminución en el rendimiento (umbral de lactato). Aumentar el valor de  $VO_{2m\acute{a}x}$ . conseguirá un retraso en la fatiga, lo cual conlleva a poder mantener una velocidad más alta antes de la acumulación de lactato (Poole et al., 2020).

Para realizar la medición de  $VO_{2m\acute{a}x}$ . existen fórmulas genéricas con las que se pueden estimar el valor de un deportista, pero estas no son fiables (Barbosa et al., 2005), es por esto por lo que, para una correcta estimación, se debe realizar una prueba de esfuerzo en un laboratorio de fisiología del ejercicio. Para determinar el  $VO_{2m\acute{a}x}$ . se suelen realizar pruebas de esfuerzo de carácter máximo mediante un protocolo incremental en tapiz rodante o cicloergómetro, esto dependerá de las características del deporte, pudiendo adaptarse a la prueba que más se asemeje a su deporte (por ejemplo, un remero podrá evaluar su  $VO_{2m\acute{a}x}$ . en una máquina de remo). Durante las pruebas, mediante una máscara de gases, se monitoriza la cantidad de oxígeno inhalado y la cantidad de dióxido de carbono exhalado, obteniendo el  $VO_{2m\acute{a}x}$ . en el momento en el que el deportista aporta una mayor cantidad de oxígeno

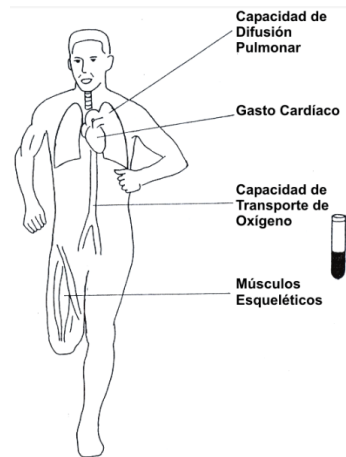
a sus músculos. Como bien nos muestra el artículo de García-García et al. (2016) también se pueden realizar pruebas de campo de resistencia aeróbica para obtener el valor de  $VO_2$  máx. de un atleta, dentro de los tipos test estudiados, los que mejores resultados obtuvieron son el RWFT (Dolgener) y 1,5 M.

Jornet et al. (2019) explica que, dentro de los diferentes componentes de la resistencia de un atleta, el  $VO_{2máx.}$  es el que menos se puede mejorar o aumentar debido a que, gran parte del valor que un deportista tiene se debe al componente genético. Esto no quiere decir que sea determinante el valor de  $VO_{2máx.}$ , ya que existen atletas con un gran valor que nunca han conseguido un resultado excepcional debido a un mal o insuficiente entrenamiento. Y, por el contrario, atletas con menor valor de  $VO_{2máx.}$  han logrado un mayor rendimiento gracias a un buen entrenamiento.

### **3.4 Factores limitantes del consumo máximo de oxígeno.**

Según Bassett & Howley (2000), podemos determinar cuatro factores fisiológicos principales que podrían ser limitadores en el consumo máximo de oxígeno, estos son:

- La capacidad pulmonar.
- El gasto cardiaco.
- La capacidad de transporte de oxígeno de la sangre.
- Las características del músculo esquelético.



**Ilustración 1.** Factores fisiológicos que limitan el  $VO_{2máx.}$ , durante la realización de actividad física (Bassett & Howley, 2000).

En su estudio, Mollard et al. (2007) nos explican cómo a nivel del mar el organismo es capaz de tener una saturación de oxígeno arterial del 95% lo cual nos permite que los pulmones trabajen a la perfección ofreciendo su máximo rendimiento. El estudio de Holmberg (2006) demuestra cómo los sujetos más entrenados sufren una bajada en la saturación de oxígeno en comparación con sujetos no entrenados, esto se debe a que los atletas entrenados involucran una mayor musculatura durante el ejercicio, teniendo como consecuencia un gasto cardíaco mucho mayor que el de la población normal lo cual hace disminuir el tiempo de tránsito de las células rojas sanguíneas (las cuales transportan el  $O_2$ ) en los alveolos y como consecuencia se produce una disminución de la saturación de oxígeno en sangre. Los estudios de Faoro et al. (2017) y Chapman et al. (2011) nos demuestran que una estancia a una altura moderada entre los 3000 y 5000m de altitud produce limitaciones en el sistema pulmonar limitando de esta forma el  $VO_{2máx.}$

Por su parte, el artículo de Lundby et al. (2017) nos muestra que, durante una actividad física intensa, el  $VO_{2max}$ . está determinado por dos aspectos, el primero de ellos es la expansión de glóbulos rojos y el segundo de ellos por una mejora en el volumen sistólico, lo cual produce un aumento en el gasto cardiaco.

Otro factor limitante es el transporte de oxígeno, el artículo de Bassett & Howley (2000) nos muestra como un cambio en la composición de la sangre, más en concreto en la hemoglobina de la sangre produce un aumento en el transporte de oxígeno produciendo un aumento en el  $VO_{2máx}$ . También muestran las variaciones en el transporte de oxígeno mediante el doping sanguíneo al aumentar el volumen de células rojas sanguíneas, la reinfusión de 900-1350mL de sangre produjo un aumento del  $VO_{2máx}$ . de los deportistas de un 4-9%.

Dentro de las limitaciones que tiene el músculo esquelético, encontramos dos principales: Bassett & Howley (2000) demuestran como un aumento de la densidad mitocondrial aumenta el lugar en el que se produce el consumo de  $O_2$  en el músculo, pero se llega a la conclusión que aportando más del doble de la densidad mitocondrial (2.2 veces) original el  $VO_{2máx}$ . solo aumenta entre un 20-40% demostrándonos que la limitación se tiene en el transporte de  $O_2$ . Por otra parte, demuestra una gran correlación entre el número de capilares sanguíneos y el  $VO_{2máx}$ . de los atletas.

### **3.5 Métodos entrenamiento en altura.**

Cuando hablamos de entrenamiento en altura para deportes de resistencia, podemos hablar de cuatro métodos principales, estos son: Living High-Training High (LHTH), Living Low-Training Low (LLTL), Intermittent Altitude Exposure (IAE) o Living High-Training Low (LHTL), en esta última es en la que se centra esta revisión bibliográfica Ramos-Campo (2012).

#### **3.5.1 Live High – Train High (LHTH).**

Desde hace décadas, atletas de elite de diferentes deportes han usado los métodos de entrenamiento en altura con el fin de mejorar su rendimiento en competiciones de alto rendimiento a nivel del mar. La teoría más común acerca de la mejora del rendimiento mediante métodos de entrenamiento en hipoxia defiende que ésta se produce debido a un aumento de la capacidad que tiene el organismo en transportar oxígeno a los músculos, esto, a su vez, se produce por un cambio en la hemoglobina (Hb), los eritrocitos y en la hormona eritropoyetina (EPO) Ramos-Campo (2016). Actualmente existen diferentes métodos de entrenamiento en altura, pero el método original consistía en estancias a una altura moderada (1500-4000m) en las que los atletas entrenaban y vivían a esa altura con el objetivo de aumentar el volumen de eritrocitos, el consume máximo de oxígeno y el rendimiento al nivel del mar. Este método se sigue utilizando en atletas que realizan concentraciones en altura o en corredores de fondo keniatas o etíopes Wilber (2007). En un estudio realizado en corredores de elite, Niess (2003) demostró que una estancia (LHTH) a

una altitud moderada de 2500m reducía el rendimiento respecto a un grupo control entrenado al nivel del mar.

### **3.5.2 Intermittent Hypoxia Training (IHT).**

Dentro de los métodos de entrenamiento en altura más común, nos encontramos “Intermittent Hypoxia Training” (IHT), el cual consiste en realizar ciertos entrenamientos en una habitación hipóxica simulando una elevada altitud o mediante una máscara mediante la cual se respira un aire con una menor proporción de oxígeno. Durante los años se han realizado diferentes programas de entrenamiento con el método IHT que han demostrado un incremento en el rendimiento de atletas al nivel del mar (Czuba et al., 2011; Hamlin et al., 2010). Por el contrario, también existen otros estudios que defienden que con IHT no se obtienen mejoras en el rendimiento y solamente se mantiene (Morton & Cable, 2005; Roels et al, 2007).

### **3.5.3 Living High - Training Low (LHTL).**

Por último, encontramos el método de entrenamiento Living High- Training Low (LHTL) en el cual se centra esta revisión bibliográfica. Como una posible solución a la limitación de la carga e intensidad de trabajo del método LHTH surge el método Living High Training Low en el cual los atletas viven a una altitud elevada y entrenan a poca altitud, este fue creado a principios de la década de 1990 por Levine (2002) de los Estados Unidos. La primera implementación que se realizó con este método fue en un estudio realizado en el cual se comparaban 39 atletas

masculinos y femeninos que se dividieron en tres grupos diferentes, LL+TL, LH+TL y LH+TH. Después de un periodo de entrenamiento de 4 semanas se realizaron pruebas de todos los grupos para comparar la mejora del rendimiento, los resultados concluyeron que el entrenamiento en altura tenía mejoras considerables. El grupo LH+TL mejoró el volumen de eritrocitos (5%), la concentración de hemoglobina (9%) y el VO<sub>2</sub>máx. (4%), cambios similares se obtuvieron en el grupo LH+TH pero no en el grupo control a nivel del mar. En cuanto a números de rendimiento, en el grupo LH+TL se observó una mejora del 1%, mejorando en el 5000m en 13,4 segundos, esta mejora fue similar en los días 7, 14 y 21 después de la estancia en altura.

Este método se basa en realizar estancias a una altura elevada, 2000-3000m usualmente y realizar los entrenamientos a nivel del mar (Brugniaux et al., 2005). Este método de entrenamiento tiene como objetivo aumentar el rendimiento de atletas de resistencia a nivel del mar. Lo que proporciona LHTL es obtener los beneficios que tiene sobre el organismo la aclimatación a la altura a la vez que permite entrenar a una intensidad y una carga elevada. De forma habitual se lleva a cabo mediante el uso de habitaciones o apartamentos hipóxicos para facilitar a los deportistas el entrenar bajo y vivir alto sin necesidad de viajes. En estas cámaras se imita la altitud mediante la filtración del oxígeno del espacio o la dilución de nitrógeno, lo cual reduce los niveles de oxígeno (Gore et al., 2001). La principal mejora que se obtiene a través de LHTL se cree que es el aumento del número de glóbulos rojos o más en concreto la cantidad de hemoglobina. Este aumento de hemoglobina permite una mayor capacidad del organismo en el transporte de oxígeno, permitiendo que le llegue más oxígeno a los músculos utilizados durante la



actividad física desencadenando un aumento en el consumo máximo de oxígeno y por lo tanto un mayor rendimiento del atleta (Gore et al., 2001). Por otro lado, también se obtienen los beneficios de entrenar a una baja altura debido a que al poder entrenar a una alta intensidad, se producen una serie de cambios neuromusculares que aumentarán el rendimiento (Wilber, 2007).

### **3.6 Variación del consumo máximo de oxígeno con la altura.**

El  $VO_{2m\acute{a}x}$ . refleja la capacidad que tiene una persona para transportar  $O_2$  durante una actividad física. Si evaluamos esta cantidad de  $O_2$  en sangre, podemos observar que se obtiene el pico máximo de capacidad aeróbica cuando se produce una meseta en el consumo de oxígeno (San et al., 2013). El estudio de Wehrlin & Hallén (2006) demuestra como el  $VO_{2m\acute{a}x}$ . se reduce de manera significativa a partir de los 1600m de altitud. También muestra como cada 1000m de altura que se asciende el  $VO_{2m\acute{a}x}$ . se reduce entre un 8-11%. Poniendo como ejemplo como en la cima de monte Everest (8800m) un sujeto puede pasar de tener 62mL/Kg/min a nivel del mar a 15ml/Kg/min en la cima. Con la altura se produce una disminución en la transferencia de  $O_2$  a los diferentes músculos, siendo esta mayor cuantos más músculos se usen en dicha actividad (Howald & Hoppeler, 2003; Mizuno et al., 2008). Un artículo de Saunders (2009) demuestra que una estancia a una altura elevada produce una serie de cambios fisiológicos, entre los que destacan: un aumento de la ventilación y frecuencia cardíaca, una disminución del volumen sistólico, el volumen plasmático y el  $VO_{2m\acute{a}x}$ ., este último se reduce entre un 15 y 20%. También afirma que se requiere un periodo mayor a tres semanas y buenas

reservas de hierro para provocar un aumento en los glóbulos rojos que desencadena en un aumento del  $VO_{2m\acute{a}x}$ . Según los artículos West (2004) y Mizuno (2008) la reducción del  $VO_{2m\acute{a}x}$  a alturas elevadas se debe a que se produce una reducción de la presión parcial de oxígeno ( $PO_2$ ), las cuales son encargadas de generar la energía celular. Aunque se haya demostrado que la cantidad de  $O_2$  arterial en altura con la aclimatación llega a valores similares a los del nivel del mar, los estudios West (2004) y Calbet & Lundby (2009) han demostrado que el  $VO_{2m\acute{a}x}$  sigue siendo menor que el del nivel del mar, aunque el  $O_2$  arterial se encuentre a valores del nivel del mar.

Robergs (2003) expone que con una exposición de 14 días a 4300 m de altura se produce una mejora en el  $VO_{2m\acute{a}x}$ , siendo esta mayor si se realiza la estancia a 300m de altura. Este aumento durante la aclimatación se debe a las adaptaciones hematológicas y musculares que mejoran el transporte de oxígeno arterial.

El estudio de Prommer (2007) investigó el efecto que tenían 6 meses de entrenamiento en hipoxia intermitente. Para ello comparó dos grupos de soldados, el primero de ellos realizaba 11 sesiones de entrenamiento en cicloergómetro a una altitud simulada a 3500m y 3 sesiones a nivel del mar, mientras que el grupo control realizaba el mismo entrenamiento a nivel del mar. La investigación determinó realizando un test en altura que los sujetos que habían realizado entrenos a 3500m tuvieron una menor caída del  $VO_{2max}$  que el grupo control. Por lo que demuestran que con una adaptación a la altura podemos reducir el decremento del  $VO_{2max}$ .

#### 4. Objetivos

Esta revisión bibliográfica se centra en el estudio del método de entrenamiento en altura Living High- Training Low, y más en concreto los efectos que este método tiene sobre el volumen máximo de oxígeno en atletas de resistencia. Los objetivos a los que se pretende llegar con la elaboración de este trabajo son los siguientes:

- **Analizar los efectos que tiene el método de entrenamiento LHTL sobre el  $VO_{2máx}$ . en atletas de deportes de resistencia cíclicos:** esto supone hacer una revisión de los artículos existentes que investiguen los efectos del  $VO_{2max}$ . en los deportes de resistencia como ciclistas, corredores, triatletas o esquiadores de fondo.
- **Determinar la adaptación de la concentración de hemoglobina al entrenamiento LHTL:** evaluar como el entrenamiento LHTL influye en el parámetro fisiológico de la concentración de hemoglobina en los deportes de resistencia cíclicos.
- **Examinar las variables de la altitud de residencia, el tipo de deporte, las horas de hipoxia y la duración del entrenamiento en el método LHTL:** identificar los factores de mejora del método de entrenamiento LHTL para atletas de deportes de resistencia cíclicos.
- **Proporcionar sugerencias para futuras líneas de investigación:** a partir de las posibles lagunas de información encontradas durante la realización de la revisión bibliográfica, sugerir áreas específicas para futuras líneas de investigación sobre el entrenamiento LHTL, así como

la evaluación de los efectos a largo plazo como la comparación de diferentes protocolos de entrenamiento.

## 5. Material y métodos.

Se ha realizado una exhaustiva revisión bibliográfica de los estudios científicos más relevantes que estudien el método de entrenamiento en altura Living High- Training Low (LHTL) y los efectos que este tiene sobre el volumen máximo de oxígeno ( $VO_{2\text{ máx.}}$ ) y en la concentración de hemoglobina ( $HB_{\text{mass.}}$ ) en atletas de resistencia. Para la búsqueda de literatura se han utilizado las bases de datos electrónicas de PubMed, Scopus, Web Of Science (WOS) y Google Scholar. Para la búsqueda en las bases de datos anteriores, se han utilizado las palabras clave: “Living High-Training Low”, “LHTL”, “ $VO_{2\text{ máx.}}$ ”, además de la combinación “Live High-Training Low AND  $VO_{2\text{ máx.}}$ ” para una búsqueda centrada en los cambios en el  $VO_{2\text{ máx.}}$  con el método de entrenamiento LHTL. Por otro lado, también se ha utilizado en las mismas bases de datos las palabras clave: “Living High-Training Low”, “LHTL”,  $Hb_{\text{mass}}$ . Para realizar una búsqueda más centrada en los cambios producidos mediante el entrenamiento LHTL en la masa de hemoglobina.

A raíz de esta búsqueda, se ha seguido una serie de criterios de exclusión para seleccionar los artículos más relevantes para garantizar llegar a los objetivos expuestos para la revisión bibliográfica.

Los criterios de inclusión tras la primera búsqueda en las bases de datos se han aplicado en el siguiente orden:

- **Año de publicación:** se ha realizado una selección de artículos publicados desde el año 2013 (incluido) hasta el 2024, reduciendo así los artículos a los publicados en los 10 últimos años, con el objetivo de utilizar los datos más actualizados posibles.

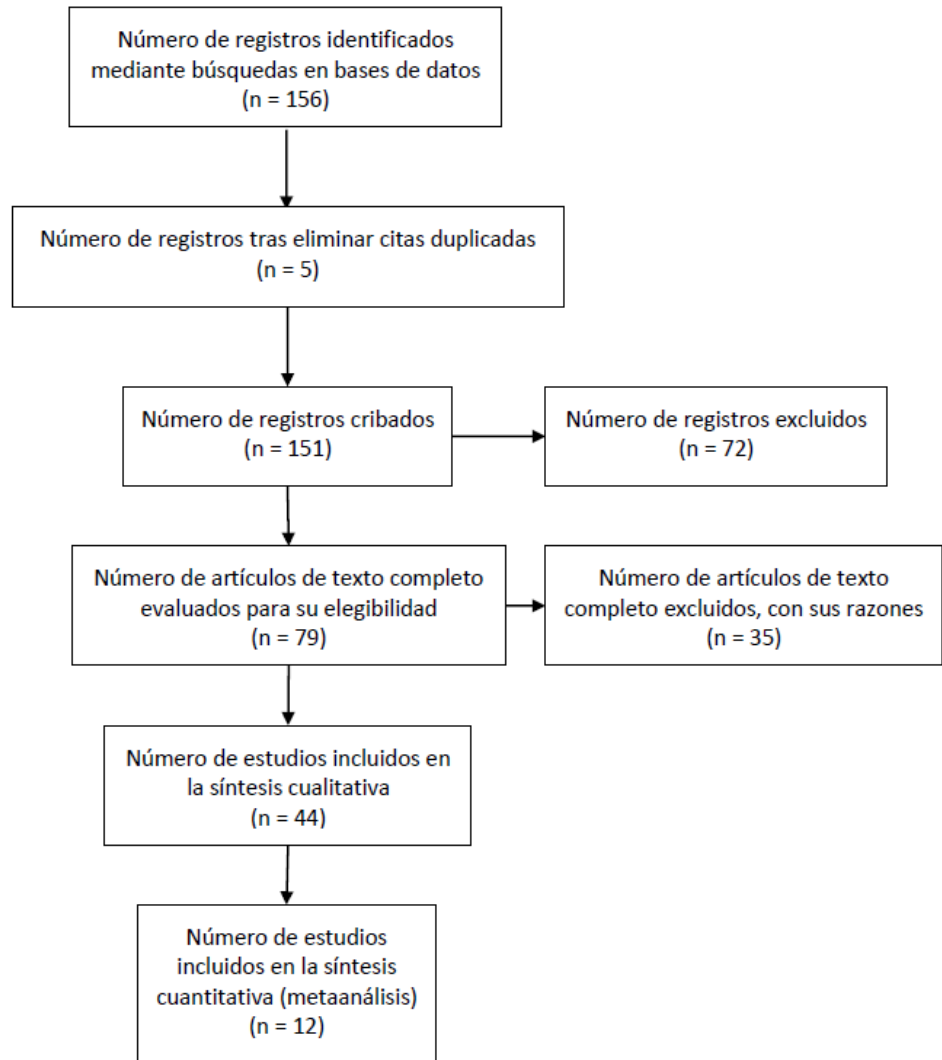
- **Tipo de deporte:** como la revisión bibliográfica se centra en la mejora de  $VO_{2m\acute{a}x}$ . en deportistas de resistencia cíclicos, se han descartado todos aquellos artículos que se centraran en otro tipo de deportes. La mayor parte de artículos descartados se enfocaban en las artes marciales y en saltadores y velocistas.
- **El artículo evalúa la mejora de otro método de entrenamiento en hipoxia (IHT o LHTH):** este apartado ha sido el segundo criterio de inclusión por el cual se han descartado más artículos, ya que se han encontrado muchos en los cuales se trata el entrenamiento Living High- Training Low y el  $VO_{2m\acute{a}x}$ . pero no se evaluaba la mejora con este método y realmente solo es nombrado en algún apartado.
- **El artículo aborda los efectos del entrenamiento sobre las variables fisiológicas del  $VO_{2m\acute{a}x}$ . y la concentración de hemoglobina:** se han descartado aquellos artículos que aun estudiando el método de entrenamiento LHTL, no estudian los cambios que se producen en el  $VO_{2m\acute{a}x}$ . y en la concentración de hemoglobina.
- **Idioma:** se han descartado los artículos que estuvieran escritos en idiomas diferentes al inglés o el castellano, en este apartado, se han descartado artículos de lengua portuguesa principalmente.
- **Pago o suscripción:** se han descartado todos aquellos artículos en los cuales para poder leerlos o descargarlos se requiriera una suscripción a la plataforma en la que se encontraba o requería de un pago.

Identificación

Cribado

Idoneidad

Inclusión



## **6. Resultados**

Para la elaboración de este apartado se han buscado los estudios de investigación más relevantes y que cumplan los criterios de inclusión, en este caso los cambios producidos en el  $VO_{2m\acute{a}x}$ . y en la masa de hemoglobina mediante el método de entrenamiento Living High – Training Low, siempre y cuando cumplieran con los criterios de inclusión anteriormente expuestos.

Se van a exponer en una misma tabla los 12 artículos que evalúan la variación del  $VO_{2m\acute{a}x}$ . y la masa de hemoglobina mediante el método de entrenamiento Living High – Training Low, además de las conclusiones y resultados de cada estudio, vamos a poder observar los ítems principales que pueden ser relevantes comunes a todos los estudios que nos puedan proporcionar información para poder conocer los beneficios reales del método de entrenamiento LHTL. Estos ítems mencionados van a ser los siguientes: autor/autores del artículo y año de la publicación, metodología y tipo de estudio, tipo de muestra del estudio (número de sujetos evaluados, grupos, sexo...) y deporte, duración del estudio (en días), alturas a las que se ha realizado (tanto la altura de entrenamiento como la de “vivir”), horas de hipoxia totales del estudio, los resultados y las conclusiones.



Nº	Autor y año	Metodología y tipo de estudios	Muestra y deporte	Duración del estudio	Altura a la que se realiza el estudio	Horas hipoxia totales	Resultados obtenidos	Conclusiones
1	(Park et al., 2019) <b>Living High-Training Low for 21 Days Enhances Exercise Economy, Hemodynamic Function, and Exercise Performance of Competitive Runners</b>	Experimental y longitudinal	N=24 hombres  <b>G1 LLTL:</b> N=12  <b>G2 LHTL:</b> N=12  (Carrera)	21 días	Entreno: 0m  Vivir: 3000m	252h	Hubo una interacción significativa para el $VO_{2max}$ ( $\eta^2 = 0,527$ , $p < 0,001$ ) y rendimiento en contrarreloj de 3.000 m ( $\eta^2 = 0,217$ , $p = 0,022$ ). Los análisis post encontraron importantes mejoras en ambos grupos para el $VO_{2max}$ (LHTL: cambio medio = 5,40; IC del 95% = 4,32, 6,48; $p < 0,05$ , LLTL: cambio medio = 2,35; IC del 95% = 1,54, 3,17; $p < 0,05$ ) y rendimiento en contrarreloj de 3.000 m (LHTL: cambio medio = -34,0; IC del 95% = -45,6, -22,4; $p < 0,05$ , LLTL: cambio medio = -19,5; IC del 95% = -25,1, -13,8; $p < 0,05$ ). sin embargo, el grupo LHTL mostró una mayor mejora en el ejercicio rendimiento que el grupo LLTL	Demuestra que 21 días de LHTL es muy efectivo para mejorar el rendimiento del ejercicio ( $VO_{2max}$ y rendimiento en contrarreloj de 3.000 m) mediante un ejercicio mejorado de economía y función hemodinámica.
2	(Saugy et al., 2016) <b>Same Performance Changes after Live High Train Low in Normobaric vs. Hypobaric Hypoxia</b>	Cruzado y longitudinal	N=16  <b>G1 HN:</b> N= 8  <b>G2 HH:</b> N=8  (Carrera)	18 días	Entreno: 1000-1200m  Vivir: 2250m	G1 (HN): 230h G2(HH): 310h	El $VO_{2max}$ aumentó en la misma medida para HN and HH ( $4,9 \pm 5,6$ frente a $3,2 \pm 5,1$ %). No se encontró diferencia en los parámetros hematológicos. El tiempo de carrera de 3 km fue significativamente más rápido en ambas condiciones 21 días después de LHTL ( $4,5 \pm 5,0$ frente a $6,2 \pm 6,4$ % para HN and HH), y no se encontró diferencia entre las condiciones en ningún momento.	Los aumentos en el $VO_{2max}$ . y la mejora del rendimiento fueron similares entre las condiciones HN y HH.
3	(Czuba et al., 2018) <b>Comparison of the effect of intermittent hypoxic training vs. the live high, train low strategy on aerobic</b>	Cuasiexperimental y longitudinal.	N=10  (Ciclista)	28 días	Entreno: 0m  Vivir: 2100m	308h	Se observó un aumento significativo ( $p < 0,001$ ) en el $VO_{2max}$ (en un 4,8%) en el grupo G-LH-TL y en un 3,5% en el grupo G-IHT. También se encontraron diferencias significativas ( $p < 0,01$ ) para el $VO_{2LT}$ (aumentó en 6,7% en el grupo G-LH-TL y en 9,1% en el grupo G-IHT) y $WR_{max}$ (incrementos del 5,9% y 6,7%, respectivamente). El umbral de la carga (WRLT) aumentó significativamente en un 4,8% para el grupo G-LH-TL.	Ambos métodos, LHTL y IHT conducen a mejoras de la capacidad aeróbica y el rendimiento deportivo en ciclistas. Sin embargo, los cambios más importantes en la mejora de la capacidad aeróbica y la resistencia se produjo con el método LHTL esta mejora se refleja por mayores índices $VO_{2max}$ y hematológicos.

	<b>capacity and sports performance in cyclists in normoxia.</b>						Y el 7,7% en G-IHT.	
4	(Neya et al., 2013) <b>Increased Hemoglobin Mass and VO<sub>2</sub>max With 10 h Nightly Simulated Altitude at 3000 m</b>	Concurrente y longitudinal	<b>G1 LHTL:</b> N= 7  <b>G2 control:</b> N=7  (Carrera)	22 días	Entreno: 1300m  Vivir: 3000m	210h (21 días)	En comparación con el g G2 hubo significativo aumento en el VO <sub>2</sub> max absoluto (8,6%; 4,8-12,6%), junto a un aumento de la masa de hemoglobina absoluta (3,5%; 0,9-6,2%) entre la preintervención y la postintervención. El valor medio del grupo G1 aumentó mientras que la del grupo G2 se mantuvo estable. La variación individual en el VO <sub>2</sub> max fue del 2,8% y el de Hb <sub>mass</sub> fue del 2,9%.	Estos resultados indicaron que los atletas de nivel universitario pueden aumentar la Hb <sub>mass</sub> alrededor del 1% cada 100 horas de altitud simulada a 3000m con 10 h/día durante 21 noches.
5	(Humberstone-Gough et al., 2013) <b>Comparison of live high: train low altitude and intermittent hypoxic exposure.</b>	Ensayo clínico aleatorizado (con grupo control) y longitudinal	N= 23 (7 chicas, 17chicos)  (Triatletas)	17 días	Entreno: 600m  Vivir: 3000m	240h	Después de 17 días de LHTL, el cambio en la Hb <sub>mass</sub> fue mayor que el grupo placebo (3,2 ± 4,8%; porcentaje medio diferencia ± 90% CL; Tabla 3) y más alto que IHE (4,7 ± 3,5%). No hubo diferencias claras entre los grupos en el VO <sub>2</sub> máx. vVO <sub>2</sub> máx o TTE.	La clara diferencia en la respuesta de Hb <sub>mass</sub> entre LHTL y el IHE indicaron que la dosis de hipoxia diaria de 60-90 min con el método IHT es insuficiente para inducir la eritropoyesis acelerada. La economía de carrera mejoró la velocidad de carrera a 3 mm [La] el siguiendo LHTL lo que indica que este método de hipoxia puede mejorar el rendimiento a velocidades submáximas en carrera.
6	(Kettunen et al., 2023) <b>Hemoglobin mass and performance responses during 4 weeks of normobaric “live high–train low and</b>	Longitudinal (con grupo control)	N=19 (13 mujeres y 6 hombres)  <b>G1 LHTL:</b> N=4  <b>G2 control:</b> N=15  (Esquí de fondo)	28 días	Entreno: 150m  Vivir: 2400m	507h	Nos muestra que el grupo LHTL tiene un aumento absoluto y relativo en la Hb <sub>mass</sub> de (4.2 ± 1.7%, <i>F</i> = 56.2, <i>p</i> < 0.001; 6.8 ± 2.6%, <i>F</i> = 77.9, <i>p</i> < 0.001, respectivamente) mientras que el grupo control tuvo un aumento relativo de (2.0 ± 3.2%, <i>F</i> = 6.0, <i>p</i> = 0.02) pero no en la masa absoluta de Hb <sub>mass</sub> (0.8 ± 2.3%, <i>F</i> = 1.6, <i>p</i> = 0.21)	Los resultados del presente estudio sugieren que cuatro semanas LHTL normobárico durante el período de preparación es beneficioso para los atletas de resistencia que buscan aumentar su Hb <sub>mass</sub> . Sin embargo, LHTL no apoyó el desarrollo del rendimiento de resistencia máxima y VO <sub>2</sub> max en comparación con los atletas que vivieron y entrenaron en normoxia.

	high”							
7	(Carr et al., 2015) <b>Increased Hypoxic Dose after Training at Low Altitude with 9h per Night at 3000m Normobaric Hypoxia</b>	Experimental y prospectivo	N=18 (12 chicos y 6 chicas)  <b>G1 control:</b> N=10  <b>G2 LHTL:</b> N=8  (Atletas de marcha)	21 días	Entreno: 1280m  Vivir: 3000m	189h	Se produjo un aumento significativo ( $p = 0.02$ ) 3.7% de aumento en la $Hb_{mass}$ en el grupo LHTL ( $2.6 \pm 1.8\%$ ) en comparación con el grupo control ( $-0.9 \pm 4.9\%$ ). Hubo un aumento significativo de $4.0 \pm 2.5\%$ ( $p = 0.02$ ) en el $VO_{2max}$ en el LL (Live Low) y una mejora no significativa de $4.4 \pm 5.6\%$ en el grupo LHTL ( $p = 0.08$ ). El cambio dentro del grupo control fue de $1.3 \pm 3.7\%$ . Sin embargo, el cambio en el $VO_{2max}$ cuando se comparó entre grupos no fue significativo ( $p = 0.23$ ).	El estudio demuestra que la combinación de exposición a altitudes baja y moderada facilita beneficios fisiológicos y relacionados con el rendimiento. Estos hallazgos indican que, para los atletas de élite que realizan entrenamiento de altitud, nuestro método combinado de entrenamiento a baja altitud más altitud simulada es una alternativa efectiva a los campamentos convencionales a altitudes moderadas.  Recomendamos que la combinación de baja altitud (~1400 m) junto con dormir en tiendas de altitud (3000 m) sea un método eficiente en tiempo para mejorar la masa de hemoglobina, con la ventaja de una intensidad de entrenamiento menos comprometida en comparación con los métodos tradicionales de altitud que típicamente se llevan a cabo en altitudes más altas de 2000-3000 m.
8	(Saugy et al., 2014) <b>Comparison of “Live High-Train Low” in Normobaric versus Hypobaric Hypoxia</b>	Experimental, longitudinal y prospectivo. (comparación de LHTL en HN e HH)	<b>G1 NH:</b> N=14  <b>G2 HH:</b> N=13	18 días	Entrenar: 1100-1200m  Vivir: 2250m	NH: 219h HH: 302h	Ambos grupos mejoraron su consumo máximo de oxígeno y los valores de potencia máxima ( $+6.1 \pm 6.8$ vs. $+5.2 \pm 4.8\%$ $VO_{2max}$ and $+9.6 \pm 5.2$ vs. $+6.6 \pm 4.7\%$ $P_{max}$ , para los grupos HN y HH respectivamente). Ambos grupos mejoraron los niveles totales de la masa de hemoglobina durante el periodo del estudio ( $912 \pm 96$ vs. $936 \pm 103$ g and $950 \pm 115$ vs. $967 \pm 122$ para los grupos NH y HH respectivamente, $P < 0.001$ ).	El hallazgo principal del estudio es que hubo diferencias significativas en las respuestas al entrenamiento LHTL en NH en comparación con HH. Específicamente, los resultados incluyeron mayores mejoras en el rendimiento en el grupo HH durante tres semanas. Después de LHTL, hubo mayores cambios hematológico dentro del grupo HH. Después del entreno, obtuvieron mayores niveles de desaturación

								nocturna y mayor frecuencia de respiración en el grupo HH, con aumentos similares en Hb <sub>mass</sub> y VO <sub>2max</sub> en ambos grupos.	
9	(Feng et al., 2023) <b>Optimal type and dose of hypoxic training for improving maximal aerobic capacity in athletes: a systematic review and Bayesian model-based network meta-analysis</b>	Estudio de síntesis de la bibliografía existente.						LHTL, LHTH e IHT superaron el entrenamiento normóxico con mejoras en el VO <sub>2max</sub> de los deportistas. LHTL combinado con entronos a baja altitud fue la intervención más efectiva para mejorar el VO <sub>2máx.</sub> (natural: 0,92 y simulado: 0,86) y fue mejor que LHTL combinado con entrenamientos al nivel del mar (0,56).	Independientemente del tipo de entrenamiento hipóxico y la condición residencial, LHTL con entrenamiento a baja altitud fue la intervención más efectiva. Las características de la correlación dosis-efecto de LHTH y LHTL pueden estar asociados con los efectos negativos de la hipoxia crónica
10	(Robach et al., 2018) <b>Hypobaric live high-train low does not improve aerobic performance more than live low-train low in cross-country skiers.</b>	Ensayo clínico controlado con asignación no aleatoria pero estratificada de los grupos y longitudinal	N=16 <b>G1 LHTL:</b> N=11 <b>G2 control:</b> N=8  (Esquí de fondo)	28 días	Entrenar: 550-800m  Vivir: 2200m	416h	El aumento medio (en %) de la Hbmass absoluta después de la intervención (es decir, PRE frente a POST1, POST2 o POST3) fue similar en ambos grupos, siendo, respectivamente, 2,9 ± 4,0% (CL90=2,3), 3,1 ± 3,3% (CL90=1,9) y 2,6 ± 3,6% (CL90=2,1) entre grupo control y 3,5 ± 2,8% (CL90=1,4), 2,5 ± 2,4% (CL90=1,2) y 3,0 ± 2,8% (CL90=1,4) entre los sujetos LHTL (efecto de la altitud: P = 0,91; efecto del entrenamiento: P = 0,0001; altitud × efecto del entrenamiento: p = 0,88).	Los resultados indican que 4 semanas de “LHTL” usando hipoxia hipobárica a altitud moderada, no se asocia con mayores mejoras en el rendimiento aeróbico que “LLTL” con estímulos de entrenamiento adaptado en jóvenes de cross-country esquí. De acuerdo con este resultado, LHTL no tuvo ningún efecto específico sobre la Hbmass, las capacidades respiratorias del músculo esquelético, o la capacidad de difusión del pulmón.	
11	(Hauser et al., 2017) <b>Individual hemoglobin mass response to</b>	Estudio cruzado con muestreo aleatorio y longitudinal.	N=24 <b>G1 HH:</b> N=12 <b>G2 NH:</b>	18 días	Entrenar : <1200m  Vivir: 2250m	HH:311h NH:225h	Las respuestas individuales de Hbmass.: en cambios porcentuales de los individuos la masa de Hb osciló entre 0,4 y 8,7% en HH y entre -1,4 y 7,7% en NH (Fig. 3) después de 18 días de LHTL.	Los hallazgos del presente estudio cruzado indican que el LHTL hipobárico y normobárico produjeron un efecto similar en el aumento medio en Hbmass después de 18 días de LHTL.	

	<b>normobaric and hypobaric “live high–train low”</b> : A one-year crossover study		N= 12 (Triatletas)					No hubo diferencias en los cambios de Hbmass entre HH y NH. Hubo una variabilidad notable en las respuestas individuales de Hbmass, lo que indica la importancia del desempeño individual y la evaluación de las respuestas de Hbmass al entrenamiento en altitud.
12	(Hauser et al., 2015) <b>Similar Hemoglobin Mass Response in Hypobaric and Normobaric Hypoxia in Athletes</b>	Experimental, longitudinal y prospectivo	<b>G1 NH:</b> N=10  <b>G2 HH:</b> N=11  <b>G3 Control:</b> N=7  (Triatletas)	18 días	Entrenar: 0m  Vivir: 2250m	NH:238h  HH:316h	La masa de Hb aumentó de manera similar en HH (+4,4%, P <0,001 el día 13; +4,5%, P <0,001 el día 18) y NH (+4,1%, P <0,001) en comparación con el grupo CON (+1,9%, P = 0,08). Hubo una amplia variabilidad en las respuestas individuales de Hbmass en HH (-0,1 a +10,6%) y NH (-1,4 a +7,7%).	Se produjo un aumento similar en ambos grupos de hipoxia (4,4% vs 4,1%) después de la misma dosis hipóxicas (230h vs 238h): las diferencias entre HH y NH no está clara y tiende a ser trivial. Después del periodo de entrenamiento de 18 días de LHTL, tanto NH como HH probablemente tengan efectos beneficiosos en la HBmass. en comparación al grupo control.

## **7. Discusión o Análisis de la información recopilada**

Con el estudio de la bibliografía existente de las principales investigaciones que evalúan el método de entrenamiento LHTL en deportes de resistencia cíclicos, se ha observado que son cinco los deportes en los que se han llevado a cabo las investigaciones, estos son: atletismo (corredores de larga distancia, 5.000ml, 10.000ml, etc.), triatlón, ciclismo (de carretera y montaña), esquí de fondo (estudio de los países nórdicos) y marcha atlética.

En cuanto a la muestra utilizada, cabe destacar que un mayor porcentaje de sujetos evaluados son varones, lo cual puede influir en los resultados, debido a que no se hace distinción entre las características de cada grupo de sujetos existentes en la investigación. En los estudios evaluados podemos diferenciar dos grupos, el primer grupo estaría formado por aquellos estudios de Carr et al. (2015), Neya et al. (2013), Park et al. (2019) y Kettunen et al. (2023) los cuales disponen de un grupo control en el cual no se lleva a cabo el método de entrenamiento LHTL y otro en el cual sí que se desarrolla entre entrenamiento en altura, los estudios anteriormente mencionados disponen de una muestra en ambos grupos muy similar, a excepción de la investigación de Kettunen et al. (2023) que tiene una gran diferencia entre ambos, teniendo el grupo LHTL tan solo 4 sujetos y el grupo control 15. En estos artículos a excepción del de Kettunen et al. (2023), se produce una mejora mayor en la  $HB_{mass}$  y en el  $VO_{2m\acute{a}x}$ . en el grupo LHTL respecto al grupo control. En segunda instancia, tenemos otro grupo de estudios que sólo evalúan en método de entrenamiento LHTL, entre ellos los estudios de Saugy et al. (2016) y Saugy et al. (2014) evalúan las posibles variaciones entre hipoxia normobárica e hipoxia

hiperbárica obteniendo resultados de la mejora del  $VO_{2máx.}$  y de la  $HB_{mass.}$  muy similares entre la hipoxia normobárica e hiperbárica, consiguiendo en el segundo de los estudios (Saugy et al., 2014) un mayor rendimiento en el grupo de hipoxia hiperbárica, que podría producirse por una estancia con un número de horas en hipoxia mayor al grupo de normoxia (302h vs 219h) respectivamente.

La duración de los estudios es bastante similar, ya que en la mayoría de ellos es de entre los 18 y 21 días, podríamos destacar los estudios Czuba et al. (2018), Robach et al. (2018) y Kettunen et al. (2023) que tienen una duración de una semana más al resto de investigaciones (28 días), en consecuencia, con esto, también podemos observar que estos dos últimos estudios son en los que los sujetos han pasado un mayor tiempo en hipoxia, mientras que, en el resto, por norma general, el tiempo total de hipoxia este entorno a las 200-220h. Este mayor número de horas no está en relación al mayor aumento de  $VO_{2máx.}$  o de  $HB_{mass.}$  ya que solo en el estudio de Czuba et al. (2018) se produce una mejora en el  $VO_{2máx.}$  (4.2 +- 1.7%) y en los niveles hematológicos, manteniéndose en los otros dos estudios estos valores y el rendimiento a niveles iguales que los grupos control. Por otro lado, en el caso de los estudios que realizan una investigación entre hipoxia hiperbárica e hipoxia normobárica podemos observar que se han acumulado en todos los casos más horas con la hipoxia hiperbárica, esto se puede deber a la mayor facilidad para mantener una altura elevada en cámaras hiperbáricas como habitaciones, ya que en la hipoxia normobárica posiblemente se requiera más tiempo de transporte para subir y bajar a la altura. Pese a una mayor estancia en altura en HH, solo los resultados del estudio de Saugy et al., (2014) mostraron una mejora respecto al grupo HN con un aumento del nivel de desaturación nocturna y una mayor

frecuencia respiratoria, en comparación de los estudios de Hauser et al. (2015), Hauser et al. (2017) y Saugy et al. (2016), que obtuvieron resultados muy similares en HH y HN tanto  $VO_{2m\acute{a}x.}$  como en la  $Hb_{mass.}$

Debido al análisis del método de entrenamiento en altura Living High Training Low, es indispensable hablar de la altura, tanto a la que los deportistas viven (duermen) y la altura a la que estos entrenan. Hablando de la altura en la que se vive podemos observar dos tendencias o tipos de investigaciones, la primera de ellas son los estudios de Carr et al. (2015), Humberstone-Gough et al. (2013), Neya et al. (2013), Park et al. (2019) que realizan la estancia a una altura de 3000m s.n.m (metros sobre el nivel del mar) y un segundo grupo en el que la estancia en altura se realiza entre los 2000 y 2250m s.n.m. Ambos grupos de estudios obtuvieron mejoras con cambios no significativos entre ellos, ya que todos los estudios a excepción del de (Robach et al, 2018) obtuvieron mejoras en el  $VO_{2m\acute{a}x.}$ ,  $Hb_{mass}$  y el rendimiento o economía de carrera, sin existir variaciones significativas que nos permita decantarnos por una mayor mejora producida por la altura de la estancia.

Por otro lado, podemos atender a la altura a la que se entrena, de nuevo se ven dos grandes tendencias y grupos en las investigaciones realizadas, los estudios de Carr et al. (2015), Czuba et al. (2018), Hauser et al. (2015), Kettunen et al. (2023) en los cuales los entrenamientos se realizan al nivel del mar (0m) y el segundo en el que se realiza entre los 1000 y 1300m s.n.m. Por último, nos encontramos con el estudio de Humberstone-Gough et al. (2013) en el cual se observa que se ha utilizado una altura de entrenamiento entre los valores anteriores (600m). En este aspecto de la altura de entreno, no podemos seleccionar una altura que tenga un mayor beneficio o genere un mayor rendimiento o aumento del  $VO_{2m\acute{a}x.}$



o  $Hb_{mass}$ . ya que todos los estudios obtienen un aumento en estos parámetros estudiados muy similares y sin diferencias significativas, pudiendo descartar este aspecto como un elemento clave en el método de entrenamiento LHTL.

Con este resumen metodológico de las características de las investigaciones anteriores y a partir de los resultados y conclusiones de cada uno de ellos, y la bibliografía acerca del método de entrenamiento Living High - Training Low, se puede evaluar las posibles mejoras que nos ofrece este método de entrenamiento. Principalmente se van a evaluar dos parámetros, los cuales son limitantes en los deportes de resistencia cíclicos, estos son: la masa de hemoglobina  $Hb_{mass}$  y el consumo máximo de oxígeno ( $VO_{2máx.}$ ). Como principal conclusión al respecto, podemos decir que ninguno de los métodos de entrenamiento de hipoxia evaluados (LHTL, LLTL, IHT) produce un decremento de la  $Hb_{mass}$  o  $VO_{2máx.}$ . Partiendo de este punto, tenemos por un lado las investigaciones de Czuba et al. (2018), Neya et al. (2013), Park et al. (2019), Saugy et al. (2016) y Saugy et al. (2014) con las que se han obtenido una mejora del  $VO_{2máx.}$ , entorno a un 5-6%, teniendo como excepción la investigación de Neya et al. (2013) que obtuvo una mejora en el  $VO_{2máx.}$  de un 8,6% (respecto a un 2,8% con el grupo control). Continuando con el  $VO_{2máx.}$ , tenemos otro grupo de las investigaciones de Carr et al. (2015), Humberstone-Gough et al. (2013) y Kettunen et al. (2023) con las cuales no se han obtenido mejoras en el  $VO_{2máx.}$ , obteniendo los mismos valores que en el pre-test y el pos-test. Cabe destacar como se ha dicho anteriormente que en ningún caso el entrenamiento LHTL afecta negativamente al  $VO_{2máx.}$  disminuyendo su valor. En cuanto a la concentración de hemoglobina ( $Hb_{mass}$ .) hemos observado que en todas las investigaciones en las cuales se ha evaluado este parámetro, como pueden ser las

de Carr et al. (2015), Humberstone-Gough et al. (2013), Kettunen et al. (2023), Neya et al. (2013) y Saugy et al. (2014) se ha obtenido un aumento en ella. Todos los resultados obtenidos nos indican un aumento entre un 3,5% y un 4,2% siendo en todos los estudios valores muy similares por lo que podemos comprobar que el entrenamiento LHTL aumenta la  $Hb_{mass}$ , sin embargo, la investigación de Kettunen et al. (2023) fue la que tuvo un mayor aumento en la  $Hb_{mass}$ . (4,2%), siendo la que mantuvo el grupo LHTL con más horas de hipoxia (509h) por lo que este mayor aumento podría estar producido por un mayor tiempo de estancia de los sujetos a la altura.

Otra mejora común obtenida en los estudios de Park et al. (2019) y Saugy et al. (2016) es un aumento de rendimiento en la prueba de 3000m en pista de atletismo, en ambos estudios se realizó un test de 3000m antes y otro después de periodo de entrenamiento LHTL (con una duración y horas en hipoxia muy similares).

Además de todo lo anterior, en el artículo de Czuba et al. (2018) se observan dos resultados diferentes en comparación al resto de bibliografía acerca de LHTL, es en este artículo se observan las diferencias entre los métodos de entrenamiento en altura LHTL y el IHT a través del estudio de dos grupos, y es que ambos métodos producen una mejora en el  $VO_{2m\acute{a}x.}$ , pero además de esto se llegó a la conclusión de que el método IHT se produce un mayor aumento en el umbral de lactato (9,1% con IHT y un 6,7% con LHTL).

Para finalizar, se van analizar los trabajos de Saugy et al. (2016) y Saugy et al. (2014) que estudian el método de entrenamiento en altura LHTL pero a través de la utilización de dos grupos en el estudio, el primero de ellos que se expone a

hipoxia normobárica (HN) y el segundo a hipoxia hiperbárica (HH). En el primero de los grupos no se obtuvieron resultados ni mejoras relevantes en ningunos de los dos grupos, siendo la mejora muy similar en ambos grupos. Sin embargo, en el segundo de los grupos, si que se obtuvieron diferencias relevantes, el  $VO_{2máx.}$  no tuvo una mejora considerable (6,1% el grupo HN y un 5,2% el grupo HH), sin embargo, en el grupo de hipoxia hiperbárica se produjeron mayores mejoras hematológicas obteniendo una mayor desaturación durante la noche al mismo tiempo que una mayor frecuencia respiratoria. Observando los parámetro de ambos estudios en la tabla, podemos observar que en el grupo HH del estudio Saugy et al. (2014) los sujetos estuvieron más tiempo en hipoxia (302h) en comparación con el grupo de HN que estuvo 219h, este myor tiempo en hipoxia ha podido provocar estos cambios hematológicos.

## 8. Conclusiones.

En el siguiente apartado, se van a explicar las conclusiones obtenidas tras la realización de la revisión bibliográfica, por lo que se van a responder a los objetivos propuestos en el apartado “objetivos” del trabajo. A continuación, se van a abordar cada uno de los objetivos propuestos para este trabajo y poder determinar si las hipótesis propuestas son ciertas o no.

**Efectos del método de entrenamiento LHTL sobre el VO<sub>2</sub>máx. en atletas de deportes de resistencia cíclicos:** la revisión bibliográfica ha revelado que el método de entrenamiento LHTL (Living High-Training Low) produce mejoras significativas en el consumo máximo de oxígeno (VO<sub>2</sub>máx.) en atletas de deportes de resistencia cíclicos, como corredores, ciclistas, triatletas y esquiadores de fondo. La mejora que se produce oscila entre un 3,2% y un 8,6%, siendo óptima una duración de entre 18 y 28 días. Esta mejora de la capacidad aeróbica produce una mejora en los deportistas de resistencia.

**Adaptación de la concentración de hemoglobina producida por el entrenamiento LHTL:** los estudios revisados han demostrado consistentemente que el entrenamiento LHTL produce adaptaciones fisiológicas favorables en atletas de deportes de resistencia cíclicos. Entre estas adaptaciones se encuentra un aumento significativo en la masa de hemoglobina (Hbmass.), que varía entre un 3,5% y un 4,2% a la vez que se observaron mejoras en parámetros relacionados con la capacidad de transporte de oxígeno, como el umbral de lactato y la capacidad aeróbica. Estas adaptaciones indican una mayor eficiencia en la entrega de oxígeno a los tejidos durante el ejercicio, lo que puede contribuir a un mayor rendimiento deportivo.

**VARIABLES DEL MÉTODO DE ENTRENAMIENTO LHTL POR LAS QUE SE PRODUCEN MEJORAS EN DEPORTISTAS DE RESISTENCIA CÍCLICOS:** los factores que influyen en el éxito del entrenamiento LHTL incluyen la altitud de residencia, el tipo de deporte, las horas de hipoxia y la duración del entrenamiento. Los estudios revisados indican que una altitud de residencia alrededor de 3000m s.n.m. y un período de entrenamiento de aproximadamente 21 días pueden ser óptimos para inducir adaptaciones fisiológicas significativas. Además, se sugiere que una combinación de baja altitud para el entrenamiento junto con hipoxia simulada durante el sueño puede ser una estrategia efectiva para maximizar las adaptaciones.

**PROPORCIONAR SUGERENCIAS PARA FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:** a continuación, en el siguiente apartado se van a exponer posibles líneas de investigación que resultan interesantes para completar la información acerca del método de entrenamiento LHTL y cómo aplicarlo para obtener los mayores beneficios en los deportistas de resistencia.

## **9. Futuras líneas de investigación.**

En este apartado se van a exponer cuatro futuras líneas de investigación con las cuales poder conocer más el método de entrenamiento Living High – Training Low y como desarrollarlo en deportes de resistencia cíclicos.

El primero de los criterios que se ha echado en falta tras la lectura de la bibliografía existente, son los efectos a muy largo plazo del entrenamiento en hipoxia LHTL (1-2 años), estudiando tanto el rendimiento de los deportistas y las adaptaciones que se obtienen a través de él y efecto que tiene en la salud de los atletas a largo plazo tras bloques de entrenamiento LHTL. Seguido de esto, se podría estudiar los efectos en otras variables fisiológicas diferentes a las analizadas en los estudios que se centran en el método de entrenamiento LHTL, tales como el efecto buffer de lactato, la eficiencia metabólica y la capacidad antioxidante.

Por otro lado, sería interesante estudiar de forma más precisa como afecta el entrenamiento LHTL en cada uno de los sujetos, teniendo en cuenta las características de adaptación de cada uno a la hipoxia. Como es imposible determinar las características de cada uno de los sujetos, una opción sería en la muestra grupos mas específicos teniendo en cuenta el sexo, la edad, el deporte o el nivel de los deportistas. También se podría incluir la identificación de biomarcadores para predecir la respuesta al entrenamiento LHTL.

Para terminar, se propone para futuras investigaciones evaluar estrategias de recuperación para optimizar la carga de entrenamiento para optimizar el entrenamiento LHTL, para ello, se propone analizar la nutrición, el descanso, la fatiga, como, por ejemplo, mediante test de saltos diarios, como propone Aurell-Badenas et al. (2020) o la periodización del entrenamiento. Esto puede minimizar el

riesgo de lesión o sobreentrenamiento y maximizar las adaptaciones fisiológicas en hipoxia (Halsón, 2014).

## 10. Referencias bibliográficas

- Aurell, V., Murias, R., Rodríguez, E. S., & García, A. (2020). Eficacia de la pliometría en la fatiga neuromuscular en triatlón: estudio piloto.
- Barbosa, F., Oliveira, H., Fernandes, P., & Filho, J. (2005). Comparación de ecuaciones de consumo máximo de oxígeno en jóvenes. *Acta cirurgica brasileira*, 82(7), 20.
- Bassett, D. R., & Howley, E. T. (2000). Factores limitantes del máximo consumo de oxígeno y determinantes del rendimiento de resistencia. *Journal Publice*.
- Bompa, T. O., & Buzzichelli, C. A. (2017). *Periodización del entrenamiento deportivo*. Paidotribo.
- Brugniaux, J., Schmitt, L., Robach, P., Jeanvoine, H., Zimmermann, H., Nicolet, G., Richalet, J. (2005). Living high-training low: tolerance and acclimatization in elite endurance athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 97, 66-77.
- Calbet JA, & C., L. (2009). Air to muscle O<sub>2</sub> delivery during exercise at altitude. *High Altitude Medicine and Biology*, 10(2), 123-134.
- Carr, A. J., Saunders, P. U., Vallance, B. S., Garvican-Lewis, L. A., & Gore, C. J. (2015). Increased hypoxic dose after training at low altitude with 9h per night at 3000m normobaric hypoxia. *Journal of sports science & medicine*, 14(4), 776.
- Chapman, R., Stager, J., Tanner, D., S. J., & Levine, B. (2011). Impairment of 3000-m run time at altitude is influenced by arterial oxyhemoglobin saturation. *Medicine and science in sports and exercise*, 43(9), 1649-56.
- Czuba, M., Fidos-Czuba, O., Płoszczyca, K., Zając, A., & Langfort, J. (2018). Comparison of the effect of intermittent hypoxic training vs. the live high, train low strategy on aerobic capacity and sports performance in cyclists in normoxia. *Biology of Sport*, 35(1), 39-48.



- Czuba, M., Waskiewicz, Z., Zajac, A., Poprzecki, S., Cholewa, J., & Rocznik, R. (2011). The effects of intermittent hypoxic training on aerobic capacity and endurance performance in cyclists. *Journal of Sport Science and Medicine*, *10*, 175-183.
- Edward, C. (2005). Improved muscular efficiency displayed as Tour de France champion matures. *Journal Apply Physiology*, 2191–2196.
- Faoro, V., Deboeck, G., Vicenzi, M., Gaston, A., Simaga, B., Doucende, G., Naeije, R. (2017). Pulmonary Vascular Function and Aerobic Exercise Capacity at Moderate Altitude. *Medicine and science in sports and exercise*.
- Feng, X., Zhao, L., & Chen, Y. (2023). *Frontiers in Physiology. Optimal type and dose of hypoxic training for improving maximal aerobic capacity in athletes: a systematic review and Bayesian model-based network meta-analysis*, *14*.
- García García, A. M., Ramos Bermúdez, S., & Aguirre, O. D. (2016). Calidad científica de las pruebas de campo para el cálculo del VO<sub>2</sub>max. Revisión sistemática. *Revista Ciencias de la salud*, *14*(2), 247-260.
- García-Orea, G. P., Elvar, J. R., Campillos, J. A., Grigoletto, M. E., & Del Rosso, S. (2016). *Periodización del entrenamiento deportivo*. paidotribo.
- Gore, C. J., Hahn, A. G., Aughey, R. J., Martin, D. T., Ashenden, M. J., Clark, S. A., & McKenna, M. J. (2001). Live high:train low increases muscle buffer capacity and submaximal cycling efficiency. *Acta physiologica scandinavica*, *173*, 275–286.
- Halson, S. (2014). Monitorización de la carga de formación para conocer fatiga en los atletas. *Sports Medicine*, *44*, 139-147.
- Hamlin, M., Marshall, H., Hellemans, J., & Ainslie, P. (2010). Effect of intermittent hypoxia on muscle and cerebral oxygenation during a 20-km time trial in elite athletes: a preliminary report. *Applied Physiology of Nutrition and Metabolism*, *35*, 548-559.

- Hauser, A., Schmitt, L., Troesch, S., Saugy, J. J., Cejuela, R., Faiss, R., & Millet, G. P. (2015). Similar hemoglobin mass response in hypobaric and normobaric hypoxia in athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(4), 734–741.
- Hauser, A., Troesch, S., Saugy, J. J., Schmitt, L., Cejuela-Anta, R., Faiss, R., & Wehrlin, J. P. (2017). Individual hemoglobin mass response to normobaric and hypobaric “live high–train low”: a one-year crossover study. *Journal of Applied Physiology*, 123(2), 387–393.
- Holmberg, H., Rosdahl, H., & Svedenhag, J. (2006). Función pulmonar, saturación arterial y consumo de oxígeno en esquiadores de fondo de élite: influencia del modo de ejercicio. *Revista escandinava de medicina y ciencia en el deporte*, 17.
- Howald, H., & Hoppeler, H. (2003). Performing at extreme altitude: muscle cellular and subcellular adaptations. *European Journal of Applied Physiology*, 90(3–4), 360–364.
- Humberstone-Gough, C. E., Saunders, P. U., Bonetti, D. L., Stephens, S., Bullock, N., Anson, J. M., & Gore, C. J. (2013). Comparison of live high: train low altitude and intermittent hypoxic exposure. *Journal of sports science & medicine*, 12(3), 394.
- Jornet, K., House, S., & Johnston, S. (2019). *Entrenamiento para Atletas de Montaña: El Manual Definitivo para Esquiadores y Corredores de Montaña*. Desnivel.
- Joyner, M. J. (2008). Endurance exercise performance: the physiology of champions. *The Journal of physiology*, 586 (1), 35–44.
- Kettunen, O., Leppävuori, A., Mikkonen, R., Peltonen, J. E., Nummela, A., Wikström, B., & Linnamo, V. (2023). Hemoglobin mass and performance responses during 4 weeks of normobaric “live high–train low and high”. *Scandinavian Journal of Medicine & Science*.
- Levine, B. D. (2002). Intermittent hypoxic training: fact and fancy. *High Altitude Medicine & Biology*, 3, 177–193.

- Lundby, C., Montero, D., & Joyner, M. (2017). Biología del VO<sub>2</sub>max: mirando bajo la lámpara de fisiología. *Acta Physiologica*, 220.
- McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2010). *Exercise physiology: nutrition, energy, and human performance*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Menza, S. V. (2011). Aspectos biomecánicos de la táctica de los deportes individuales.
- Mizuno, M., Savard, G. K., Areskog, N. H., Lundby, C., & Saltin, B. (2008). Skeletal muscle adaptations to prolonged exposure to extreme altitude: a role of physical activity? *High Altitude Medicine and Biology*, 9(4), 311-317.
- Mollard, P., Woorons, X., Letournel, M., Lamberto, C., Favret, F., Pichon, A., Richalet, J. (2007). Determinants of maximal oxygen uptake in moderate acute hypoxia in endurance athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 100, 663-673.
- Morton, J., & Cable, N. (2005). Effects of intermittent hypoxic training on aerobic y anaerobic performance. *Ergonomics*, 48, 1535-1546.
- Neya, M., Enoki, T., Ohiwa, N., Kawahara, T., & Gore, C. J. (2013). Increased hemoglobin mass and VO<sub>2</sub>max with 10 h nightly simulated altitude at 3000 m. *International journal of sports physiology and performance*, 8(4), 366-372.
- Niess, A., Fehrenbach, E., Strobel, G., Roecker, K., Schneider, E., Buergler, J., Dickhuth, H. (2003). Evaluation of stress response to interval training at low and moderate altitudes. *Medicine Science Sports Exercise*, 35, 263–269.
- Park, H. Y., Park, W., & Lim, K. (2019). Living high-training low for 21 days enhances exercise economy, hemodynamic function, and exercise performance of competitive runners. *Journal of sports science & medicine*, 18(3), 427.
- Poole, D., Rossiter, H., Brooks, G., & Gladden, L. (2020). El umbral anaeróbico: más de 50 años de controversia. *La Revista de Fisiología*, 599.

- Prommer, N., Heinicke, K., Viola, T., Cajigal, J., & Behn, C. &. (2007). Long-term intermittent hypoxia increases O<sub>2</sub>-transport capacity but not VO<sub>2</sub>max. *High altitude medicine & biology*, 8(3), 225-235.
- Ramos Campo, D. J., Martínez Sánchez, F., Esteban García, P., Rubio Arias, J. A., & Mendizábal Albizu, S. &. (2012). Efectos fisiológicos inducidos por los programas de hipoxia intermitente. *Archivos medicina deporte*, 29(149), 703-715.
- Ramos-Campo, D. J., Martínez, F., Esteban, P., Rubio-Arias, J. A., & Jiménez, J. F. (2016). Entrenamiento en hipoxia intermitente y rendimiento ciclista en triatletas. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y del Deporte/International Journal of Medicine and Science of Physical Activity and Sport*, 16(61), 139-156.
- Robach, P., Hansen, J., Pichon, A., Meinild Lundby, A. K., Dandanell, S., Slettaløkken, G., & Lundby, C. (2018). Hypobaric live high-train low does not improve aerobic performance more than live low-train low in cross-country skiers. . *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 28(6), 1636-1652.
- Robergs, R., & Keteyian, S. (2003). *Fundamentals of Exercise Physiology for Fitness, Performance, and Health*. New York: McGraw-Hill Higher Education.
- Robertson, E., Saunders, P., Pyne, D., Aughey, R., Anson, J., & Gore, C. (2010). Reproducibility of performance changes to simulated live high/train low altitude. *Medicine and science in sports and exercise*, 42(2), 394-401.
- Roels, B., Bentley, D., Coste, O., Mercier, J., & Millet, G. (2007). Effects of intermittent hypoxic training on cycling performance in well-trained athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 101, 359-368.

- San, T., Polat, S., Cingi, C., Eskiizmir, G., Oghan, F., & Cakir, B. (2013). Effects of high altitude on sleep and respiratory system and their adaptations. *The Scientific World Journal*, 2013.
- Saugy, J. J., Schmitt, L., Cejuela, R., Faiss, R., Hauser, A., Wehrlin, J. P., & Millet, G. P. (2014). Comparison of “Live High-Train Low” in normobaric versus hypobaric hypoxia. *PLoS One*, 9(12).
- Saugy, J. J., Schmitt, L., Hauser, A., Constantin, G., Cejuela, R., Faiss, R., & Millet, G. P. (2016). Same performance changes after live high-train low in normobaric vs. hypobaric hypoxia. *Frontiers in physiology*, 7, 138.
- Saunders, P. U., Pyne, D. B., & Gore, C. J. (2009). Endurance training at altitude. *High altitude medicine & biology*, 10(2), 135-148.
- Wehrlin, J. P., Zuest, P., Hallén, J., & Marti, B. (2006). Live high-train low for 24 days increases hemoglobin mass and red cell volume in elite endurance athletes. *Journal of applied Physiology*, 1938-1945.
- Wehrlin, J., & Hallén, J. (2006). Linear decrease in  $\dot{V}O_{2\max}$  and performance with increasing altitude in endurance athletes. *European journal of applied physiology*, 96(4), 404-12.
- West, J. B. (2004). The physiologic basis of high-altitude diseases. *Annals of Internal Medicine*, 141(10), 789-800.
- Wilber, R. (2007). Application of altitude/hypoxic training by elite athletes. *Med Sci Sport Exerc*, 39, 1610-1624.
- Wilber, R. (2007). Application of altitude/hypoxic training by elite athletes. *Medicine & Science in Sport & Exercise*, 1610-1624.

