

Artículos

- **Mitos y realidades del entrenamiento en altura (Revisión)**
- **Introducción**
- **Respuestas fisiológicas en la aclimatación a la altura**
- **Hipoxia y eritropoyesis**
- **¿es útil el entrenamiento en la altura?**
- **¿Mitos – realidades?**
- **Referencias**

José V. Subiela D.jvsubiela@gmail.com

Instituto Nacional de Deportes –
Dirección Médica - Laboratorio de
Fisiología del Ejercicio – RB de
Venezuela

Fisiología**Mitos y realidades del entrenamiento en altura (Revisión)**

Fecha de recepción: 27/01/2014

Fecha de aceptación: 25/03/2014

El entrenamiento en la altura es un tema controversial. Algunos piensan que el período de entrenamiento en la altitud, es el preámbulo a mejores resultados en las competencias posteriores realizadas a nivel del mar. Sin embargo, la experiencia que se ha acumulado en las últimas décadas en numerosos grupos de atletas, indica que no siempre es así. El entrenamiento en altitudes medias entre 2000 a 3000 metros sobre el nivel del mar (msnm) puede ofrecer pocas ventajas al atleta bien entrenado, que no sea la aclimatación y la capacidad de respuesta a una atmósfera diferente. Los cambios que ocurren son breves, transitorios y reversibles al cesar el estímulo. Por lo tanto no se puede hablar de adaptaciones, sino, en todo caso, de aclimataciones que dejan residuos favorables, si la competencia tiene lugar en el tiempo que estos pueden ser aprovechados por el atleta, que, generalmente, son horas, días, y en el mejor de los casos unas pocas semanas. En este contexto, se comentan las condiciones que impone la altura, algunas de las respuestas fisiológicas que se observan en la altitud, y los cambios que ocurren a nivel sanguíneo estimulados por algunos factores descritos recientemente que actúan en respuesta a la hipoxia tisular.

Palabras Claves: entrenamiento; altitud; hipoxia; aclimatación**Title**

Myths and realities of altitude training

Abstract

Training in altitude is a controversial subject. Some people involved in training think that a period of training in altitude leads to better results in competition performance at sea level. However, cumulative experience of the last decades in numerous groups of athletes indicates that this is not always the case. Training at medium altitudes between 2000 and 3000 meters above sea level may offer few advantages to a well trained athlete, apart of acclimatizing and increase in capacity of response to a different atmosphere. The produced changes are brief, transitory and revert after cessation of the stimulus. Therefore instead of adaptation, they constitute a process of acclimatizing, only beneficial if the competition takes place in the short time of hours, days and, at the best, in a few weeks. In this context, it is discussed the conditions of altitude, the physiological responses to it, and the blood changes to tissue hypoxia stimulated by some recently described factors.

Key Word

training; altitude; hypoxia; acclimatization

Introducción

El tema de la vida en la altura es de gran relevancia tanto por lo que concierne a las personas que viven en cotas altas, como por el amplio uso que se hace en la actualidad de los campamentos de entrenamiento en alturas medias, con el objeto de mejorar la capacidad de rendimiento de los atletas. En las altas cordilleras de África, Asia y Sudamérica viven alrededor de 150 millones de personas en alturas superiores a los 2000 msnm, y es importante conocer la influencia que impone esta condición en el organismo humano, tanto en la salud como en la enfermedad. Además, es importante conocer las exigencias del hábitat en la vida de los seres vivos, y analizar las respuestas de aclimatación que enfrentan las personas que se someten a entrenamientos físicos intensos. Con la concesión de la sede de los XIX Juegos Olímpicos de la era moderna, a Ciudad de México en 1968, (ciudad situada a 2240 msnm), se realizaron numerosas investigaciones antes, durante y después de los mismos, que contribuyeron a conocer el comportamiento del cuerpo humano en ese ambiente, y como afectaba la altitud el rendimiento de los atletas en los distintos deportes y especialidades atléticas. Desde entonces, y con el éxito alcanzado por atletas provenientes de lugares ubicados a más de 2000 msnm (keniatas, etíopes, eritreos.), se ha difundido masivamente el entrenamiento en la altura. Hoy en día se puede afirmar sin exageración que esta práctica está institucionalizada en casi todo el mundo. En años recientes se ha descrito la participación de distintos factores relacionados con la hipoxia, que se activan o acentúan sus efectos cuando el sujeto se desempeña en dichos ambientes ^(1,2). También se han logrado importantes avances en el conocimiento de las respuestas del organismo humano en altitudes medias, altas y extremas, así como en el uso de la hipoxia artificial mediante cámaras o recintos especiales ^(1,2). Además, se han identificado un número significativo de genes que pudieran estar vinculados con el rendimiento físico en condiciones de hipoxia ^(3,4).

Clasificación de la altitud

La continuidad en la altitud es nominalmente clasificada en 5 categorías ⁽⁵⁾:

Nivel del mar o cerca del nivel del mar: 0 a 500 m.

Baja altitud: >500 a 2000 m.

Altitud moderada: >2000 a 3000 m.

Alta montaña: >3000 a 5500 m

Altitud extrema: >5500 m.

Hipoxia

La hipoxia es la disminución del contenido de oxígeno en el aire que se respira. Esta es una condición que se produce cuando se asciende a cotas elevadas. En estos casos no disminuye el porcentaje de oxígeno en el aire inspirado, sino que disminuye la presión parcial del mismo y ello trae como consecuencia la reducción del número de moléculas de oxígeno en el aire que se respira, proporcionando una oferta menor del mismo a los tejidos, y en particular al músculo esquelético, lo que afecta el rendimiento en ejercicios de una duración superior a los 4 ó 5 minutos. Se describen tres condiciones relacionadas con la hipoxia ⁽⁶⁾:

Hipoxia aguda: que son las respuestas que se observan en las 2-3 primeras horas de exposición a la altura, hasta los 5 días de permanencia.

Hipoxia crónica: son las respuestas observadas, desde el sexto día de exposición en adelante.

Hipoxia de toda la vida: cambios que se observan en las personas que fueron concebidas, nacieron y han vivido toda su vida en la altura.

En las primeras horas de permanencia en la altura el organismo pone en marcha unos mecanismos que buscan compensar los efectos adversos de la hipoxia, que se conocen como proceso de **acomodación**. Los cambios orgánicos y funcionales observados durante la permanencia de algunas semanas se denominan **aclimatación**. Ambas condiciones son

reversibles al bajar de la altitud e instalarse de nuevo en tierras bajas. La **adaptación** se ha descrito en algunos animales que viven permanentemente en la altura, como es el caso de la llama de Los Andes y el yak de los Himalayas, y las características funcionales desarrolladas por ellos se transmiten de generación en generación a la descendencia. Está menos claro si esto ocurre en los humanos, como sería el caso de los Sherpas (etnia de las montañas de Nepal en los Himalayas) y los indígenas de los Andes ⁽⁶⁾.

Cambios físicos con la altitud

1.- Disminución de la presión atmosférica.

La presión atmosférica disminuye de forma proporcional a la altura, a razón de 1 mmHg por cada 10 metros de ascenso, aproximadamente ^(7,8), pero la composición química del aire permanece igual que a nivel del mar. Lo que ocurre es una disminución de las presiones parciales de los gases que lo integran, y ello afecta el intercambio gaseoso entre el medio ambiente y los pulmones, entre los pulmones y la sangre, y entre la sangre y las células. Este proceso responde a la ley de las presiones parciales de los gases, descrita por Dalton. De acuerdo a esta ley, en La Guaira el oxígeno ejerce una presión de 160 milímetros de mercurio (mmHg) y en el pueblo de Apartaderos en el estado Mérida (Venezuela), situado a 3400 msnm, es de solo 105 mmHg. Esta diferencia de presión, desde un punto de vista práctico, actúa como si existiera menos oxígeno en el aire que se respira. Este efecto se conoce como “**porcentaje efectivo de oxígeno**” (Tabla I)

Realizando las correcciones correspondientes, a nivel del mar la presión de oxígeno en los pulmones es de 103 mmHg, mientras que en Apartaderos es de 66 mmHg, afectando por lo tanto el intercambio gaseoso. Afortunadamente el cuerpo humano dispone de una proteína transportadora de oxígeno, la hemoglobina (Hb), que pese a esas diferencias tan grandes de presión de oxígeno en los pulmones, la saturación de la Hb apenas disminuye un 10% (Figura I)

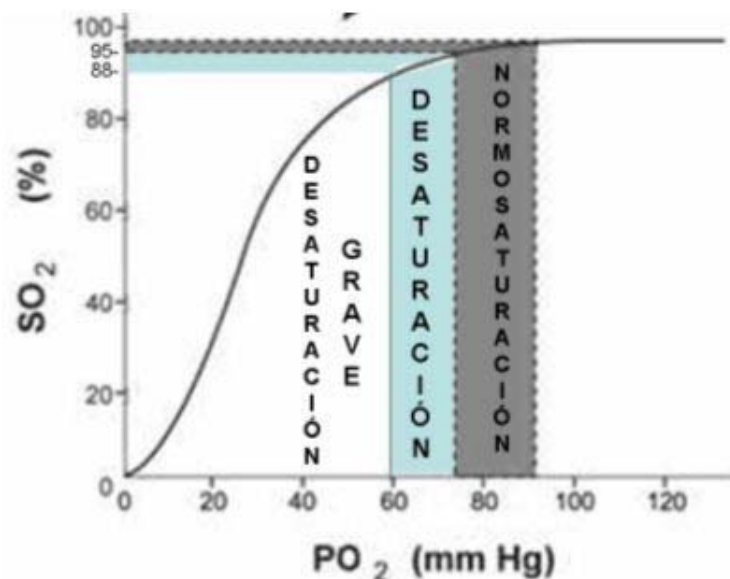


Figura 1.-Curva de saturación de la hemoglobina. En la figura se observan diferentes grados de saturación de la Hb de acuerdo a la presión de O₂ en el aire. Para que la saturación sea del 100% se requiere respirar oxígeno puro o aire en una cámara hiperbárica (Fig II) a 2 atmósferas de presión aproximadamente.



Figura 2 .- Modelo de cámara hiperbárica

En la figura 3 y en la tabla I se observa cómo se modifica la presión atmosférica, la presión de oxígeno y el porcentaje efectivo de oxígeno de acuerdo a la altitud sobre el nivel del mar (9).



Figura 3.- Curva de Zuntz

TABLA I.- Efectos de la altitud en la presión atmosférica, presión de oxígeno y porcentaje de oxígeno efectivo

ALTITUD (msnm)	P. ATMOSFÉRICA (mmHg)	P. OXÍGENO (mmHg)	O₂ EFECTIVO (%)
0	760	160	20,93
500	716	150	19,62
1000	674	141	18,44
1500	634	133	17,39
2000	596	125	16,35
2500	560	117	15,30
3000	526	110	14,38
3500	493	103	13,47
4000	462	97	12,68

En la tabla II se muestra la saturación de la hemoglobina a diferentes presiones arteriales de oxígeno.

TABLA II.- Saturación de la hemoglobina a diferentes presiones parciales de oxígeno

PaO₂ %	Sat Hb
27 (P ₅₀)	50
40	75

50	85
60	90
80	95
100	97,5
150	100

2.- Disminución de la temperatura.

Con el ascenso, la temperatura desciende a razón de 1°C cada 150 a 180 metros (m) de ascenso, dependiendo de la orientación del terreno. En la ladera sur los cambios son más rápidos que en la norte (7,8). Con la altitud se generan lo que se conoce como pisos térmicos.

Por otra parte, hay que considerar la sensación térmica ⁽¹⁰⁾, que depende tanto de la temperatura ambiente como de la velocidad del viento. Es el equivalente a la temperatura que aprecia el cuerpo como producto de estos dos factores. En la alta montaña hay que tomar muy en cuenta este factor por el riesgo que existe de enfriamiento extremo e incluso congelación. Cuando la temperatura ambiente es de 5°C y la velocidad del viento es de 20 km/h, la sensación que registra nuestro cuerpo es como si estuviéramos a una temperatura de 1°C (Tabla III), pero si la temperatura ambiente es de -10° C y la velocidad del viento de 30 km/h, la temperatura que percibe nuestro cuerpo es de -20°C, y así sucesivamente. En las grandes alturas hay que tomar en cuenta estos factores por el riesgo de congelamiento y muerte, si no se lleva el atuendo adecuado.

3.- Disminución del vapor de agua en la atmósfera.

La disminución del vapor de agua en la atmósfera es más intenso que la disminución de la presión parcial de oxígeno. A 2000 msnm el vapor de agua disminuye en un 50%, y a los 4000 msnm la disminución es del 75%. Esta es una de las causas más importantes de deshidratación en grandes alturas, lo cual unido a la velocidad del viento, y a los cambios que ocurren en el sistema endocrino (hormona antidiurética, aldosterona, renina) son factores que contribuyen tanto a la deshidratación como al enfriamiento ⁽¹¹⁾.

4.- Aumento de la irradiación solar.

Con el ascenso aumenta tanto la radiación infrarroja como la ultravioleta, siendo esta última la que produce las quemaduras solares y la inflamación de la córnea. La irradiación solar aumenta entre un 2% y un 4% cada 100 metros de ascenso, hasta los 2000 msnm. Después 1% por cada 100 metros de ascenso adicionales. La presencia de nieve acentúa todavía más el efecto de las radiaciones por reflexión de la luz solar, pudiendo incrementarse la radiación hasta en un 90% ⁽⁸⁾.

5.- Disminuye la densidad del aire.

Este hecho facilita la mecánica respiratoria porque reduce el trabajo de los músculos respiratorios para vencer la resistencia de las vías aéreas. También favorece el desplazamiento, el levantamiento y lanzamiento de objetos. En Ciudad de México la disminución de la densidad del aire tiene un efecto similar que desplazarse con un viento a favor de 1,7 m/seg ⁽¹²⁾

TABLA III .- Sensación térmica o efecto windchill para temperaturas desde 5 a -30° C

Temp Vel k/h	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30
5	4	-2	-7	-13	-19	-24	-30	-36

10	3	-3	-9	-15	-21	-27	-33	-39
15	2	-4	-11	-17	-23	-29	-35	-41
20	1	-5	-12	-18	-24	-30	-37	-43
25	1	-6	-12	-19	-25	-32	-38	-44
30	0	-6	-13	-20	-26	-33	-39	-46
35	0	-7	-14	-20	-27	-33	-40	-47
40	-1	-7	-14	-21	-27	-34	-41	-48
45	-1	-8	-15	-21	-28	-35	-42	-48
50	-1	-8	-15	-22	-29	-35	-42	-49
55	-2	-8	-15	-22	-29	-36	-43	-50
60	-2	-9	-16	-23	-30	-36	-43	-50
65	-2	-9	-16	-23	-30	-37	-44	-51
70	-2	-9	-16	-23	-30	-37	-44	-51
75	-3	-10	-17	-24	-31	-38	-45	-52
80	-3	-10	-17	-24	-31	-38	-45	-52

6.- Disminuye la fuerza de gravedad.

Este hecho resulta ventajoso también tanto para el desplazamiento, el levantamiento y el lanzamiento de objetos. La fuerza de gravedad disminuye $0,003086 \text{ m/seg}^2$ por cada 1000 metros de ascenso. En Ciudad de México la disminución de la fuerza de gravedad es de $0,00691 \text{ m/seg}^2$ y el efecto sumado de la disminución de la densidad del aire y la disminución de la fuerza de gravedad, permite mejorar varios centímetros el rendimiento en los saltos de altura, longitud y garrocha y en varios decímetros los lanzamientos de disco y jabalina ⁽¹²⁾.

Respuestas fisiológicas en la aclimatación a la altura

Respecto a las respuestas cardiorrespiratorias, sanguíneas, metabólicas y endocrinas, hay que diferenciar las que se registran en los cinco primeros días y las que van ocurriendo después de la primera semana. Las primeras se consideran respuestas agudas, mientras que las segundas se consideran crónicas ^(13,14).

1.- Aumento de la ventilación pulmonar.

La disminución de la presión parcial de oxígeno en el aire inspirado disminuye el gradiente

alvéolo-capilar de oxígeno y la presión de oxígeno arterial (PaO_2), lo cual estimula los quimiorreceptores de los cuerpos carotídeos que son muy sensibles a los cambios de la PaO_2 , y ello a su vez estimula el centro respiratorio que finalmente incrementa la ventilación pulmonar.

2.- Aumento de la FC.

Con la altura se incrementa la estimulación simpática y ello incrementa tanto la frecuencia cardíaca (FC) como el gasto cardíaco en reposo. Con el paso de los días la FC disminuye al igual que el gasto cardíaco.

3.- Disminución del volumen plasmático.

Esto ocasiona hemoconcentración, producida por el efecto del aire frío y seco unido a disminución del vapor de agua en el ambiente y mayores pérdidas hídricas por los pulmones y la orina.

4.-Aumento del pH

En la altura hay aumento en la eliminación de CO_2 por la hiperventilación, pudiendo dar lugar a una alcalosis respiratoria, que se suele resolver en 2 a 4 días.

5.- Aumento del 2,3 Difosfoglicerato.

Este intermediario de la glicólisis se produce en los glóbulos rojos (GR) de la sangre y tiene como efecto el desplazamiento de la curva de saturación de la hemoglobina hacia abajo y a la derecha, liberando el oxígeno con mayor facilidad a nivel de los tejidos.

6.- Aumentos hormonales.

Es el caso de las catecolaminas, corticosteroides, hormonas tiroideas, glucagon e insulina.

7.- Disminuciones hormonales.

Es el caso de la hormona antiurética, la aldosterona y la renina. Las hormonas gonadotrópicas parecen no sufrir cambios significativos

8.- Aumenta el metabolismo basal.

Acontece tanto en la fase aguda de aclimatación como en la crónica. Se aprecia también aumento en el consumo de hidratos de carbono y lípidos en reposo. Los niveles de glicemia son menores pese a la captación de glucosa por las células (glucocitosis). Este podría ser uno de los mecanismos de la menor producción de lactato en la altura ⁽¹⁴⁾.

9.- Disminución de la capacidad máxima de consumo de oxígeno.

El porcentaje de pérdida de la capacidad máxima de consumo de oxígeno varía de acuerdo a la altitud. En los lugares donde habitualmente se entrena y compite en la altitud la disminución es entre el 5% y el 8%.

10.-Paradoja del lactato

El concepto de "paradoja del lactato" fue sugerido por el doctor Dill y colaboradores en 1931 ⁽¹⁵⁾. Desde entonces se ha ido modificando y adaptando a los nuevos hallazgos sobre este controversial tema.

Básicamente este concepto afirma que en la altitud, a pesar de haber una hipoxemia por la disminución de la presión parcial de oxígeno en el aire inspirado, y por lo cual cabría esperar una mayor participación del metabolismo anaeróbico, los residentes de tierras bajas a iguales intensidades de trabajo que a nivel del mar, presentan unos valores de lactato en sangre más bajos, tanto en esfuerzos submáximos como en esfuerzos máximos. Pero al respecto hay diversas opiniones.

West ⁽¹⁶⁾ señala: "La concentración de lactato en sangre para una determinada carga de trabajo submáximo, en sujetos aclimatados, es esencialmente la misma que a nivel del mar. Sin embargo en la altura disminuye la capacidad máxima de trabajo y de igual manera disminuye la concentración máxima de lactato en sangre".

Por su parte Kayser ⁽¹⁷⁾ indica: “En los seres humanos aclimatados a la altura se observa una reducción de la concentración de lactato en sangre a cualquier valor de consumo de oxígeno, así como la reducción en la concentración máxima de lactato después de esfuerzos máximos, en comparación con lo observado en la hipoxia aguda y en la normoxia”.

Existe coincidencia en que la “paradoja del lactato” es desencadenada por la exposición a la altitud, y se manifiesta después del período de aclimatación, y no en la exposición aguda. Hay divergencias si se presenta solo en ejercicios máximos o también ocurre en esfuerzos submáximos. Parece entonces que la “paradoja del lactato” se observa en la aclimatación y no en la exposición aguda a la altura.

La disminución en la producción de lactato parece afectar también a los nativos de la altura. Por su parte Hochachka ⁽¹⁸⁾ observó que los nativos de la altura cuando se trasladan a nivel del mar y se aclimatan durante 6 semanas, continuaban presentando menores niveles de lactato en ejercicios de intensidad progresiva, que los nativos de tierras bajas para los mismos niveles de carga de trabajo, aunque algo superiores a los valores que registraban en la altura. Esto lo llevó a considerar que podría ser debido a una expresión metabólica fija, que denominó “la paradoja perpetua del lactato” en los nativos de la altura.

Los mecanismos que se proponen para tales respuestas son:

1.- En la altitud se realiza un mejor ajuste entre el piruvato descarboxilado y el utilizado en la fosforilación oxidativa, dando mejor oportunidad de producir lactato. La reducción en la producción de piruvato se traduce en una menor producción de lactato ⁽¹⁹⁾.

2.- Hay una baja relación ADP/ATP durante el ejercicio y se produce menos inosín monofosfato (IMP) ⁽¹⁹⁾.

3.- Se ha descrito una menor actividad de la fosfofructokinasa (PFK) y por lo tanto menor actividad glicolítica, con la consiguiente reducción en la producción de lactato ⁽¹⁹⁾.

Hay autores que señalan que la paradoja del lactato no ha podido ser demostrada. Van Hall y colaboradores ⁽²⁰⁾ en una revisión reciente sobre el tema, señalan que los residentes de tierras bajas una vez aclimatados a la altura no muestran disminución en la concentración de lactato en sangre durante ejercicios submáximos ni máximos. De igual manera, los nativos de la altura muestran una alta capacidad de producción de energía anaeróbica después de 8 semanas de aclimatación a nivel del mar, reflejada por un incremento en la acumulación de lactato en sangre y una mayor tasa de degradación de nucleótidos de adenina.

De lo expuesto sobre la “paradoja del lactato” pudiéramos resumirlas en dos posiciones frente a este tópico:

1.- Los que defienden la paradoja del lactato sostienen que:

1a.- Los nativos de tierras bajas cuando se trasladan a la altura presentan niveles de lactato inferiores que a nivel del mar, tanto en ejercicios submáximos como en ejercicios máximos.

1b.- La concentración de lactato en sangre en los nativos de tierras bajas cuando se aclimatan a la altura obtienen similares concentraciones de lactato que a nivel del mar cuando realizan ejercicios submáximos, pero en los esfuerzos máximos la concentración de lactato es inferior que a nivel del mar.

1c.- Los nativos de la altura mantienen su producción de lactato baja después de su aclimatación a nivel del mar a cualquier intensidad de trabajo.

2.- Los que cuestionan la existencia de la paradoja del lactato mencionan que:

2a.- Los residentes de tierras bajas una vez aclimatados a la altura no muestran cambios en los valores de lactato en ejercicios submáximos ni máximos con respecto al nivel del mar.

2b.- Los nativos de la altura incrementan su capacidad de producción de lactato después de 8 semanas de aclimatación a nivel del mar.

Hipoxia y eritropoyesis

Los encargados de transportar el oxígeno son los glóbulos rojos de la sangre, por intermedio de la Hb, proteína que se encuentra dentro de los mismos, y representa más del 90% de su masa⁽²¹⁾. Ella se combina reversiblemente con el oxígeno para incorporarlo a su estructura a nivel pulmonar y cederlo posteriormente a las células. Por lo tanto los cambios que ocurran en el organismo para incrementar el consumo de oxígeno deben estimular, entre otros, la producción de GR y la síntesis de Hb (21). Este es uno de los criterios que se plantean para justificar el entrenamiento en la altura. De acuerdo a los conocimientos que se tienen actualmente, no es la altitud en sí la que activa esos mecanismos, sino la hipoxia. La hipoxia es el estímulo natural para desencadenar los cambios que llevan a la mayor producción de GR y de Hb.

La hipoxia provoca una disminución de la saturación arterial de oxígeno, lo cual es captado a nivel cerebral, y se activa de inmediato la síntesis de un factor transcripcional conocido como Factor Inducible por Hipoxia (HIF), descubierto en 1992⁽²²⁾ y aislado y purificado en 1995⁽²³⁾. Este factor es el auténtico regulador de los cambios que se generan a través del estímulo hipóxico. El HIF consta de dos subunidades la 1a y la 1b. En condiciones de normoxia la subunidad 1a se destruye y todo sigue sin cambios, pero en condiciones de hipoxia, se une la subunidad 1a con la 1b y se forma el HIF-1, que es el que estimula la corteza suprarrenal para formar Eritropoyetina (EPO)⁽²⁴⁾. La secuencia de acontecimientos se representa en la figura 4.



Figura 4.- Secuencia de acontecimientos en la producción de GR en un ambiente de hipoxia, se observa que la disminución de la presión parcial de oxígeno en el ambiente, provoca hipoxia, la cual lleva a la disminución de la saturación arterial de oxígeno, se estimula la producción del HIF-1 que estimula la corteza suprarrenal incrementando la producción de eritropoyetina y finalmente la médula ósea aumenta la producción de GR y Hb.

Sin embargo estos procesos no ocurren de forma inmediata, los cambios hematológicos requieren progresividad, intensidad y duración. Para que ocurran aumentos significativos y estables en los niveles de Hb se requiere un tiempo de 3 meses a 1 año⁽²⁵⁾. La mayor eficiencia de los GR para el transporte de oxígeno ocurre en el primer tercio de los 120 días de vida de los mismos, lo que supone que la eritropoyesis debe estar muy activa para incrementar la tasa de producción y renovación de los GR.

Con la altura disminuye el volumen plasmático, por las condiciones ambientales del medio y la mayor pérdida de líquido del cuerpo, por lo cual es muy importante un adecuado nivel de hidratación. En la altitud la sed no es un estímulo expedito para inducir el consumo de agua, y hay que consumir líquido aunque no se sienta sed, para evitar grados de deshidratación importantes, ya que ello disminuye la capacidad reológica de los GR, lo cual dificulta su avance a través de los vasos capilares.

Bases genéticas del entrenamiento en la altura

La disminución de la saturación arterial de oxígeno (Sat O₂) es el estímulo hipóxico más estable⁽²³⁾, y está involucrado en los cambios que acontecen en el cuerpo para inducir una aclimatación progresiva a la altura. En las modificaciones más importantes que se observan en respuesta a la exposición a la altura, está incriminado el factor inducible por hipoxia.

El HIF-1 es un factor transcripcional que regula la expresión de más de 100 genes que tienen que ver con distintas funciones orgánicas, todas relacionadas con la hipoxia, pero su margen de expresión es muy amplia y variada. Incluye enfermedades inflamatorias, cardiovasculares, diabetes y el propio cáncer⁽²⁴⁾. Pero desde el punto de vista que nos interesa destacar, tenemos que hacer referencia a unos 20 genes vinculados al rendimiento físico en condiciones de hipoxia, ya que los cambios que se generan son en respuesta al ejercicio físico, y los genes que se activan redundan en mejoras funcionales. Entre ellos debemos reseñar los genes que tienen que ver con⁽²⁴⁾:

1.- Transporte de oxígeno. La estimulación de la eritropoyesis y el metabolismo del hierro dan lugar a un aumento en la producción de GR y Hb, lo que aumenta el transporte de oxígeno por la sangre. En tal sentido se estimulan los genes siguientes:

- Eritropoyetina (eritropoyesis)
- Transferrina (transporte de hierro)
- Receptor de transferrina (absorción de hierro).

2.- Aumento de la capilarización. Al aumentar la densidad capilar, disminuye la distancia entre la sangre y las células mejorando el proceso de difusión. Esto permite una mejor transferencia de nutrientes y oxígeno, así como el acarreo de productos de desecho, al mismo tiempo que cumple una mejor función de termorregulación. Los genes que se estimulan en este sentido son:

- Factor de crecimiento del endotelio vascular (VEGF). Angiogénesis, formación de vasos capilares.
- iNOS. Producción de óxido nítrico (vasodilatador).
- Endotelina 1. Regulador del tono vascular.

3.- Metabolismo anaeróbico. Mejora el rendimiento en todas las actividades de corta duración y gran intensidad en la que la energía no puede ser aportada exclusivamente por el metabolismo aeróbico, en situaciones en las que la disponibilidad de oxígeno está disminuida. Se estimulan los genes siguientes:

- Transportador de glucosa 1. Absorción de glucosa.
- Fosfofructoquinasa L y C. Glucolisis.
- Lactato deshidrogenada A. Glucolisis.
- Aldolasa A y C. Glucolisis.

4.- Proliferación celular. Se estimulan los genes:

- Factor de crecimiento de la insulina-2 (IGF-2)
- Proteínas transportadoras 1 y 3 del factor de crecimiento de la insulina

Entrenamiento en altura

Por la intensa y extensa difusión del entrenamiento en altura se ha hecho costumbre que en determinadas épocas del año las selecciones deportivas se desplacen a los centros de entrenamiento ubicados entre 2000 y 3000 msnm para “afianzar la condición física” antes de una competencia importante. En algunos países esta práctica se realiza de manera rutinaria e indiscriminada, sin tomar en consideración las características fisiológicas de los diferentes deportes y los pormenores de la ejercitación en la altura. De igual manera acude un levantador de pesas que un ciclista de ruta, igual un gimnasta que un futbolista, lo cual no parece ser lo más adecuado. Generalmente se destinan 3 semanas y luego se regresa a nivel del mar. Ese tiempo de aclimatación puede ser suficiente cuando el atleta va a competir en la altura, pero para generar los cambios que se desean a nivel sanguíneo, muscular, metabólico...debe ser muy superior en opinión de algunos expertos⁽²⁵⁾. En todo caso hay que seleccionar muy bien los

deportes que eventualmente se pudieran beneficiar del entrenamiento en la altura y ajustar los períodos de estancia a la dinámica fisiológica de los sujetos, tomando en consideración la información obtenida al respecto por diferentes grupos de investigadores. Hay que insistir que los cambios que ocurren son breves, transitorios y reversibles al cesar el estímulo, por lo tanto hay que medir muy bien el período de estancia en relación a la fecha de la competencia para la cual se está preparando, y regresar a tierras bajas en el momento apropiado.

El entrenamiento en la altura tiene sus defensores y sus detractores, sin tomar partido por uno u otro, se puede resaltar que no existe ningún trabajo en la literatura científica, elaborado con controles adecuados, que demuestre concluyentemente y de manera incontrovertible que el entrenamiento en la altura genera mejores resultados que el entrenamiento a nivel del mar. A continuación se comenta uno de los trabajos más reconocidos en relación al tema.

¿es útil el entrenamiento en la altura?

En los últimos años ha habido propuestas interesantes para encontrarle justificación al entrenamiento en altura. Desde que se publicaron los trabajos de Levine y Stray Gundersen⁽²⁶⁻²⁸⁾ surgió el interés por establecer la mejor estrategia para un mayor aprovechamiento de este tipo de entrenamiento.

Una de las causas principales de la incorrecta interpretación de los resultados obtenidos con el entrenamiento en altura radica en el diseño de los protocolos de estudio, y en el deseo a ultranza de querer ver beneficios de la hipoxia, cuando en verdad lo que hay son beneficios del entrenamiento bien diseñado, que hubiera proporcionado iguales o mejores resultados de haberse cumplido a nivel del mar.

Por su relevancia merece ser analizado con detenimiento el estudio de Levine y Stray Gundersen, 1997⁽²⁶⁾.

Características del estudio

Estos autores estudiaron a un grupo de 39 estudiantes universitarios, 27 hombres y 12 mujeres, todos corredores de 5000 metros planos. Estructuraron 3 grupos de manera aleatoria, integrados cada uno por 9 hombres y 4 mujeres. Los grupos fueron denominados así:

1. Grupo 1 High-High (Hi-Hi) – Vivir y entrenar arriba.
2. Grupo 2 High-Low (Hi-Lo) – Vivir arriba y entrenar bajo.
3. Grupo 3 Low-Low (Lo-Lo) – Vivir y entrenar a nivel del mar.

El estudio de estos autores comprendió varias etapas:

- 1.- Serie de pruebas de laboratorio para familiarización.
- 2.- Trabajo a nivel del mar con supervisión del entrenamiento e inicio de la suplementación intensa de hierro para normalizar la ferritina sérica y evitar la “anemia del deportista”.
- 3.- Realización del conjunto completo de las pruebas de laboratorio y de campo que sirvieron como línea de base.
- 4.- Cuatro semanas de entrenamiento a nivel del mar en Dallas, Texas, USA, diseñado para maximizar la aptitud en todos los atletas y servir de control longitudinal de los resultados a nivel del mar. Los atletas entrenaron todos con iguales intensidades relativas, iguales volúmenes y similares características del terreno.
- 5.- Segunda serie de mediciones completas antes del campamento de entrenamiento de campo. Se realizaron tanto las pruebas en el laboratorio como la prueba de 5000 m. En esta prueba el grupo mostró una mejoría de 2,1%
- 6.- Cuatro semanas de entrenamiento en el respectivo campamento con los atletas divididos en 3 grupos mediante diseño aleatorio equilibrado integrados por 13 sujetos. Todos entrenaron cuatro semanas en sus respectivos campamentos

- El primer grupo vivió a 2500 m de altitud y entrenó a 2500 m.

- El segundo grupo vivió a 2500 m de altitud y entrenó a 1250 m.
- El tercer grupo vivió y entrenó a nivel del mar.

7.- Después de 4 semanas de entrenamiento en los respectivos campamentos, los atletas regresaron a Dallas, donde repitieron toda la serie de mediciones de laboratorio.

8.- Se midió el tiempo empleado en 5000 m cada semana por tres semanas para determinar el tiempo óptimo de competición.

El grupo 1, es decir el que vivió y entrenó a 2500 msnm, aumentó la masa eritrocitaria (masa total de Hb) en 10,5%. El grupo 2, que vivió a 2500 msnm pero entrenó a 1250 msnm, la aumentó en 5,3%. El grupo 3, que vivió y entrenó a nivel del mar no mejoró ni su masa eritrocitaria (Hb), ni su consumo de oxígeno, ni el rendimiento en la prueba de 5000 m.

Durante las siguientes semanas se realizó un chequeo máximo semanal en 5000 m y solamente el grupo 2 mantuvo mejoría en el rendimiento hasta la tercera semana.

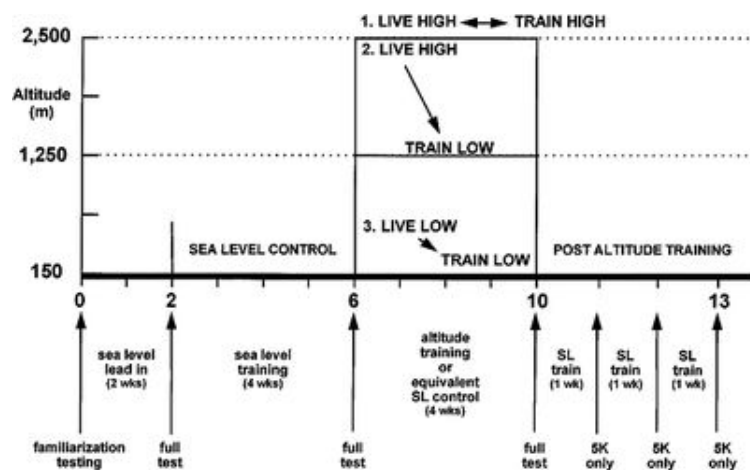


Figura 5.- Diseño del estudio de Levine y Stray-Gundersen (Tomado de referencia 26)

Los resultados de este estudio se obtuvieron con atletas universitarios de nivel medio o bajo. Los mismos autores en un trabajo realizado con atletas de élite reconocen que hay individualidades que responden y otros que no responden al entrenamiento en la altura. Cuando consideran la totalidad del grupo, no encuentran resultados diferentes a los obtenidos con el entrenamiento a nivel del mar en la concentración de Hb, VO_2 y rendimiento. ⁽²⁷⁾.

De estos resultados se desprenden dos aspectos importantes:

1.- No hay relación entre el incremento de la masa eritrocitaria y la Hb con el incremento del VO_2 max. El grupo 1 aumentó su masa eritrocitaria en 10,5% pero su consumo de oxígeno máximo aumentó en 3%. El grupo 2 aumento su masa eritrocitaria en 5%, y su VO_2 max en 4%.

2.- Los resultados sobre el rendimiento son menos evidentes. Solo el grupo 2 mejoró su rendimiento en 1,4%. Pero aún en este grupo hubo quien mejoró 5% y otros que no mejoraron en absoluto.

La interpretación que se le dio al estudio fue: al entrenar a 2500 m, el entrenamiento no fue tan eficaz porque la altitud no permite entrenar a la misma intensidad absoluta ni mantener el mismo volumen de entrenamiento que a nivel del mar y el efecto sobre el rendimiento es menor, ya que el factor intensidad en el entrenamiento es clave cuando de rendimiento se trata. Esto puede explicar la ausencia de mejoría en los registros en la prueba de 5000 m, porque en las sesiones de entrenamiento se alcanzaba la misma intensidad relativa (%) que a nivel del mar pero el consumo de oxígeno era inferior debido a la hipoxia, y por lo tanto el efecto fue menor. El grupo 2 que si mejoró su rendimiento, mostró diversidad en la respuesta, se observó que los que mejoraron su masa eritrocitaria fueron los que mejoraron su consumo de oxígeno y su rendimiento. Por otro lado se observó que los que mostraban mayor desaturación de oxígeno a nivel del mar, ésta era todavía mayor en la altitud moderada, lo cual impedía mantener el mismo

consumo de oxígeno a una determinada intensidad relativa, y con ello también disminuye el efecto de entrenamiento. Además, cuando se realiza entrenamiento intermitente a la misma intensidad absoluta en la altura que a nivel del mar, el grupo de la altura requiere mayor tiempo de recuperación para poder mantener la misma intensidad que la desarrollada a nivel del mar.

¿Mitos – realidades?

Los efectos del entrenamiento en la altura son difíciles de precisar por la diversidad de protocolos experimentales que se utilizan. Habría que estandarizar los procedimientos y tomar en cuenta todas las variables que pudieran influir en los resultados. Entre ellos es necesario tener un buen grupo control, conformado por sujetos con características similares a los grupos experimentales, además de proceder con la misma rigurosidad y similitud en todos los aspectos involucrados en el protocolo, con todos los grupos. Adicionalmente hay que tomar en cuenta que la generalización de las mediciones de laboratorio sobre el potencial de rendimiento constituye una fuente de error, y que la fiabilidad predictiva de las medidas de laboratorio no es alta, lo cual añade dificultades para una interpretación cabal de los resultados.

Una lectura crítica de los trabajos que aparecen en la literatura sobre el tema, genera dudas sobre la bondad absoluta e indiscriminada del entrenamiento en la altura.

Analicemos brevemente los siguientes planteamientos

1.- En la altura aumentan los niveles de glóbulos rojos y de hemoglobina.

R.- Cierto.

Este es uno de los principales argumentos para defender el entrenamiento en la altura. El razonamiento es obvio, si es así, al volver a nivel del mar hay aumento de la capacidad de transporte y suministro de oxígeno, por lo tanto aumenta el consumo máximo de oxígeno y se mejoran los resultados en los ejercicios y deportes aeróbicos. Pero resulta que el aumento en los valores de Hb se debe fundamentalmente a la disminución del volumen plasmático, eso determina que el mismo volumen de GR esté disuelto en menor volumen de líquido y ello aumenta los valores de la Hb de una forma irreal⁽²⁹⁻³¹⁾. La disminución del volumen plasmático permite elevar entre 5 y 10 puntos el valor del hematocrito en 24 – 48 horas. De esta manera aumenta muy rápidamente el contenido de oxígeno en sangre arterial⁽²⁵⁾.

Aunque la hipoxia es detectada por el aparato yuxtglomerular renal y hay liberación de eritropoyetina (EPO), esto es muy importante en la fase aguda pero 3 a 5 días después de la estancia en la altura las concentraciones de EPO en sangre vuelven a los niveles normales pese a continuar disminuida la PaO_2 ⁽²⁵⁾.

Analizando más detenidamente esta situación se comprende que este es un mecanismo de respuesta muy efectivo en situaciones en que el organismo se ve sometido a condiciones desfavorables para una adecuada oxigenación tisular. Con el mecanismo de la hemoconcentración se aumenta el contenido de oxígeno en la sangre arterial (CaO_2)⁽³²⁾, puesto que el CaO_2 depende de:

$$CaO_2 = (1.34 \times [Hb] \times SatO_2) + (PaO_2 \times 0,03)$$

Este mecanismo se ve apoyado por la hiperventilación que se produce en la altura que aumenta la presión alveolar de oxígeno (PAO_2), y aunque aumenta discretamente la presión arterial de oxígeno y el contenido de oxígeno en la sangre arterial, solo se compensa parcialmente el aporte de oxígeno a los tejidos.

Cuando se regresa a nivel del mar después de 3 ó 4 semanas de permanencia en la altura, se retiene agua y se expande el volumen plasmático, alcanzando la Hb el valor normal que se tenía antes de permanecer en la altura^(33,34). Para que se produzca un aumento real de la masa eritrocitaria es necesaria la permanencia en la altura por 3 a 12 meses⁽²⁵⁾.

2.- El entrenamiento en altura incrementa la capacidad máxima de consumo de oxígeno.

R.- Falso.

El consumo de oxígeno es un parámetro poco entrenable en personas activas desde la infancia. Alcanza su valor máximo en la mayoría de los casos entre los 16 y 20 años de edad. En adelante ya no es posible mejorarlo significativamente, pero si se mejoran otros índices aeróbicos de los que depende fundamentalmente el rendimiento para un VO_2 max establecido.

La mayoría de los estudios al respecto sugieren que el entrenamiento en altura no permite aumentar el VO_2 max a nivel del mar, en sujetos que antes de trasladarse a la altura ya estaban en su nivel óptimo de rendimiento ⁽³⁵⁾. Es decir la permanencia en la altura combinada con entrenamiento en altura no permite aumentar el VO_2 max en mayor medida que el mismo entrenamiento realizado a nivel del mar.

Gore et al 1998 ⁽³⁶⁾, estudiaron a 8 ciclistas (campeones mundiales en ciclismo de persecución), quienes permanecieron y entrenaron durante 31 días a 2690 m y no observaron incrementos ni en la masa eritrocitaria, ni en el VO_2 max, pero mejoraron el tiempo en la prueba de 4000 m persecución en 4%.

Los estudios de Svedenhag et al 1997 ⁽²⁹⁾ no mostraron cambios significativos ni en los niveles de Hb ni en el VO_2 max después de 4 semanas de permanencia y entrenamiento en la altura (2000 m) en esquiadores de élite.

Algunos estudios ^(26,27) reportan mejoras en los tiempos en las competencias, después del entrenamiento en la altura a pesar de ser muy discretos o nulos los efectos sobre la Hb y el VO_2 max. Será debido esto al aprendizaje por la repetición de los estímulos de entrenamiento? O al mejoramiento de otros índices aeróbicos que son independientes del VO_2 max?

3.- En la altura disminuyen los valores funcionales cardiocirculatorios.

R.- Cierto

Efectivamente disminuye tanto el gasto cardíaco máximo, como la frecuencia cardíaca máxima ⁽¹³⁾. Se pensaba que la disminución del gasto cardíaco máximo se debía a una reducción marcada del volumen plasmático, el aumento de la viscosidad sanguínea y reducción de la presión de llenado ventricular, por lo tanto esto se debería corregir al normalizar estos parámetros, pero no es así ⁽²⁹⁾. El gasto cardíaco máximo se mantuvo disminuido después de administrar 1 litro de expansores del plasma y corregir dichos parámetros ⁽²⁹⁾. Además, la FC max también disminuye con la altura, lo cual es otro factor limitante del rendimiento.

4.- El entrenamiento en altura aumenta la concentración de mioglobina en el músculo.

R.- Parcialmente cierto.

La mioglobina (Mb) es una proteína similar a la Hb pero cuenta con una sola cadena polipeptídica con 153 aminoácidos, y es la responsable de transferir el oxígeno a la mitocondria para la producción de energía.

Se ha observado aumento de la Mb cuando se entrenan masas musculares pequeñas, pero cuando se utiliza un porcentaje importante de la masa muscular total, como en la carrera, no es posible mantener la misma intensidad absoluta en hipoxia que en normoxia y por la misma razón argumentada anteriormente no hay aumento en la concentración de Mb ⁽³⁷⁾. Desde ese punto de vista es más efectivo el entrenamiento a nivel del mar. Una mayor concentración de Mb permitiría una tasa de extracción de oxígeno mayor, pero esto no ocurre, ésta es similar antes y después del entrenamiento en altura.

Además, la existencia en la actualidad de un ratón transgénico sin mioglobina, capaz de llevar una vida completamente normal, incluso sin disminuir su nivel de actividad, al menos obliga a revisar el papel trascendental que se le ha asignado a la Mb en el aporte de oxígeno ⁽²⁵⁾.

5.- El entrenamiento en altura incrementa la actividad enzimática aeróbica.

R.- Falso.

No existen estudios realizados en atletas de alto nivel que demuestren el incremento de la actividad enzimática aeróbica ⁽³⁵⁾. Pero además, si esto fuera cierto sería intrascendente porque la capacidad oxidativa muscular excede considerablemente la capacidad de suministro de oxígeno. Es decir, que si dependiera de la actividad enzimática, pudiéramos producir mucha más energía de la que producimos, lo que falta es mayor suministro de oxígeno y esto depende fundamentalmente de factores cardiocirculatorios centrales, pues la capilarización muscular tampoco aumenta considerablemente con el entrenamiento en la altura. El número de capilares alrededor de cada fibra no se modifica con la altura pero si el número de capilares por mm² de sección muscular ^(35;38), y esto es debido a que la permanencia prolongada en la altura provoca atrofia muscular, sobre todo a grandes altitudes ⁽²⁵⁾. Para un mismo número de capilares alrededor de cada fibra y más fibras por mm² de sección muscular, mayor el número de capilares por mm² de sección transversal de músculo.

Se invocan frecuentemente los resultados de los corredores keniatas y etíopes en relación al entrenamiento en altura, porque ellos son residentes habituales en alturas entre 2000 a 3000 msnm. Pues bien, analizando diversos parámetros sanguíneos, metabólicos y aún genéticos, se observa que no existen diferencias con respecto a atletas élite de tierras bajas. Los éxitos de estos atletas hay que explicarlos en términos de factores o condiciones que todavía no se conocen bien.

6.- La altura mejora el rendimiento en los ejercicios y deportes anaeróbicos.

R.- Falso

Al tratarse de esfuerzos de corta duración, como saltos, lanzamientos, carreras de velocidad, se ven favorecidos por la disminución de la densidad del aire y la disminución de la fuerza de gravedad y por lo tanto el rendimiento es mayor aún sin entrenamiento previo en la altura ⁽¹²⁾. Cuando se trata de esfuerzos más prolongados, pero que no rebasen el minuto de duración, también se reportan mejoras en el rendimiento. Pero cuando se evalúa la actividad enzimática glicolítica, la actividad de la bomba sodio-potasio, y la reserva total de bicarbonato, estas disminuyen después del entrenamiento en la altura ⁽³⁵⁾. Con los modelos experimentales utilizados en la actualidad no se ha podido demostrar con claridad los beneficios del entrenamiento en altura o en hipoxia simulada para mejorar la capacidad anaeróbica.

En un estudio realizado con triatletas en un nivel de hipoxia equivalente a 2500 m de altitud ⁽³⁹⁾ reportan un aumento de la potencia media de 7% y un aumento de la potencia máxima del 4% en la prueba de Wingate, después de 10 sesiones de entrenamiento de 105 minutos de duración. Lo curioso es que la intensidad de entrenamiento se realizaba entre el 60% y 70% de la reserva de la FC, es decir un entrenamiento típicamente aeróbico. El consumo de oxígeno máximo no mejoró, pero si la potencia anaeróbica.

En otro estudio realizado con una hipoxia equivalente a 2500 m de altitud en un grupo de nadadores élite, con la modalidad de entrenamiento de intervalos, no se constató ninguna mejoría en el rendimiento en 100 y 400 m libres, ni en la capacidad anaeróbica (déficit de oxígeno máximo acumulado), en comparación con los resultados obtenidos con el entrenamiento en normoxia ⁽⁴⁰⁾.

Conclusiones

1.- La aclimatación a la altura mediante un entrenamiento adecuado en la altura es fundamental para competir en la altura.

2.- La concentración de equipos o selecciones en centros de entrenamiento en altura permiten un control más riguroso y controlado, de las actividades, dietas, períodos de descanso, y de los propios atletas, pero eso también se puede lograr en el lugar de residencia si hay la voluntad de hacerlo.

3.- Los resultados del entrenamiento en altura para competir a nivel del mar son disímiles, pero hay mayor número de resultados que indican que en las permanencias tradicionales de 3 semanas, en atletas que ya llegan en un óptimo estado de entrenamiento no ocurren cambios

significativos en la Hb, VO₂ max, actividad enzimática, capilarización, ni rendimiento.

4.- Hay propuestas interesantes para programar el entrenamiento en altura que podrían dar buenos resultados en aquellos atletas respondedores a la hipoxia, tales como: vivir arriba – entrenar abajo, o entrenamiento en hipoxia artificial mediante equipos especiales, sin embargo su efectividad de manera consistente y absoluta está por confirmar.

5.- Hay individuos que responden a las condiciones que impone la altura y generan respuestas que los pueden favorecer a nivel del mar dentro de ciertos límites, pero hay sujetos que no responden en absoluto al entrenamiento en altura. Entre los que responden hay grandes diferencias en la magnitud de la respuesta.

6.- El traslado de selecciones enteras a campos de entrenamiento en la altura es muy oneroso. Hay que poner en la balanza el costo / beneficio, y tomar las decisiones que correspondan, a la luz de los resultados que ofrecen un gran número de estudios al respecto.

7.- Ni altitud, ni la hipoxia sustituyen un buen programa de entrenamiento ajustado a las capacidades individuales de cada atleta. Si a esto se le suma una buena atención en todos los demás factores que intervienen en el rendimiento, se obtiene la fórmula óptima para un buen resultado.

Referencias

- 1.- Bonetti DL, Hopkins WG. Sea-level exercise performance following adaptation to hypoxia: a meta-analysis. *Sports Med.* 2009; 39:107-127.
- 2.- Siebenmann C, P Robach, RA Jacobs, P Rasmussen, N Nordsborg, V Diaz, A Cristo, NV Olsen, M Maggiorini, Lundby C. "Live high-train low" using normobaric hypoxia: a double-blinded, placebo-controlled study. *J Appl Physiol* 2012; 112:106-117.
- 3.- Rankinen T, Bray MS, Hagberg JM, Pésusse L, Roth SM, Wolfarth B, Bouchard C. The Human Gene Map for Performance and Health-Related Fitness Phenotypes: The 2005 Update. *Med Sci Sports Exer* 2006; 38: 1863-1888.
- 4.- Bouchard C, Hoffman E. Genetic and molecular aspects of sport performance. Wiley-Blackwell, Chichester, West Sussex, 2011
- 5.- Bartsch P, Saltin B. General introduction to altitude adaptation and mountain sickness. *Scand J Med Sci Sports* 18 (suppl 1): 1-10.
- 6.- Grima T, Rosselló MA, Sanchez J, García A. Entrenamiento en altura y efecto de la hipoxia. 2ON Café – Girona, España, 2010.
- 7.- Venegas P. Entrenamiento en altitud: Fundamentos fisiológicos y efectos sobre el rendimiento. *Arch Soc Chil Med Deporte* 2000; 45:139-50.
- 8.- Venegas P. Bases biológicas del entrenamiento en altitud. 5to Congreso Internacional de Cardiología por Internet, Federación Argentina de Cardiología, 2007
- 9.- Zunts N. Ueber die Bedeutung der verschiedenen Nährstoffe als Erzeuger der Muskelkraft. *Arch Gesamte Physiol, Bonn, Germany: LXXXIII. Pflügers Arch Physiol* 1901; 83:557
- 10.- Sipple PA, Passel CF. Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. *Proced of the Am Phil Soc* 1945; 89: 177-199
- 11.- Venegas P. Ejercicio y entrenamiento en altitud. En *Nutrición, Fisiología y Ejercicio en Altitud*. M. Sandoval y J. Bravo, Eds. Santiago de Chile, 1999
- 12.- Cerretelli P. *Manuale di fisiología dello sport e dell lavoro muscolare*. Società editrice universo, Roma, 1993.
- 13.- Mazzeo R S. Physiological responses to exercise at altitude: an update. *Physiological Responses to Exercise at Altitude: An Update. Sports Med*, 2008; 38: 1-8.

- 14.- Mora R. Efectos de la hipoxia sobre la actividad física y el rendimiento deportivo. EFDeportes.com, Revista Digital. Buenos Aires, Año 16, N° 161, Octubre de 2011. <http://www.efdeportes.com/>
- 15.- Dill DB, Edwards HT, Folling A, Oberg SA, Pappenheimer AM, Tabot JH. Adaptations of the organism to changes in oxygen pressure. *J Physiol* 1931; 71: 47-63.
- 16.- West JB. Lactate during exercise at extreme altitude. *Fed Proc* 1986; 45: 2953-2957.
- 17.- Kayser B. Lactate during exercise at high altitude. *Eur J Appl Physiol* 1996; 74: 195-205.
- 18.- Hochachka PW. The lactate paradox: analysis of underlying mechanism. *Ann Sports Med* 1989; 4: 184-188.
- 19.- Cerretelli P, di Prampero PE, Howald H. Muscle function impairment in humans acclimatized to chronic hypoxia. En *Physiological function in special environments*, Paganelli CV, Farhi LE (Eds.). New York: Springer-Verlag New York Inc., pag: 41-58, 1989.
- 20.- van Hall G, Lundby C, Araoz M, Calbet JA, Sander M, Saltin B. The lactate paradox revisited in lowlanders during acclimatization to 4100 m and high-altitude natives. *J Physiol* 2009; 587: 1117-1129.
- 21.- Green JH. Manual de fisiología humana. Edit Marin, Madrid, 1969.
- 22.- Semenza GL, Wang GL. A nuclear factor induced by hypoxia via de novo protein synthesis binds to the human erythropoietin gene enhancer at a site required for transcriptional activation. *Mol Cell Biol* 1992; 12: 5447-5454
- 23.- Wang GL, Jiang BH, Rue EA, Semenza GL. Hypoxia-inducible factor 1 is a basic-helix-loop-helix-PAS heterodimer regulated by cellular O₂ tension. *Proc Natl Acad Sci USA* 1995; 92: 5510-5514.
- 24.- Boticario C, Cascales M. Hipoxia y cáncer. *An. R. Acad. Nac. Farm.*, 2010, 76 (3): 379-408.
- 25.- López Calbet JA. Efectos del entrenamiento en altitud. IX Jornadas sobre Medicina y Deporte de Alto Nivel, Madrid, 2007.
- 26.- Levine BD, Stray Gundersen J. "Living high- training low": effect of moderate altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J Appl Physiol* 1997; 83: 102-112.
- 27.- Stray-Gundersen, J, Chapman RF, Levine BD. "Living high-training low" altitude training improves sea level performance in male and female elite runners. *J Appl Physiol* 2001; 91: 1113-1120.
- 28.- Levine BD, Stray-Gundersen J. Dose-Response Of Altitude Training: How Much Altitude Is Enough?. In: *Hypoxia and exercise*, Springer Science, New York, 2006.
- 29.- Svedenhag J, Piehl-Aulin K, Skog C, Saltin B. Increased left ventricular muscle mass after long-term altitude training in athletes. *Acta Physiol Scand* 1997; 161: 63-70.
- 30.- Robach P, Dechaux M, Jarrot S, Vaysse J, Schneider JC, Mason NP, Herry JP, Gardette B, Richalet JP. Operation Everest III: role of plasma volume expansion on VO₂ max during prolonged high-altitude exposure. *J Appl Physiol* 2000; 89: 29-37.
- 31.- Robach P, Lafforgue E, Olsen NV, Dechaux M, Fouqueray B, Westerterp-Plantenga M, Westerterp K, Richalet JP. Recovery of plasma volume after 1 week of exposure at 4,350 m. *Pflugers Arch* 2002; 444: 821-828.
- 32.- Rodríguez V. Respuesta cardíaca en reposo y durante el esfuerzo submáximo, en el proceso de aclimatación a la altura, implicaciones para el entrenamiento. *Rev.int.med.cienc.act.fis.deporte* 2002; 2: 235-243.
- 33.- Dill DB, Braithwaite K, Adams WC, Bernauer EM. Blood volume of middle-distance runners: effect of 2,300-m altitude and comparison with non-athletes. *Med Sci Sports* 1974; 6: 1-7.
- 34.- Boning D, Maassen N, Jochum F, Steinacker J, Halder A, Thomas A, Schmidt W, Noe G, Kubanek B. After-effects of a high altitude expedition on blood. *Int J Sports Med* 1997;

18:179-185.

35.- López Calbet JA. Entrenamiento en altura e hipoxia intermitente. Encuentro sobre Alto Rendimiento Deportivo, Málaga, 2006.

36.- Gore CJ, Hahn A, Rice A, Bourdon P, Lawrence S, Walsh C, Stanef T, Barnes P, Parisotto R, Martin D, Pyne D, Gore C. Altitude training at 2690m does not increase total haemoglobin mass or sea level VO₂max in world champion track cyclists. *J Sci Med Sport* 1998; 1:156-170.

37.- Terrados N, Jansson E, Sylven C, Kaijser L. Is hypoxia a stimulus for synthesis of oxidative enzymes and myoglobin? *J Appl Physiol* 1990; 68:2369-2372.

38.- Lundby C, Pilegaard H, Andersen JL, van Hall G, Sander M, Calbet JA. Acclimatization to 4100 m does not change capillary density or mRNA expression of potential angiogenesis regulatory factors in human skeletal muscle. *J Exp Biol* 2004; 207: 3865-3871.

39.- Hendriksen IJ, Meeuwse T. The effect of intermittent training in hypobaric hypoxia on sea-level exercise: a cross-over study in humans. *Eur J Appl Physiol* 2003; 88: 396-403.

40.- Truijens MJ, Toussaint HM, Dow J, Levine BD. Effect of high-intensity hypoxic training on sea-level swimming performances. *J Appl Physiol* 2003; 94:733-743.

NOTA: Toda la información que se brinda en este artículo es de carácter investigativo y con fines académicos y de actualización para estudiantes y profesionales de la salud. En ningún caso es de carácter general ni sustituye el asesoramiento de un médico. Ante cualquier duda que pueda tener sobre su estado de salud, consulte con su médico o especialista.