

# EJERCICIO FÍSICO EN ALTURA. ASPECTOS TEÓRICOS Y PRÁCTICOS DEL ENTRENAMIENTO

**Alejandro Lucía Mulas**

Doctor en Medicina.

Profesor de la Universidad Europea de Madrid.  
Departamento de Ciencias Morfológicas y Fisiología.

## RESUMEN:

Tanto estudios previos publicados sobre los efectos fisiológicos del dopaje sanguíneo o *eritrocitemia inducida* (mediante transfusiones sanguíneas o administración de eritropoyetina recombinante humana), por una parte, como la evidencia empírica de médicos, entrenadores y deportistas, por otra, parecen indicar que los niveles de hemoglobina y hematócrito se relacionan positivamente con el rendimiento deportivo en ejercicios de resistencia (carrera de fondo, ciclismo, etc.). Por otra parte, un método permitido y legítimo de estimular el proceso de eritropoyesis lo constituye el entrenamiento en altura. De hecho, a él recurren numerosos deportistas. Por ejemplo en nuestro país disponemos de un *centro de alto rendimiento* situado en Sierra Nevada, a una *altura moderada* (entre 2.000 y 3.000 m), el cual es utilizado por un buen número de deportistas todo el año.

El peso de la evidencia científica, sin embargo, no parece ir a favor de un aumento del rendimiento físico mediante estancias o concentraciones en altura moderada (1, 2). Entre otras causas, quizás porque en altura se reduce considerablemente la intensidad de los entrenamientos y es necesaria una exposición larga (de más de 3 semanas) y a considerable altura (superior a 2.500-3.000 m) para que los deseados efectos sobre la eritropoyesis sean significativos. Para poder comprender los *pros* y los *contras* del entrenamiento en altura, hemos de conocer primero los cambios fisiológicos que se producen en el cuerpo humano en altura.

## RESPUESTAS FISIOLÓGICAS EN ALTURA

### La atmósfera en altitud

A excepción de algunos gases contaminantes cuya concentración es anormalmente alta en algunos lugares (grandes ciudades, etc.), la composición de la atmósfera es similar en cualquier parte de nuestro planeta: aproximadamente 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno, con muy pequeñas cantidades de argón, dióxido de carbono y otros *gases traza*. El principal problema al que se enfrenta el ser humano en altura es la *hipoxia* o disminución de la presión parcial de oxígeno ( $PO_2$ ), tanto mayor cuanto mayor sea la altura (es decir, cuanto menor sea la presión barométrica). Aunque en esta revisión sólo nos vamos a centrar en los efectos de la hipoxia, no conviene olvidar que el entorno de las grandes alturas también incluye otras va-

riables que le hacen ser hostil al ser humano, como es el frío, y que condicionan mucho el rendimiento físico en el deporte del alpinismo.

### Respuesta fisiológica a la hipoxia (exposición aguda y a corto plazo)

Obviamente, la respuesta del cuerpo humano a la hipoxia varía, por una parte, en función de la magnitud del estrés *hipóxico* (mucho menor por ejemplo a una altura moderada, que es a la que suelen entrenar los atletas, que a una altura superior a 4.000 m, que es a la que deben ejercitarse los alpinistas), y por otra, en función de la velocidad a la que se somete al estrés hipóxico (no es igual la respuesta de los primeros días en altura que la de un sujeto aclimatado durante semanas, meses o incluso años). Nosotros nos vamos a referir sobre todo a aquellos cambios que acontecen en el organismo acostumbrado a una atmósfera relativamente *normóxica* (como la que existe en la mayor parte de las poblaciones del mundo, que suelen hallarse por debajo de los 1.000 m de altura) y que se somete a una atmósfera hipóxica durante unos días (por ejemplo, unas cuantas semanas). Este sería el típico caso de un atleta que realiza una concentración en altura de 2-3 semanas: se trata más bien de una exposición aguda, o en todo caso a medio plazo. Los cambios fisiológicos que se producen en segundos (por ejemplo, en la cabina de un avión que se *despresuriza* bruscamente) interesan más bien a la medicina aeroespacial que al ámbito de la Fisiología del Ejercicio.

Dependiendo de las variables fisiológicas (v.g., ventilación, frecuencia cardíaca, etc.) que consideremos, al cabo de unos semanas, meses o años, el individuo se *aclimata* a la altura y estos cambios se convierten ya en *adaptaciones fisiológicas* (por ejemplo, en los *nativos de las alturas*, es decir, aquellas personas que han nacido y vivido toda su vida en altura). A estos cambios crónicos nos referiremos también en algún momento a lo largo de esta revisión. De todos modos, debemos señalar que quizás el cuerpo humano nunca llegue a adaptarse o aclimatarse del todo a una atmósfera hipóxica (1).

El descenso de la  $PO_2$  inducido por la reducción de la presión barométrica provoca una reducción en la tensión alveolar de oxígeno y *por ende* en la saturación de oxígeno en la sangre arterial que sale de los pulmones (2, 3). Como consecuencia de este hecho disminuye la capacidad de transporte de oxígeno desde la atmósfera a la sangre pues la difusión de oxígeno desde la atmósfera que nos rodea a la sangre que llega a los capilares pulmonares depende directamente del gradiente de  $PO_2$  entre alvéolos y sangre. Este hecho provoca por tanto un descenso en la presión arterial de oxígeno, con el consiguiente descenso en el aporte de oxígeno a los distintos tejidos del organismo. Y, como respuesta a este fenómeno básico tienen lugar toda serie de respuestas fisiológicas que aparecen algunas de ellas tan pronto como en las primeras horas de exposición a altura (4), y que pueden perdurar durante meses o incluso años si persiste la exposición a esta atmósfera hipóxica (1, 2). Es importante tener en cuenta que, al menos en las primeras fases de aclimatación a la altura, estas respuestas fisiológicas diversas —que enseguida pasamos a estudiar— están

todas ellas dirigidas hacia a un mismo objetivo, que no es otro que facilitar la capacidad de transporte de oxígeno a través del torrente sanguíneo para mantener la  $PO_2$  en los distintos tejidos en unos valores lo más constantes posibles, evitando por ello —en la medida de lo posible— que descienda el consumo de oxígeno ( $VO_2$ ) (5).

### *Respuesta de la ventilación y sus consecuencias sobre el equilibrio ácido-base*

Una de las respuestas más importantes y características a la altura —sobre todo en las primeras fases— lo constituye el aumento de la ventilación (6, 7, 8), que provoca un aumento de la presión arterial de oxígeno ( $PaO_2$ ) y un descenso de la presión arterial de  $CO_2$  ( $PaCO_2$ ) (1).

La ventilación es estimulada tanto por el aumento del dióxido de carbono (hipercapnia) como por la hipoxia, si bien a nivel del mar el estímulo hipóxico es prácticamente inexistente (1). Con la exposición aguda a hipoxia se incrementa la ventilación (es lo que se conoce como *respuesta hiperventilatoria a la hipoxia*) de un modo lineal con respecto al descenso de la saturación arterial de oxígeno ( $SaO_2$ ), e hiperbólico con relación al descenso de la  $PaO_2$  (1). La disminución de la  $PaCO_2$  que se produce con la hiperventilación produce una reducción en los niveles circulantes de hidrogeniones con el consiguiente aumento en el pH sanguíneo (9). A su vez, esta situación de alcalosis respiratoria provoca un incremento de la excreción renal de bicarbonato. Como el bicarbonato constituye la principal sustancia *buffer* o tampón contra la acidosis láctica (10), durante las primeras fases de exposición a la hipoxia puede verse alterado el equilibrio ácido-base de la sangre.

Como citábamos anteriormente, el propósito de esta respuesta hiperventilatoria a la hipoxia —al igual que los otros tipos de respuestas— es incrementar el contenido de oxígeno en los alvéolos (11). Esta respuesta hiperventilatoria —que por cierto tiene lugar a expensas de un aumento en la frecuencia de las respiraciones más que en la profundidad de las mismas— está mediada tanto por los quimiorreceptores periféricos como por los centrales, y cambia considerablemente de unas personas a otras en función de la gran variabilidad individual que existe en la *quimiosensibilidad* a la hipoxia (1, 12). Así, los nativos de altura suelen tener una respuesta hiperventilatoria atenuada en comparación con los que nacen y viven en localidades situadas a nivel del mar (1). A este respecto, surgen dos preguntas interesantes. En primer lugar: ¿Qué tipo de respuesta es mejor desde el punto de vista del rendimiento: incrementada o atenuada? Por una parte, una respuesta incrementada a la hipoxia es beneficiosa para el rendimiento físico en altura pues provoca un desplazamiento hacia la izquierda de la curva de asociación-disociación de la hemoglobina, y un incremento de la  $PaO_2$  y de la  $SaO_2$  (2) Además, el incremento en el trabajo de los músculos respiratorios que se deriva de esta *hiperrespuesta* ventilatoria se compensaría con el citado beneficio en la oxigenación de la sangre. Por otra parte, este aumento en el trabajo de los músculos respiratorios supone un entrenamiento adicional para estos músculos del cual podría beneficiarse el atleta al retornar al nivel del mar. No obstante, también es cierto que la *hiporespuesta* caracterís-

tica de los nativos de las alturas no parece alterar su rendimiento en atmósferas hipóxicas —más bien al contrario— (2). Además estos sujetos son mucho menos susceptibles a padecer el mal de altura, incluso en alturas extremas. Presumiblemente, estos individuos habrían desarrollado otro tipo de adaptaciones (mayor capilarización pulmonar y en los tejidos, etc.) que compensarían con creces esta respuesta hiperventilatoria menos marcada (1). La segunda pregunta es la siguiente: ¿Cuál es el efecto del entrenamiento en altura sobre la respuesta hiperventilatoria a la hipoxia? Si bien Levine y colaboradores (13) mostraron cómo la respuesta hiperventilatoria a la hipoxia se puede hacer más marcada en individuos no entrenados tras un entrenamiento de 5 semanas a 2.500 m de altura, todavía no se ha estudiado a fondo esta cuestión en atletas de elite, ni sus posibles implicaciones en el posterior rendimiento a nivel del mar.

### *Respuesta cardiovascular*

Es bien sabido que con la exposición a una atmósfera hipóxica la frecuencia cardíaca aumenta tanto en reposo como durante el ejercicio, si bien ambas respuestas se atenúan con la aclimatación hasta hacerse comparables a aquéllas que se producen a nivel del mar (1, 14). A grandes alturas (por encima de 4.000 m) se reduce considerablemente la frecuencia cardíaca máxima (por ejemplo aproximadamente 120 lpm en la cima del Everest frente a 180-200 lpm a nivel del mar para un mismo sujeto) (15). Esta disminución de la frecuencia cardíaca máxima es un tanto sorprendente pues limita considerablemente el aporte de oxígeno a los músculos en una atmósfera tan hipóxica. No obstante, también podría constituir un mecanismo protector para defender al miocardio de los efectos nocivos de la hipoxia (1).

Por otra parte, la respuesta del volumen de eyección y del gasto cardíaco en los primeros días de aclimatación a altura muestran, para cualquier intensidad de esfuerzo, un descenso paralelo al de la frecuencia cardíaca (1). El descenso de estos tres parámetros sería posiblemente debido a una atenuación de la actividad simpático-adrenal con la altura (1). Al igual que ocurría en el caso de la frecuencia cardíaca, la respuesta del gasto cardíaco se normaliza en el tiempo con la aclimatación (15,16). Por último, la función de la bomba cardíaca (contractilidad, fracción de eyección, etc.) no parece alterarse, incluso a grandes alturas (8.000 m) (15).

La presión arterial sistémica en reposo de los humanos no se incrementa significativamente con la hipoxia, al contrario que en otros animales (1,17). Por otra parte, si bien la típica respuesta hipertensiva al ejercicio en el lecho arterial sistémico es más marcada en altura que a nivel del mar, en todo caso esta respuesta es mucho más leve que la que tiene lugar en las arterias pulmonares (18). En efecto, la hipertensión pulmonar es uno de los efectos más marcados y sorprendentes de la hipoxia, y conocido desde la primera mitad de siglo (19). Aunque la fisiopatología de este fenómeno no está todavía completamente aclarada, se postula la liberación de mediadores con efecto vasoconstrictor desde el propio tejido pulmonar sometido a la hipoxia (1). En todo caso, si bien se trata de una respuesta similar a aquella que

ocurre en el pulmón del feto antes del nacimiento (que desvía la sangre desde el *ductus* pulmonar a la circulación sistémica), no parece aportar beneficio fisiológico alguno al adulto sometido a la hipoxia de la altura (1). De hecho, muchos animales adaptados a la altura no muestran esta respuesta hipertensiva (20) que sí aparece en los humanos que han nacido y vivido en altura a lo largo de su vida (21). En efecto, produce una sobrecarga en el ventrículo derecho y puede ser el origen del temido edema de pulmón (1) que sufren algunos individuos en altura. Por último, esta sobrecarga en el ventrículo derecho —que no es necesariamente sinónimo de disfunción— puede hacerse manifiesta en el trazado electro cardiográfico tanto del que se expone a altura por primera vez como del sujeto adaptado durante años (22).

#### *Respuesta hormonal*

En general, parece que la respuesta del eje renina-angiotensina-aldosterona se atenúa en altura en comparación con lo que normalmente ocurre a nivel del mar (1). Por otra parte, la hipoxia induce un cierto aumento en los niveles del péptido atrial natriurético (23, 24), una hormona secretada fundamentalmente en las aurículas y que interviene en el mantenimiento del volumen plasmático a través de su acción estimuladora sobre la diuresis de sodio. Con respecto a la hormona antidiurética, el ejercicio *per se*, a menos en sujetos que no sufren el temido mal de altura. Cuando aparece esta patología, sí pueden estar aumentados los niveles de esta hormona (25), si bien no es menos cierto que esta respuesta tiende a normalizarse con la aclimatación a la altura (26). La respuesta del eje adrenal se hace más marcada con la exposición a hipoxia, reflejando la situación de estrés existente, mas la aclimatación, una vez más, atenúa esta respuesta (1).

#### *Respuesta del sistema nervioso central*

Todo alpinista con experiencia en coronar altas cumbres sabe que su rendimiento psicomotor (concentración, velocidad y destreza de los movimientos) tiende a disminuir en esa inhóspita atmósfera. Este fenómeno podría empezar a hacerse patente incluso a partir de alturas de tan sólo 1.500 m (27). Además, este deterioro en el rendimiento psicomotor (evaluado por ejemplo a través de test de memoria o de coordinación mano-ojo) puede perdurar hasta aproximadamente un año después de una expedición en altura (a 4.000 o más metros) (28, 29). Estos efectos serían la consecuencia únicamente de la hipoxia (y no de otros factores también existentes en las altas cumbres de nuestro planeta como el frío o la deshidratación), pues similares resultados han sido hallados en experimentos realizados en cámaras hipobáricas, en la llamada *Operación Everest II* (30).

Por otra parte, parece claramente demostrado que con la altura se produce una significativa pérdida de peso (achacable por ejemplo a un cierto grado de mal absor-

ción intestinal) y se instaura una situación de catabolismo muscular (31, 32, 33). Estos hechos, no obstante, se dan más bien a grandes alturas (a más de 5.000 m), muy por encima de aquellas (2.000-3.000 m) generalmente elegidas por las atletas para realizar concentraciones en altura, y en las cuales se centra preferentemente esta revisión.

### *Respuesta del tejido muscular*

Los enzimas aeróbicos y el contenido intramuscular de mioglobina se incrementan tras 3-4 semanas de ejercicio en hipoxia (equivalente a 2.300 m), como lo demuestra un estudio pionero del español Terrados y colaboradores (34) publicado a principios de esta década. En este estudio los sujetos entrenaron una extremidad inferior pedaleando en las citadas condiciones y durante el tiempo ya referido, mientras que la otra permanecía inactiva. Los autores hallaron un incremento significativo en la actividad del enzima citrato sintasa y de los niveles de mioglobina en la extremidad inferior entrenada. Así, el entrenamiento en altura reforzaría los efectos de por sí esperados en el músculo entrenado, y que van encaminados a mejorar la capacidad de extracción de oxígeno del tejido muscular.

Por otra parte, la capacidad *buffer* del músculo entrenado en altura podría aumentar (35), una adaptación muy importante para el rendimiento en deportes en los que el metabolismo anaeróbico juega un papel significativo.

### *Respuesta hematológica*

Probablemente el efecto fisiológico de la estancia en altura más conocido por todos —incluso a nivel popular— sea el incremento que se produce en la concentración de hemoglobina en la sangre de los humanos y otros animales. También es sobradamente conocido el mecanismo responsable de este hecho, que no es otro que el incremento de la liberación de eritropoyetina (EPO) endógena por la hipoxia, lo que a su vez estimula a la médula ósea a producir nuevos glóbulos rojos. De hecho, a lo largo del tiempo —enseguida veremos que se trata de un período de tiempo más largo que lo que muchos piensan— la exposición a altura produce un incremento en el número de glóbulos rojos que hace que la podamos considerar de hecho como una especie de «dopaje sanguíneo natural».

Desde el primer día de llegada a altura y durante los primeros días de aclimatación a esta nueva atmósfera, disminuye el volumen plasmático, con el consiguiente incremento del hematócrito (1, 2, 36). En efecto, es bien sabido que el citado incremento del hematócrito que se produce en esta primera fase se debe mayoritariamente a esta pérdida de volumen, más que a un aumento en la tasa de producción de glóbulos rojos mediada por la EPO endógena, pues se requieren más días (aproximadamente más de una semana) para que este último proceso se haga efectivo (1). Si bien es cierto que esta situación de hipovolemia relativa incrementa la capacidad de

transportar oxígeno de un volumen determinado de sangre, no es menos cierto que toda pérdida de volumen plasmático también tiene efectos negativos sobre el rendimiento, como por ejemplo el de aumentar el trabajo de la bomba cardíaca (2).

El aumento en la tasa de eritropoyesis se inicia también prácticamente desde el primer día de estancia en altura (37, 38), si bien, como ya sabemos, sus efectos reales —que se traducen en un aumento de la concentración de hemoglobina— tardan más tiempo en hacerse patentes (1), entre 4 y 7 días en promedio (39). Por otra parte, este aumento en la tasa de eritropoyesis es más marcado cuanto mayor es el grado de hipoxia —o lo que es lo mismo, cuanto mayor es la altura— (40). Algunos investigadores (41) sugieren que no se puede decir que se ha producido una adaptación hematológica completa hasta que el atleta que se ha desplazado a una altura de 2.000-3.000 m alcance unos niveles de hemoglobina comparables a los de aquellos que residen habitualmente en esa atmósfera. Así, teniendo en cuenta que con la exposición a altura moderada los niveles de hemoglobina vienen a aumentar en un 1% por semana, pueden ser necesarios hasta aproximadamente 3 meses de estancia en altura para que los no residentes alcancen niveles hematológicos similares a los de los residentes (40). Desde luego, 3 meses es un período de tiempo mucho más largo que el habitualmente empleado (2-3 semanas) en la mayoría de los estudios y por los atletas en las típicas concentraciones en altura, lo que nos hace sospechar que quizás los considerables aumentos en los niveles de hemoglobina hallados por algunos autores podrían reflejar en una gran medida una situación de hipovolemia más que un incremento significativo en la tasa de eritropoyesis.

*Variaciones inter-individuales en la respuesta hematológica a la altura.* Independientemente de lo que dicen los estudios científicos publicados hasta la fecha, y de un modo empírico, muchos entrenadores y deportistas saben de la gran variabilidad que existe en la respuesta al entrenamiento en altura, encontrando tanto a fervientes defensores como a importantes detractores. Es bien sabido, en efecto, que mientras que a algunos atletas el realizar entrenamiento en altura parece que les ayuda a mejorar su rendimiento, muchos otros refieren haber sufrido mucho más sus inconvenientes que sus ventajas, pudiendo incluso padecer un cierto grado de mal de altura incluso a una altura moderada. Quizás una parte de esta importante variabilidad que existe en la respuesta entre unos individuos y otros radique en la respuesta de sus variables hematológicas. En primer lugar, parece demostrado que una parte de esta variabilidad se debe a las diferentes reservas de hierro que existen en los organismos de los algunos deportistas, siendo deficientes antes de comenzar la estancia en altura en muchos de ellos (por ejemplo, en fondistas) (42). De todos modos, aún en el caso de administración preventiva de altas dosis de hierro a todos los atletas —hasta 400 mg/día de hierro elemental en algunos casos— durante las 6 semanas previas a la exposición a una altura moderada, todavía persiste una importante variabilidad en la respuesta de cada uno de ellos (43, 44). Esta variabilidad puede reflejarse por ejemplo en diferencias significativas en las mejoras en la marca en un test de 5.000 m o en los valores de  $VO_2$ max de dos atletas de nivel similar sometidos exactamente al mismo protocolo de entrenamiento en altura (43, 44). Así, un grupo

de investigadores norteamericanos (45) han publicado recientemente un estudio retrospectivo de datos recogidos de decenas de fondistas entrenados de ambos sexos y utilizados como sujetos en previas investigaciones en altura (2.500-3.000 m) con el fin de determinar qué mecanismo sería el responsable de la respuesta tan favorable a la altura en unos atletas (*responders*) que suelen mostrar una mejora en sus marcas y en su  $VO_2$ max tras una concentración durmiendo y/o entrenando en una atmósfera hipóxica y tan desfavorable en otros muchos (*non-responders*). Los autores hallaron que lo que diferenciaría a unos y otros sería, principalmente, la respuesta de la EPO endógena, cuyos niveles son significativamente más altos ya desde las primeras 30 horas de exposición a altura en aquellos con una mejor respuesta. Además, en éstos los niveles de EPO se mantienen elevados en sangre incluso después de dos semanas de estancia en altura, mientras que en aquellos con una respuesta desfavorable sus niveles en sangre son similares a nivel del mar o tras 2 semanas de estancia en altura. Por otra parte, en este tipo de atletas el rendimiento en entrenamientos de tipo interválico realizados en altura sería muy inferior al de aquellos que presentan una respuesta positiva, incluso para una misma condición física previa. Así, los autores sugieren la realización de un test sencillo y útil (tanto desde el punto de vista deportivo como económico), a modo de *screening*, para determinar si a un deportista (sobre todo fondista) le puede resultar beneficioso o no realizar concentraciones en altura. El test consistiría simplemente en medir sus niveles de EPO transcurridas las primeras 30 horas de estancia en altura. En el caso de ser bajos (lo cual podría indicar una baja sensibilidad de su médula ósea) no merecería la pena prolongar la concentración.

*Cambios hematológicos inducidos por la altura y rendimiento deportivo.* Por una parte, sabemos que diversos estudios han mostrado claramente cómo el incremento en los niveles de eritrocitos y de hemoglobina en sangre inducidos artificialmente mediante dopaje sanguíneo (v.g., infusión de eritrocitos de sangre autóloga) incrementa significativamente tanto el  $VO_2$ max como el rendimiento deportivo de los humanos (46, 47, 48, 49). En este sentido, las estancias en altura constituirían un método natural y lícito de alcanzar el mismo objetivo que el dopaje sanguíneo: incrementar la capacidad de transportar oxígeno de la sangre y con ello, el rendimiento deportivo. En primer lugar, no debemos olvidar que un incremento en el nivel de hematócrito no es necesariamente una garantía de un mejor rendimiento. De hecho, algunas poblaciones autóctonas de regiones situadas a gran altura en nuestro planeta no presentan unos valores de hemoglobina en sangre especialmente elevados, y no por ello dejan de mostrar una gran capacidad de trabajo físico en esa atmósfera hipóxica (1). Por ejemplo, en las expediciones de alpinistas bien preparados no suele existir una correlación clara entre el rendimiento escalando las grandes cumbres y la concentración de hemoglobina (1). Estos hechos llevaron a los fisiólogos Winslow y Monge a afirmar que una policitemia excesiva no aportaría beneficio fisiológico alguno, y constituiría más bien un fenómeno fortuito (50). Por último, en algunos estudios, los incrementos observados en valores hematológicos tras una estancia en altura no se acompañan de mejoras en el rendimiento ni en el  $VO_2$ max

(39). Y es que, una vez más, no olvidemos que estos cambios hematológicos (incremento del hematócrito, etc.) en muchas ocasiones son más el reflejo de una cierta situación de hemoconcentración que de un incremento real en la tasa de eritropoyesis.

De todos modos, cada vez parece más claro que un aumento en la concentración de hemoglobina contribuye a mejorar el rendimiento a nivel del mar en muchos deportes, por lo que un cierto grado de aumento ha de ser aún más beneficioso en atmósferas hipóxicas (1). Ya en la década de los sesenta Hansen (51) atribuía al recuento de glóbulos rojos y al nivel de hemoglobina un papel clave en el rendimiento deportivo a nivel del mar. En efecto, además de incrementar la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre, unos valores altos de recuento eritrocitario y de hemoglobina incrementan la capacidad *buffer* de la sangre (52). Esto nos lleva a hablar de cuáles son los valores hematológicos (v.g., hematócrito) ideales y cuáles son los valores normales (desde un punto de vista estadístico) en deportistas.

*Hematócrito y rendimiento. Valores normales en deportistas.* Generalmente se viene aceptando que los deportistas de fondo suelen presentar una *pseudo anemia fisiológica*, con unos niveles de hemoglobina y hematócrito más bien bajos que reflejarían no tanto una eritropoyesis ineficiente y/o una destrucción aumentada de eritrocitos (por ejemplo, por simple trauma mecánico en el caso de la carrera a pie) como simplemente una situación de hemodilución al poseer estos atletas un gran volumen sanguíneo. Así, por ejemplo, no sería anormal hallar valores de hematócrito cercanos al 40% en corredores de fondo varones. Sin embargo, los resultados de estudios más recientes con grandes poblaciones de atletas jóvenes señalan que los fondistas de elite pueden presentar unos niveles de hemoglobina y hematócrito más altos (del orden de aproximadamente 15 g/dl y 44% en promedio, respectivamente), mayores incluso que los de velocistas o lanzadores, por ejemplo (53). Esta tendencia a presentar unos valores hematológicos más altos en los fondistas estaría en parte determinada genéticamente, y podría contribuir a la predisposición de algunos jóvenes a dedicarse a deportes de resistencia (53).

Algunos profesionales del deporte (médicos, entrenadores, o los propios deportistas) asumen que, desde el punto de vista del rendimiento, el hematócrito «ideal» para deportistas de fondo (corredores, ciclistas, etc.) se situaría alrededor del 50% (o en todo caso ligeramente por debajo) (1). De todos modos, en el mundo del deporte de resistencia (y muy especialmente en el del ciclismo) se le otorga una importancia quizás excesiva a este parámetro como indicador del estado de forma y del potencial de rendimiento de un atleta, sobre todo después de la famosa medida de la Unión Ciclista Internacional (año 1997) de no permitir competir a todo ciclista con un valor de hematócrito superior a 50%, una medida encaminada a prevenir el abuso de EPO exógena y el subsecuente riesgo de accidentes tromboembólicos. A este respecto, debemos decir que, si bien es muy difícil sobrepasar este límite de un modo natural a lo largo de una prueba de tanto desgaste como una gran ronda por etapas (54), no es menos cierto que en toda población de deportistas de elite (ciclistas, triatletas, etc.) siempre puede existir un pequeño porcentaje de los mismos

(2-8%) cuyos valores de hematócrito sobrepasen de un modo natural el famoso punto de corte de 50%, sin riesgo alguno para su salud (53, 55, 56). Por último, conviene señalar que el hematócrito es un parámetro extremadamente variable, y por ello ha de ser considerado como orientativo, a pesar del protagonismo que ha adquirido en el mundo del deporte. En efecto, las mediciones pueden variar mucho —se han descrito fluctuaciones hasta del 20%— en base a factores tanto *in vivo* o biológicos (dieta previa, posición del paciente durante la extracción, uso o no de torniquete, hora del día, vena elegida, etc.) como *in vitro* (transporte, almacenamiento de las muestras, etc.), los cuales raramente son realmente controlados (al menos en el caso de los factores *in vivo*) (57, 58, 59).

## ENTRENAMIENTO EN ALTURA

### ¿Para qué entrenar en altura?

Numerosos atletas de elite (sobre todo en deportes de fondo) realizan estancias en altura de mayor o menor duración a lo largo de su carrera deportiva con el fin de mejorar su rendimiento a nivel del mar. En efecto, acabamos de mencionar que la estancia en altura produce diversos cambios fisiológicos similares a aquellos provocados por el entrenamiento de resistencia. Así, al menos teóricamente, el estrés hipóxico asociado a la estancia en altura reforzaría aún más los beneficios fisiológicos del entrenamiento en general (2). No obstante, y a pesar de esta atractiva hipótesis, existe una considerable controversia sobre los posibles beneficios del entrenamiento en altura sobre el posterior rendimiento a nivel del mar.

### Respuesta fisiológica al entrenamiento en altura en los diferentes deportes

#### *Deportes de resistencia*

Aquellos atletas con mayor capacidad aeróbica son aquellos que más sufren los efectos negativos de la exposición aguda a la hipoxia (pues sufren un mayor decremento de su  $VO_2\max$ ). En efecto, los atletas de resistencia mejor entrenados son aquellos que pueden someter a su sistema pulmonar a un mayor grado de estrés, aumentando por ello la posibilidad de sufrir alteraciones significativas en el intercambio de gases con la exposición aguda a la hipoxia (2). Diversos mecanismos han sido postulados como posibles causantes de un cierto grado de hipoxemia inducida por la exposición aguda a altura: cortocircuito o *shunt* arterio-venoso (63), desequilibrio ventilación/perfusión (60, 61), limitación de la difusión (62), o tasa de ventilación insuficiente (62). Con respecto a este último factor, algunos estudios han mostrado como, en comparación con otros individuos (v.g., personas sedentarias), los atletas de resistencia presentan una respuesta hiperventilatoria atenuada (18, 63, 64). Si bien parece que este tipo de respuesta confiere una ventaja al atleta de mediofondo

o fondo al reducir el coste energético de la respiración, por otra parte podría acentuar aún más la tendencia a la hipoxemia y desaturación en sangre arterial, lo que supondría un freno tanto a la aclimatación a la altura como a los hipotéticos beneficios del entrenamiento en altura (2).

### *Deportes de fuerza o de sprint*

Tan sólo algunos estudios han analizado los posibles efectos del entrenamiento en altura en deportes de fuerza o de tipo «explosivo», aquellos en los que predomina el metabolismo anaeróbico para la obtención de energía. Por un lado, parece que la fuerza muscular (v.g., fuerza isométrica de los músculos de la mano, o fuerza isométrica/isocinética de las extremidades o de los músculos de la espalda) no se altera con la hipoxia (65, 66). De un modo similar, el patrón de reclutamiento de fibras musculares no se altera con una estancia en altura de hasta 40 días de duración (67).

Por otra parte, la exposición aguda a hipoxia (3.000-5.000 m de altura) tampoco parece alterar el rendimiento en aquellos protocolos de ejercicio en los que predominan los sistemas anaeróbicos (láctico o aláctico) de obtención de energía, ya sea en ciclismo (v.g., test de Wingate) (68, 69) o en ejercicios de salto (70).

Tampoco conviene olvidar el hecho ya comentado de que la aclimatación a altura puede incrementar la capacidad *buffer* de los músculos ejercitantes, lo cual podría contribuir a mejorar la capacidad anaeróbica y *por ende* el rendimiento en deportes en los que esta cualidad juega un importante papel (71). A este respecto, debemos tener presente el hecho de que en el entrenamiento de los fondistas de elite, el metabolismo anaeróbico también juega un importante papel (en las típicas series *agónicas* a alta intensidad con poca recuperación entre las mismas, etc.). Así, por ejemplo, Mizuno y colaboradores (35) hallaron un incremento en la capacidad *buffer* en esquiadores de fondo tras un período de estancia y entrenamiento de dos semanas entre 2.100 y 2.700 m.

Es posible que el entrenamiento en altura mejore la coordinación en deportes explosivos o de fuerza (2). En efecto, parece que por encima de 2.700 m disminuyen tanto la eficiencia mental como la coordinación de los movimientos motores finos, como ya mencionábamos anteriormente. En este sentido, el entrenamiento en altura forzaría al deportista a «agudizar» las citadas cualidades, las cuales, teóricamente, mejorarían al regresar a nivel del mar. De todos modos, debemos considerar que el aire es menos denso en altitud, con la consiguiente alteración en la biomecánica de algunos deportes (v.g., pruebas de lanzamiento en atletismo, como la jabalina o el disco) (2).

## Entrenamiento en altura: Aplicaciones prácticas

La idea de que el entrenamiento en altura puede mejorar el rendimiento en atmósferas más cercanas a nivel del mar tiene su origen en dos hipótesis. En primer lugar, a ningún observador se le escapa la gran superioridad en pruebas de medio fondo y fondo de los atletas de países del África Oriental (Etiopía y Kenia, fundamentalmente), y que por tanto han nacido y vivido (y entrenado) durante toda su vida o al menos durante muchos años de la misma entre 1.500 y 2.000 m de altura. Así, en un esquema demasiado simplista, parece existir una correlación positiva entre entrenamiento en altura y éxito en deportes de resistencia. Por otra parte, es lógico pensar que con la hipoxia asociada a la altura se incrementa la concentración de hemoglobina circulante y en el hematócrito y con ello la capacidad de la sangre de transportar oxígeno. Este efecto se puede inducir artificialmente mediante dopaje sanguíneo (con transfusiones de sangre autóloga o con administración de EPO recombinante humana), con el consiguiente —y científicamente demostrado— incremento del rendimiento físico, sobre todo en deportes de resistencia.

En cuanto a la primera razón para entrenar en altura, hemos de decir que si bien parece que haber nacido y vivido en altura puede ser beneficioso en deportes de resistencia, los mecanismos fisiológicos responsables de este hecho todavía no son del todo claros. En todo caso, sí parece que los nativos de las alturas suelen presentar una mayor densidad de capilares en sus músculos (una adaptación que, dicho sea de paso, también se puede conseguir a nivel del mar con un adecuado entrenamiento aeróbico), una mayor capacidad de difusión pulmonar, y una mayor capacidad pulmonar en general (1).

La segunda hipótesis a favor del entrenamiento en altura (el incremento del hematócrito con la exposición a la hipoxia), suele constituir el principal motivo por lo que tantos atletas de todo el mundo realizan estancias más o menos largas en altura (72), como veíamos anteriormente. Hace ya más de tres décadas que Hansen (51) señalaba al aumento de los niveles de hemoglobina y de hematócrito como la principal adaptación beneficiosa al entrenamiento en altura. Los cambios hematológicos inducidos por la altura fueron analizados en profundidad en un apartado anterior.

Si bien es cierto que la hipoxia asociada a la altura estimula la liberación de EPO (la cual a su vez incrementa la producción de nuevos glóbulos rojos en la médula ósea) no es menos cierto que este proceso tiene lugar en meses más que en días. Es decir, que para que una estancia en altura produzca efectos realmente significativos en la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre, ha de ser de larga duración, y no de tan sólo 2-3 semanas como suele ser lo más frecuente. Además, recordemos que el llamativo incremento del hematócrito que acontece en los primeros días de estancia en altura no es sino el reflejo de la situación de hemoconcentración (reducción del volumen plasmático) que típicamente acontece en las primeras fases de adaptación. Por otra parte, esta pérdida de volumen plasmático podría ser parcialmente responsable de la reducción del gasto cardíaco máximo que tiene lugar al principio de la estancia en altura. Esta hemoconcentración desaparece a los pocos días de regreso a nivel del mar, y por consiguiente también vuelve a descender el

hematócrito (al menos en estancias cortas en las cuales su incremento se deba casi exclusivamente a este fenómeno de descenso del volumen plasmático).

#### *Otros beneficios del entrenamiento en altura*

El entrenamiento en altura podría incrementar la capacidad ventilatoria y la densidad capilar en los músculos entrenados. En primer lugar, el ejercicio en altura requiere un esfuerzo mucho mayor de los músculos respiratorios, como veíamos antes, con lo que estaríamos realizando un entrenamiento adicional de la capacidad respiratoria, con la consiguiente mejora de este parámetro. Por otra parte, el entrenamiento en condiciones de hipoxia mejoraría los efectos que ya de por sí ejerce el entrenamiento de resistencia sobre los músculos ejercitados (v.g., aumento de la capilarización o de su potencial aeróbico). Sin embargo, esta hipótesis no ha sido corroborada por trabajos en los que los sujetos entrenaban cada una de sus extremidades inferiores en condiciones de hipoxia o de normoxia (73).

#### *Inconvenientes del entrenamiento en altura*

El entrenamiento en altura presenta algunos inconvenientes. En primer lugar, no conviene olvidar el riesgo (pequeño, mas no inexistente) de desarrollar un cierto grado del temido mal de altura, si bien éste suele darse a alturas de 4.000 o más metros. De ocurrir, ello significaría en el mejor de los casos tener que interrumpir por completo la estancia en altura. En segundo lugar, la hipoxia produce una serie de limitaciones al rendimiento que ya hemos descrito (descenso del  $\dot{V}O_2$ max, aparición más temprana de la fatiga o pérdida de volumen plasmático) y que impiden al atleta de elite entrenar a la intensidad que demanda su alto nivel competitivo. Esto ocurre sobre todo en el entrenamiento interválico en altura de fondistas y más aún de mediofondistas, los cuales, a pesar de realizar un gran esfuerzo desde el punto de vista fisiológico (proporcionalmente mayor que a nivel del mar), podrían perder la sensación propioceptiva y/o neuromuscular de correr rápido o a ritmo de competición (v.g., series de 400 m en 60 s, etc.) por los condicionantes del estrés hipóxico. Esto podría limitar su posterior rendimiento en la competición a nivel del mar.

#### *El entrenamiento en altura convencional*

Nos vamos a referir en este apartado al entrenamiento en altura convencional: es decir, vivir y entrenar a una misma altura durante unas semanas (lo que se conoce también como *concentraciones en altura*) con el objeto de mejorar el rendimiento en competiciones que se suelen realizar a alturas inferiores, generalmente a nivel del mar (Olimpiadas, Campeonatos de Europa o del Mundo de Atletismo, etc.).

Hace ya tres décadas que el prestigioso fisiólogo escandinavo B. Saltin (74) se-

ñalaba que, para la mayoría de los atletas de alto nivel, el entrenamiento en altura requiere un esfuerzo adicional de suficiente magnitud que hace dudar de sus posibles beneficios. Así, un primer objetivo del entrenamiento en altura ha de ser buscar un lugar con una altura lo suficientemente moderada como para permitir al atleta trabajar a altas intensidades sin caer en fatiga prematuramente, pero a la vez lo suficientemente elevada como para que persista el estímulo hipóxico sobre la eritropoyesis. Con ambas condiciones en mente, una altura moderada, es decir, entre 2.200 y 3.500 m, sería la ideal (2). En efecto, el número de glóbulos rojos circulantes no aumenta significativamente hasta que la  $\text{PaO}_2$  no desciende por debajo de 65 mmHg (61), lo cual acontece generalmente entre 2.200 y 2.500 m de altura. Por debajo de esta altura, por tanto, no es fácil alcanzar las adaptaciones fisiológicas deseadas (v.g., aumento significativo del hematócrito). Por otra parte, por encima de los 3.500 m de altura, la mayoría de los deportistas suelen sufrir problemas físicos (comienzo de mal de altura), lo cual merma obviamente su capacidad para entrenar. A estos problemas de salud asociados a las grandes alturas hay que sumar el ya comentado descenso del  $\text{VO}_2\text{max}$ , que imposibilita prácticamente la realización de entrenamientos de calidad suficiente como para al menos mantener la condición aeróbica del atleta de elite.

En la mayoría de los casos, los entrenadores y atletas suelen elegir concentraciones entre 2.000 y 3.000 m de altura durante un período de 2 a 3 semanas de duración. Aún sin pruebas científicas concluyentes, muchos entrenadores coinciden en señalar que una concentración en altura de unas 3 semanas de duración es beneficiosa de cara al posterior rendimiento a nivel del mar.

### *¿Merece la pena entrenar en altura?*

Como casi siempre en el mundo de la Ciencia, no es fácil aportar respuestas rotundas y concluyentes. En efecto, son pocos los estudios bien diseñados (que hayan contado con un grupo control) que se han publicado al respecto. Este hecho, por otra parte, no debe sorprendernos en exceso dada la enorme dificultad que entraña el diseñar adecuadamente estudios de entrenamiento, con la gran cantidad de variables difíciles de controlar (homogeneidad en la condición física de todos los sujetos antes del protocolo de entrenamiento, disponibilidad de fechas, adecuación de los programas de entrenamiento, etc.).

Los primeros estudios (75, 76, 77), que datan ya de los años sesenta o de principios de los setenta, sí parecían demostrar beneficios en el entrenamiento en altura. Por ejemplo, los estudios de Faulkner y colaboradores (76) y de Dill y Adams (77) mostraban una mejora del  $\text{VO}_2\text{max}$  en corredores tras varias semanas de estancia en altura (entre aproximadamente 2.000 y 3.000 m). No obstante, el hecho de que ninguno de los estudios contase con un grupo control (entre otras limitaciones metodológicas) invalidan en gran medida sus hallazgos.

En cambio, la mayoría de los estudios, bien los realizados hace ya décadas (5, 73, 78, 79) como otros más recientes (39, 61) no muestran un aumento significati-

vo (en algunos casos, hasta una disminución) después de una estancia en altura en el  $VO_{2max}$  o en el rendimiento deportivo de atletas bien entrenados. Por ejemplo, un estudio bien controlado publicado por Adams y colaboradores (79) no demostró ventaja alguna de un protocolo *estándar* de entrenamiento en altura (3 semanas a 2.300 m) frente a uno de la misma duración realizado a nivel del mar en atletas de elite ( $VO_{2max} > 70$  ml/kg/min). Quizás la aportación más concluyente en contra de los posibles beneficios de vivir y entrenar en altura durante unas semanas sea la de las investigaciones del grupo de Levine (43, 44), las cuales muestran la ausencia de efectos beneficiosos de una estancia en altura (entre 2.500 y 3.000 m) de 4 semanas de duración sobre el posterior rendimiento a nivel del mar en atletas de fondo de buen nivel.

Así, al menos hasta la fecha, los estudios mejor diseñados no parecen mostrar las hipotéticas ventajas de realizar concentraciones en altura.

#### *De vuelta a nivel del mar: ¿Cuándo volver al nivel del mar antes de la competición?*

Una pregunta que se hacen muchos atletas y entrenadores que eligen realizar estancias en altura es cuándo (cuántos días antes de la competición) se debe regresar a la atmósfera normóxica (o casi normóxica) a la cual se va a realizar la competición. Para poder responder a esta pregunta (si es que hubiera respuesta), debemos analizar primero cuáles son los cambios fisiológicos que acontecen al regresar al nivel del mar, y sus posibles efectos sobre el rendimiento físico. Hay que tener en cuenta, en efecto, que cuando un atleta se traslada a un lugar de altura, es necesario un cierto período de tiempo tanto para aclimatarse a la nueva atmósfera como para poder entrenarse a una alta intensidad en este nuevo ambiente. Del mismo modo, es lógico pensar que los atletas también necesitan tiempo para «reaclimatarse» a una atmósfera normóxica y obtener su mejor rendimiento tras una concentración en altura.

Inmediatamente tras descender de una atmósfera hipóxica se inhibe la actividad de la EPO endógena y por tanto disminuye considerablemente la tasa de producción de glóbulos rojos (80, 81, 82). No obstante, conviene resaltar que los niveles de hemoglobina y el número de eritrocitos circulantes se mantienen todavía elevados (más que antes de la concentración en altura) durante aproximadamente los 10 primeros días de regreso a nivel del mar (12, 39). Aún así, desgraciadamente, el hecho de que los valores hematológicos se mantengan más altos durante unos días tras regresar a nivel del mar no se traduce necesariamente en un aumento del rendimiento ni del  $VO_{2max}$  inmediatamente tras descender al nivel del mar o durante las primeras dos semanas de haber regresado (39). En efecto, el citado hecho podría deberse a un mantenimiento de la situación de hemoconcentración (por pérdida de volumen plasmático) si bien en ninguno de los dos estudios citados (12, 39) los autores evaluaron los posibles cambios en el volumen plasmático. Por otra parte, algunos estudios han evaluado también variables hematológicas durante un período de hasta 4 meses después del regreso a nivel del mar, encontrando la posibilidad de la aparición

de un cierto grado de anemia reactiva en los meses de regreso a una atmósfera normóxica (83, 84). Esta posibilidad debe ser considerada pues el rendimiento deportivo podría disminuir tras unos meses de estancia en altura.

Algunos investigadores afirman que el máximo rendimiento se obtiene entre las dos y las cuatro semanas de regreso a nivel del mar tras una concentración en altura (85), sin aportar pruebas realmente científicas para tal hipótesis. Dos estudios ya muy antiguos no mostraban diferencia significativa alguna en el rendimiento deportivo ni en el  $VO_2$ max de deportistas a los pocos días de una estancia en altura o transcurridas varias semanas después de la misma (5, 76). De todos modos, en un estudio de la presente década, Trappe y colaboradores (86) mostraban cómo sería necesario dejar transcurrir hasta 2 semanas tras la *típica* concentración en altura (3 semanas a 2.000 m aproximadamente) para que se normalice por completo la cinética del  $VO_2$ .

Por tanto, una vez más, no existe una respuesta concluyente al respecto ni basada en datos científicos, si no más bien en las experiencias personales de atletas o entrenadores. A pesar de no constituir pruebas científicas, los testimonios personales de atletas y entrenadores también han de tenerse en consideración. Así, la mayoría de los atletas refieren sentirse algo débiles en los primeros días tras el regreso a la atmósfera habitual. Por ello, la mayoría de los defensores del entrenamiento en altura recomiendan un período de *readaptación* de al menos 2-3 días, y algunos incluso sugieren regresar a nivel del mar entre 14 y 21 días antes de la competición en cuestión (87).

## NUEVAS ALTERNATIVAS AL ENTRENAMIENTO EN ALTURA CONVENCIONAL

### Concentraciones repetidas en altura (a lo largo de una misma temporada)

Cómo señalábamos anteriormente, hasta la fecha no sabemos con certeza cuál es la duración ideal de las estancias en altura. Quizás por ello, algunos entrenadores —algunos de ellos de mucho prestigio, como el norteamericano J. Daniels— defienden la conveniencia de realizar repetidas concentraciones en altura (de por ejemplo 2-3 semanas de duración) a lo largo incluso de la misma temporada. Una vez más, todavía es necesaria una confirmación científica de este atractivo plan de trabajo. La única aproximación al respecto proviene de un trabajo publicado hace ya casi 30 años (88), en el cual seis corredores de muy alto nivel alternaban el entrenamiento a nivel del mar y a 2.300 m de altura durante un período de 11 días con el fin de combinar los beneficios hematológicos de la altura, por una parte, con el mantenimiento de una alta intensidad de trabajo en los entrenamientos realizados a nivel del mar, por otra. Si bien se obtuvieron resultados positivos, diversas variables no se controlaron (cambios en volumen plasmático, estado de forma de los sujetos antes del estudio, etc.).

## Vivir arriba y entrenar abajo

Como ya sabemos, el peso de la evidencia científica, hoy por hoy, no parece ir a favor de un aumento del rendimiento físico mediante estancias o concentraciones en altura moderada. Entre otras causas, quizás porque en altura se reduce considerablemente la intensidad de los entrenamientos y es necesaria una exposición larga (superior a 3 semanas) y a una altura relativamente elevada (superior a 2.500-3.000 m) si se pretende que los deseados efectos sobre la eritropoyesis sean realmente significativos y mínimamente duraderos.

No obstante, investigaciones recientes del grupo del norteamericano Levine (43, 89) sí parecen sugerir que una buena solución sería «entrenar abajo» (es decir, a nivel del mar o en todo caso a una altura de menos de 1,500 m) y «vivir arriba» (es decir, al menos a una altura moderada de 2,000-3,000 m). Por ejemplo, utilizando un ejemplo más cercano a nuestro país, sería algo así como vivir (al menos pernoctar) en el C.A.R. de Sierra Nevada y entrenar en Granada. Así, se combinarían las ventajas de vivir en altura (estímulo de la eritropoyesis) con las del entrenamiento a nivel del mar (entrenamientos realmente intensos necesarios para obtener el mejor rendimiento en deporte de elite). Y todo ello, evitando a la vez los inconvenientes del entrenamiento en altura (intensidad demasiado baja), por un parte, y los de vivir a nivel del mar o a una altura insuficiente (estímulo insuficiente sobre la eritropoyesis), por otra. En efecto, el grupo de Levine (43, 89, 90) ha demostrado recientemente cómo vivir a 2.500 m (al menos durante la mitad del día) y entrenar a una altura considerablemente menor (1.250 m) aumentaba el  $VO_2\max$ , el rendimiento deportivo (test en pista de 5.000 m lisos) e incluso el volumen sanguíneo (en unos 500 ml), en un grupo de atletas bien entrenados en comparación con un grupo control que vivía y entrenaba a 1.250 m. Entre otras, una limitación obvia de este estudio fue escoger una altura de 1.250 m en lugar de un enclave más cercano al nivel del mar. Por ello, serían necesarios nuevos estudios en este área.

## Hipoxia intermitente

En cualquier caso, el método de *vivir arriba y entrena abajo* no es fácil de aplicar ni accesible para la mayoría de los atletas, pues se requiere una infraestructura que no siempre está al alcance de todos, y un gran número de desplazamientos. Así, investigadores escandinavos (91, 92, 93) han sugerido recientemente la posibilidad de utilizar «casas de altura», en las que el atleta vive al menos 8 h al día en una atmósfera de *hipoxia normobárica* (a efectos fisiológicos, equivalente a la hipoxia hipobárica que hallamos en altura). Es decir, se trata de una exposición intermitente (de tan sólo unas horas al día) a la hipoxia característica de la atmósfera en altura. Este nuevo método consiste en «quitar» oxígeno a la atmósfera al introducir nitrógeno en mayor o menor cuantía (por ejemplo a través del sistema del aire acondicionado) (91). Aulin y colaboradores (91) han mostrado aumentos significativos en los niveles circulantes de EPO endógena en un grupo de atletas de resistencia tras 10

días de exposición intermitente a hipoxia normobárica (concentración de oxígeno de 14.9%, equivalente a una altura de 2.700 m), a razón de 10 h al día. De un modo similar, sendos estudios publicados por investigadores españoles muestran como la exposición intermitente a hipoxia hipobárica (462-369 mmHg, equivalente a 4.000-5.500 m) en cámaras hipobáricas a razón de tan sólo 3-5 horas diarias durante un total de dieciocho (94) o tan sólo nueve días consecutivos (95), en combinación con ejercicio de baja intensidad, incrementa significativamente la eritropoyesis y contribuye a mejorar la resistencia aeróbica en alpinistas de alto nivel.

De estos estudios se desprende la posibilidad real de utilizar la hipoxia intermitente como alternativa *in situ* (en el domicilio del propio atleta) a las concentraciones en altura o incluso al dopaje sanguíneo. De hecho, y a modo de anécdota, está ya disponible en el mercado algo así como la versión inversa o hipobárica de la *bolsa de Gamow* («*Gamow bag*») que se puede utilizar en la alta montaña como tratamiento efectivo del mal del atura (al someter al sujeto de inmediato a una atmósfera hiperbárica). Esta nueva bolsa, o mejor dicho, *cama de Gamow* («*Gamow bed*»), está recubierta de plexiglas y fibra de vidrio, consta de 79 cm de diámetro y aproximadamente 91 kg de peso, y se puede adquirir a un precio de 1,5 millones de pesetas, según la información disponible en Internet. Se podría utilizar para someterse durante las horas al día correspondientes al sueño a una atmósfera equivalente hasta incluso 5.500 m de altura. Según la prensa deportiva de nuestro país, este método lo habrían utilizado ya durante esta temporada ciclistas profesionales de renombre como Ivan Gotti o Richard Virenque, con el objetivo de incrementar sus niveles de hemoglobina sin necesidad de recurrir al dopaje sanguíneo. Su inventor, Igor Gamow, califica a este procedimiento como «legal y natural», conceptos éstos siempre subjetivos y discutibles, y en todo caso fuera de la óptica de esta revisión.

En suma, todos estos métodos novedosos reflejan la importancia que deportistas, entrenadores y médicos o fisiólogos del ejercicio otorgan a estimular el proceso de eritropoyesis, algo que, como sabemos, no es fácil conseguir con tan sólo 2-3 semanas a una altura moderada y compatible con el entrenamiento.

**BIBLIOGRAFÍA**

1. Milledge JS. High altitude. En: Oxford Textbook of Sports Medicine. Milledge JS (Ed.). Oxford University Press, Oxford 1996, 217-20.
2. Wolski LA, McKenzie DC, Wenger HA. Altitude training for improvements in sea level performance. Is there scientific evidence of benefit? Sports Med 1996;22:251-63.
3. Smith MH, Sharley BJ. Altitude training: who benefits? Physician Sports Med 1984;12:48-62.
4. Welch HG. Effects of hypoxia and hyperoxia. Exerc Sports Sci Rev 1987;15:192-221.
5. Burskirk ER, Kollias J, Akers RF, *et al.* Maximum performance at altitude and on return from altitude in conditioned runners. J Appl Physiol 1967;23:259-66.
6. Burki NK. Effects of acute exposure to high altitude on ventilatory drive and respiratory pattern. J Appl Physiol 1984;56:1027-31.
7. Hannon JP, Vogel JA. Oxygen transport during early altitude acclimatization: a perspective study. Eur J Appl Physiol 1977;36:285-97.
8. Huang SY, Alexander JK, Grover RF, *et al.* Increased metabolism contributes to increased resting ventilation at high altitude. Respir Physiol 1984;57:377-85.
9. Hansen JR, Stelter GP, Vogel JA. Arterial pyruvate, lactate, pH and PCO<sub>2</sub> during work at sea level and high altitude. J Appl Physiol 1967;24:523-30.
10. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. Bicarbonate buffering of lactic acid generated during exercise. J Appl Physiol 1986;60:472-8.
11. Schoene RB. Control of ventilation in climbers to extreme altitude. J Appl Physiol 1982;53:886-90.
12. Boutellier U, Deriaz D, di Prampero P, *et al.* Performance at altitude: effects of acclimatization and hematocrit with reference to training. Int J Sports Med 1990;2:S21-6.
13. Levine BD, Friedman DB, Engfred K, *et al.* The effect of normoxic or hypobaric hypoxic endurance training on the hypoxic ventilatory response. Med Sci Sports Exerc 1992;24:769-75.
14. Astrand P-O, Astrand I. Heart rate during muscular work in man exposed to prolonged hypoxia. J Appl Physiol 1958;13:75-80.
15. Reeves JT. Operation Everest II: preservation of cardiac function at extreme altitude. J Appl Physiol 1987;63:531-9.
16. Pugh LGCE. Cardiac output in muscular exercise at 5800 m (19000 ft). J Appl Physiol 1964;19:441-7.

17. Ward MP, Milledge JS, West JB. High Altitude Medicine and Physiology. Londres: Chapman and Hall Medical, 1989.
18. Houston CS, Sutton JR, Cymerman A, *et al.* Operation Everest II: man at extreme altitude. *J Appl Physiol* 1987;63:877-82.
19. Motley HL, Cournand A, Werko L, *et al.* Influence of short periods of induced anoxia upon pulmonary artery pressure in man. *Am J Physiol* 1947;150:315-20.
20. Harris P. Evolution, Hypoxia and High Altitude. En: Heath D (Ed.). *Aspects of Hypoxia*. Liverpool, Liverpool University Press, 1986;207-16.
21. Heath D, Williams DR. High Altitude Medicine and Pathology. Londres: Butterworth, 1989;102-14.
22. Milledge JS. Electrocardiographic changes at high altitude. *Br Heart J* 1963;25:291-8.
23. Milledge JS, Beeley JM, McArthur S, *et al.* Atrial natriuretic peptide, altitude and acute mountain sickness. *Clin Sc* 1989;77:509-14.
24. M.Bartsch P, Shaw S, Franciolli M, *et al.* Atrial natriuretic peptide in acute mountain sickness. *J Appl Physiol* 1988;65:1929-37.
25. Ward MP, Milledge JS, West JB. High Altitude Medicine and Physiology. Londres: Chapman and Hall Medical, 1989;293-5.
26. Blume FD, Boyer SJ, Braverman LE, *et al.* Impaired osmoregulation at high altitude: studies on Mt. Everest. *J Am Med Assoc (JAMA)* 1984;252:524-6.
27. Denison DM, Ledwith F, Poulton EC. Complex reaction times at simulated cabin altitudes of 5000 feet and 8000 feet. *Aerospace Med* 1966;57:1010-3.
28. Sharma VM, Malhotra MS, Baskaran AS. Variations in psychomotor efficiency during prolonged stay at high altitude. *Ergonomics* 1975;18:511-6.
29. Townes BD, Hornbein TF, Schoene RB, *et al.* Human cerebral function at extreme altitude. En: West JB, Lahri S (Eds.). *High Altitude and Man*. Bethesda: American Physiological Society, 1984:31-6.
30. Hornbein TF, Townes BD, Schoene RB, *et al.* The cost to the central nervous system of climbing to extremely high altitude. *New Engl J Med* 1989;321:1714-9.
31. Milledge JS. Arterial oxygen desaturation and intestinal absorption of xylose. *Br Med J* 1972;704:557-8.
32. Boyer SJ, Blume FD. Weight loss and changes in body composition at high altitude. *J Appl Physiol* 1984;57:1580-5.
33. Rennie MJ. Effects of acute hypoxia on forearm leucine metabolism. En Sutton JR, Houston CS, Jones NL (Eds.). *Hypoxia, Exercise and Altitude*. Nueva York: Liss, 1983;317-23.

34. Terrados N, Jansson E, Sylven C, *et al.* Is hypoxia a stimulus for synthesis of oxidative enzymes and myoglobin? *J Appl Physiol* 1990;68:2369-72.
35. Mizuno M, Juel C, Gro-Rasmussen T, *et al.* Limb skeletal muscle adaptation in athletes after training at altitude. *J Appl Physiol* 1990;68:496-502.
36. Jung RC, Dill DB, Horton R, *et al.* Effects of age on plasma aldosterone levels and hemoconcentration at altitude. *J Appl Physiol* 1971;31:593-7.
37. Abbrecht PH, Littell JK. Plasma erythropoietin in men and mice during acclimatization to different altitudes. *J Appl Physiol* 1972;32:54-8.
38. Milledge JS, Coates PM. Serum erythropoietin in humans at high altitude and its relation to plasma renin. *J Appl Physiol* 1985;59:360-4.
39. Klausen T, Mohr T, Ghisler U, *et al.* Maximal oxygen uptake and erythropoietic responses after training. *Eur J Appl Physiol* 1991;62:376-9.
40. Eckard K, Boutellier U, Kurtz A, *et al.* Rate of erythropoietin formation in humans in response to acute hypobaric hypoxia. *J Appl Physiol* 1989;66:1785-8.
41. Berglund B, Hemmingsson P. Effect of reinfusion of autologous blood on exercise performance in cross-country skiers. *Int J Sports Med* 1987;8:231-3.
42. Stray-Gundersen J, Alexander C, Hochstein A, *et al.* Failure of red cell volume to increase with altitude exposure in iron deficient runners (Abstract). *Med Sci Sports Exerc* 1992; 24:S90.
43. Levine BD, Stray-Gunderson J. «Living high-training low»: effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J Appl Physiol* 1997;83:102-12.
44. Stray-Gundersen J, Levine BD. «Living high-training high and low» is equivalent to «living high-training low» for sea level performance (Abstract). *Med Sci Sports Exerc* 1997;29:S136.
45. Chapman RF, Stray-Gundersen J, Levine BD. Individual variation in response to altitude training. *J Appl Physiol* 1998;85:1448-56.
46. Berglund B, Hemmingsson P. Effect of reinfusion of autologous blood on exercise performance in cross-country skiers. *Int J Sports Med* 1987;8:231-3.
47. Buick FJ, Gledhill N, Froses AB, *et al.* Effect of induced erythrocythemia on aerobic work capacity. *J Appl Physiol* 1980;48:636-42.
48. Williams MH, Wesseldine S, Somma T, *et al.* The effect of induced erythrocythemia upon 5-mile treadmill run time. *Med Sci Sports Exerc* 1981;13:169-75.
49. Thomson JM, Stone JA, Ginsburg AD, *et al.* O<sub>2</sub> transport during exercise following blood reinfusion. *J Appl Physiol* 1982;53:1213-9.

50. Winslow RM, Monge C. Hypoxia, Polycythemia and Chronic Mountain Sickness. Baltimore: The John Hopkins University Press, 1987;203.
51. Hansen JR, Vogel JA, Stelter GP, *et al.* Oxygen uptake in man during exhaustive work at sea level and high altitude. *J Appl Physiol* 1967;26:511-22.
52. Mairbaur H. Red blood cell function in hypoxia at altitude and exercise. *Int J Sports Med* 1994;15:51-63.
53. Marx JJM, Vergouwen PCJ. Packed-cell volume in elite athletes. *Lancet* 1998;352:451.
54. Saris WHM, Senden JMG, Brouns F. What is a normal red-blood cell mass for professional cyclists? *Lancet* 1998;352:1758.
55. Martin DT, Ashenden M, Pansotto R, *et al.* Blood testing for professional cyclists: what's a fair haematocrit limit? *Sportscience News* 1997.
56. O'Toole ML, Douglas PS, Douglas W, *et al.* Hematocrits of triathletes: is monitoring useful? *Med Sci Sports Exerc* 1999;31:372-7.
57. Solberg H, Gräsbeck R. Reference values. *Adv Clin Chem* 1989;27:1-79.
58. Leppänen E, Luisto M, Dugué B. Surgical patients with surprising laboratory data. *Br J Clin Pract* 1995;49:121-2.
59. Leppänen E, Dugué B. When to collect blood specimens. *Clin Chem* (en prensa).
60. Hannon JP, Shields JL, Harris CW. Effects of altitude acclimatization on blood composition of women. *J Appl Physiol* 1969;26:540-7.
61. Terrados N, Melinchna J, Sylven C, *et al.* Effect of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists. *Eur J Appl Physiol* 1988;57:203-9.
62. Raynaud J, Douget D, Legros P, *et al.* Time course of muscular blood metabolites during forearm rhythmic exercise in hypoxia. *J Appl Physiol* 1986;60:1203-8.
63. Astrand PO, Cuddy TE, Saltin B, *et al.* Cardiac output during submaximal and maximal work. *J Appl Physiol* 1964;19:268-72.
64. Gale GE, Torre-Bueno JR, Moon RE, *et al.* Ventilation-perfusion inequality in normal subjects during exercise at sea level and simulated altitude. *J Appl Physiol* 1985;58:978-88.
65. Bowie W, Cumming GR. Sustained handgrip-reproductibility; effects of hypoxia. *Med Sci Sports Exerc* 1980;12:330-5.
66. Young A, Wright J, Knapik J, *et al.* Skeletal muscle strength during exposure to hypobaric hypoxia. *Med Sci Sports Exerc* 1980;12:330-5.

67. Orizio D, Esposito F, Veicsteinas A. Effect of acclimatization to high altitude (5050 m) on motor unit activation pattern and muscle performance. *J Appl Physiol* 1994;77:2840-4.
68. Di Prampero PE, Mognoni P, Veicsteinas A. The effects of hypoxia on maximal anaerobic alactic power in man. En: Brendel W, Zink RA (Ed.). *High Altitude Physiology and Medicine*. New York: Springer-Verlag, 1982;88-93.
69. McLellan TM, Kavanagh MF, Jacobs I. The effect of hypoxia on performance during 30s or 45s supramaximal exercise. *Eur J Appl Physiol* 1990;60:155-61.
70. Ward MP, Milledge JS, West JB. *High Altitude Medicine and Physiology*. Philadelphia (PA): University of Pennsylvania Press; 1989.
71. Levine BD, Stray-Gundersen J. A Practical approach to altitude training: where to live and train for optimal performance enhancement. *Int J Sports Med* 1992;13:S209-S12.
72. Stray-Gundersen J, Alexander C, Hochstein A, *et al.* Failure of red cell volume to increase with altitude exposure in iron deficient runners (Abstract). *Med Sci Sports Exerc* 1992;24:S90.
73. Davies CTM, Sargeant AJ. Effects of hypoxic training on normoxic maximal aerobic power. *Eur J Appl Physiol* 1974;33:227-36.
74. Saltin B. Aerobic and anaerobic work capacity at an altitude of 2,250 m. En: Goddard (Ed.). *The International Symposium on the Effects of Altitude on Physical Performance*. Chicago: The Altitude Institute, 1967:97-102.
75. Balke B, Nagle J, Daniels J. Altitude and maximum performance in work and sports activity. *J Am Med Assoc (JAMA)* 1965;194:646-9.
76. Faulkner JA, Kollias J, Favour CB, *et al.* Maximum aerobic capacity and running performance at altitude. *J Appl Physiol* 1968;24:685-91.
77. Dill DB, Adams WC. Maximal oxygen uptake at sea level and at 3090m altitude in high school champion runners. *J Appl Physiol* 1971;30:854-9.
78. Roskamm H, Landry F, Samek LA, *et al.* Effects of a standardized ergometer training program at three different altitudes. *J Appl Physiol* 1969;27:840-7.
79. Adams WC, Bernauer EM, Dill DB, *et al.* Effects of equivalent sea level and altitude training on  $\dot{V}O_2$ max and running performance. *J Appl Sci* 1975;39:262-6.
80. Reynafarje C. Hematologic changes during rest and physical activity in man at high altitude. En: Weihe WH (Ed.). *The Physiological Effects of High Altitude*. Nueva York: Mac-Millan 1964:73-85.
81. Reynafarje C. Physiological patterns: hematological aspects. *Life at high altitudes*. Sci Publ 1996;140:32.

82. Heath D, Willimas DR. Man at High Altitude. Nueva York: Logman Group, 1977:45.
83. Haymes EM, Puhl JL, Temples TE. Training for cross-country skiing and iron status. *Med Sci Sports Exerc* 1986;18:162-7.
84. Reynafarje C, Lozano R, Valdivieso J. The polycythemia of high altitudes: iron metabolism and related aspects. *Blood* 1959;14:433-55.
85. Dick FW. Training at altitude in practise. *Int J Sports Med* 1992;13:S203-5.
86. Trappe T, Clem KL, Trappe SW, *et al.* Changes in O<sub>2</sub> kinetics as a result of moderate altitude training followed by sea-level re-exposure. *Med Sci Sports Exerc* 1993;24:S90.
87. Dick F. Relevance of altitude training. *Athletics Coach* 1979;4:11-4.
88. Daniels J, Oldridge N. The effects of alternate exposure to altitude and sea level on world-class middle-distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 1970;2:107-12.
89. Levine BD, Engfred K, Friedman D, *et al.* High altitude endurance training: effect on aerobic capacity and work performance. *Med Sci Sports Exerc* 1990;22:S35.
90. Levine BD, Roach RC, Houston CS. Work and training at altitude. En: Sutton JR, Coates G, Houston CS (Ed.). *Hypoxia and Mountain Medicine*. Vermont (USA): Queen City Printers, 1992:192-201.
91. Aulin KP, Svedenhag J, Wide L, *et al.* Short-term intermittent normobaric hypoxia -haematological, physiological and mental effects. *Scand J Med Sci Sports* 1998;8:132-7.
92. Rusko HK, Penttinen JTT, Koistinen PO, Vähäsöyrinki PI, Leppäluoto JO. A new solution to simulated altitude and simulate erythropoiesis at sea level in athletes. En: Viitasalo PO, Kujala TT (Eds). *The way to win. Proceedings of the International Congress on Applied Research in Sports*. The Finnish Society for Research in Sport and Physical Education 1995;141:287-9.
93. Rusko HK, Leppävuori A, Mäkelä M. Living high, training low: A new approach to altitude training at sea level in athletes. *Med Sci Sports Exerc* 1995;27: S6.
94. Casas N, Casas H, Pagés T, *et al.* Effect of intermittent exposure to hypobaric hypoxia and exercise on human physical performance. *J Physiol Biochem (Rev Esp Fisiol)* 1997;53:160.
95. Rodríguez FA, Casas H, Casas M, *et al.* Intermittent hypobaric hypoxia stimulates erythropoiesis and improves aerobic capacity. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31:264-8.