

Recibido: 15/3/17 Aceptado: 31/3/17

RESPUESTAS Y ADAPTACIONES RESPIRATORIAS ASOCIADAS AL ENTRENAMIENTO EN ALTURA

RESPIRATORY RESPONSES AND ADAPTATIONS ASSOCIATED WITH ALTITUDE TRAINING

Autor:

Chacón-Cuberos, R.; González Valero, G.; Espejo-Garcés, T.; Puertas-Molero, P.; Moreno-Arrebola, R.; Cachón-Zagalaz, J.

Institución:

Universidad de Granada
rchacon@ugr.es

Resumen:

El entrenamiento en hipoxia o altitud, caracterizado por una disminución del oxígeno disponible para el organismo, produce ciertas respuestas y adaptaciones fisiológicas que permiten mejorar el rendimiento deportivo. Las principales adaptaciones beneficiosas que genera el entrenamiento en altitud son la mejora en la composición corporal, incremento en la capacidad de esfuerzo por mejoras en los umbrales de lactato, mejoras hematológicas como aumento de la cantidad de hemoglobina o hematocrito, así como un incremento en el suministro de ATP. Abordando las respuestas y adaptaciones que produce el entrenamiento en altura en el sistema respiratorio, se ha observado que la exposición a situaciones de hipoxia produce un incremento de la respuesta ventilatoria, modificaciones en el intercambio de gas pulmonar, aumento del trabajo de los músculos implicados en la respiración o una disminución del consumo de oxígeno.

Palabras Clave:

Entrenamiento; Altitud; Hipoxia; Respuestas respiratorias; Adaptaciones respiratorias.

Abstract:

Training in hypoxia or altitude, characterized by a decrease in the oxygen available to the organism, produces certain physiological responses and adaptations that improve sports performance. The main beneficial adaptations generated by altitude training are the improvement in body composition, an increase in the capacity of effort for improvements in lactate thresholds, hematological improvements such as an increase in the amount of hemoglobin or hematocrit, as well as an increase in the supply of ATP. Approaching the responses and adaptations produced by height training in the respiratory system, it has been observed that exposure to hypoxia situations results in an increase in ventilatory response, changes in pulmonary gas exchange, increased workload of muscles involved in breathing or a decrease in oxygen consumption.

Key Words:

Training; Altitude; Hypoxia; Respiratory Responses; Respiratory Adaptations.

Introducción

El entrenamiento en altura hace referencia a aquella práctica mediante la cual los deportistas efectúan estancias o entrenamientos en zonas situadas, por lo general, a más de 2000 metros de altitud (Bishop & Girard, 2013; Chapman, 2013). Esto genera una situación de hipoxia (falta de oxígeno), así como una serie de respuestas y adaptaciones fisiológicas en el organismo que permiten un funcionamiento adecuado en estas condiciones; además de aumentar su rendimiento físico con respecto a nivel del mar a largo plazo (Ramos-Campo, Martínez, Esteban, Rubio-Arias, & Jiménez, 2016; Zinner, Hauser, Born, Wehrin, Homberg y Sperlich, 2015).

Durante el ejercicio en altura o situaciones de hipoxia, las demandas para el transporte de O₂ y CO₂ son muy exigentes. Esto hace que la capacidad de los músculos para recibir oxígeno exceda la habilidad de transporte de oxígeno del organismo (Pugliese, Serpiello, Millet, & La Torre, 2014). No obstante, el sistema pulmonar reúne los requisitos necesarios para regularse ante la realización de ejercicio de tal intensidad (Sheel, MacNutt, & Querido, 2010). En este trabajo de investigación se desarrollarán las principales respuestas y adaptaciones a nivel respiratorio, aunque para su explicación precisan de ciertas adaptaciones a nivel cardiovascular y hemodinámico. No obstante, y antes de comenzar con el contenido, resulta de interés mencionar los principales beneficios del entrenamiento en altura, sus fases y modalidades de entrenamiento.

De forma global, mencionamos algunas de las principales adaptaciones que produce el entrenamiento en altura:

Mejora de la composición corporal, implicando una disminución de la masa grasa y un aumento de la masa magra (Ramos-Campo, Rubio-Arias, & Jiménez, 2015).

Mejora del rendimiento aeróbico, a partir de mejoras en los umbrales de lactato, causando un incremento de la potencia generada y el esfuerzo

percibido en el umbral anaeróbico, y aumentando la eficacia del funcionamiento cardíaco en el umbral aeróbico (Ramos-Campo et al., 2016).

Mejoras de tipo cardiovascular, como es en el intervalo R-R (Bernardi, Passino, Serebrovskaya, Serebrovskaya, & Appenzeller, 2001)

Incremento de la cantidad de hemoglobina, además del hematocrito, glóbulos rojos y perfil férrico, traduciéndose en una mejora en el transporte y disponibilidad de O₂, y por tanto, el rendimiento deportivo (Garvican-Lewis, Halliday, Abbiss, Saunders, & Gore, 2015).

Incremento en el suministro de ATP. Estudios como el de Bishop & Girard (2013) revelan como el entrenamiento en altura supone importantes mejoras en los sistemas de energía anaeróbica, al aumentar el déficit máximo de oxígeno acumulado.

Tal y como se ha mencionado, el entrenamiento en altitud producirá una situación de hipoxia. El nivel de hipoxia dependerá de la altitud, ya que el nivel de oxígeno variará según la misma. Según Escrich, Solas, & Desola-Alá (2005), las fases o adaptaciones que se producirán en el sistema respiratorio por hipoxia o estancia en altitud serán:

Acomodación: Se produce al inicio de la exposición. El organismo se adapta ejecutando mecanismos que compensen el déficit de oxígeno, como es la hiperventilación y la taquicardia. En esta etapa no es recomendable práctica de actividad física intensa.

Aclimatación: Con el transcurso del tiempo se producen adaptaciones fisiológicas como la policitemia que hacen que un individuo se adapte a una estancia en altitud. En este momento resulta idóneo el entrenamiento en altitud.

Degradación: Consiste en una pérdida de masa magra por parte del individuo, así como un deterioro del organismo, por estancias en altitudes considerablemente elevadas (más de 5500 metros). No son recomendables para el entrenamiento.

Según Ramos-Campo, Martínez, Esteban, Rubio-Arias, & Jiménez (2016) existen tanto modelos tradicionales de entrenamiento en altura como entrenamientos intermitentes. Las prácticas tradicionales se basarán en vivir y entrenar en altura (LHTH), vivir a nivel del mar y entrenar en altura (LLTH), o bien, vivir en altura y entrenar a nivel del mar (LHTL). Por otro lado, el entrenamiento en hipoxia intermitente (IHT) se basará en un entrenamiento continuo o interválico en condiciones de hipoxia normobárica o hipobárica (Bernardi et al., 2001).

A continuación, se detallan las principales respuestas y adaptaciones que produce el entrenamiento en altura.

Respuesta ventilatoria y control ventilatorio

Cuando un individuo se encuentra en altitud, el aumento de la ventilación representa la respuesta fisiológica más inmediata (Escrich et al., 2005). En reposo, este estímulo es muy leve, de tal forma que durante el ejercicio en situaciones de hipoxia se debe mantener un nivel de ventilación más elevado, ya que se altera la demanda de intercambio de gases (necesidad de O₂). Por tanto, la ventilación se regula para que el rendimiento no se vea afectado (Chapman et al., 2013).

En este proceso, se produce hiperventilación con el fin de mitigar la limitación de oxígeno, lo que causa hipocapnia (disminución del CO₂ disuelto en sangre) y alcalosis (Chapman, 2013; Sheel et al., 2010). Esto es mediado por unos quimiosensores que detectan la presión parcial de oxígeno arterial que se encuentra en los cuerpos carotídeos. De este modo, la hipoxemia conduce a una mayor ventilación alveolar, denominada Respuesta Ventilatoria Hipóxica (RVH) (Chapman, 2013; Bernardi et al., 2001).

En este punto es importante destacar que esta situación de hiperventilación puede eliminar más CO₂ que el producido por los tejidos, lo que genera una disminución de la presión de CO₂ alveolar y arterial, produciendo concentración de hidrogeniones (alcalosis respiratoria). Esto

disminuye la ventilación, tendiendo a compensarse, normalizando la alcalosis y ventilación (Escrich et al., 2005).

Para concluir, Sheel et al. (2010) recuerdan que una RVH más alta actuará contra la desaturación en el ejercicio hipóxico, reduciendo la disminución del rendimiento asociado a la hipoxemia. De hecho, los deportistas que entrenan en altura presentan un 35% menos de RVH, además de mejor quimiosensibilidad, hiperpnea y districión de oxígeno.

Intercambio de gas pulmonar

El intercambio de gases a nivel pulmonar representará otra de las respuestas básicas que se producirán en el entrenamiento en altitud-hipoxia. En este sentido, Escrich et al. (2005) recuerdan que existe cierta controversia sobre las adaptaciones que produce el entrenamiento en altitud en la difusión de oxígeno entre el alveolo y el capilar pulmonar, ya que a grandes alturas la difusión es más lenta por la menor diferencia de presiones parciales de O₂ entre el aire alveolar y sangre venosa.

En altitud hay una disminución de la presión de O₂ en la conducción alveolar-capilar, lo que genera desaturación arterial (Chapman et al., 2013). De hecho, se produce una disminución de un 7-9% de la capacidad aeróbica máxima por cada 1000 metros de altitud. Además, como respuesta inmediata, la elevación del gasto cardiaco supone una disminución del tiempo de tránsito pulmonar, lo que aumenta la PA-a parcial de O₂. No obstante, una vez que el deportista se ha adaptado, el intercambio de gases mejora su rendimiento por una disminución del gasto cardiaco para una carga de trabajo concreta, lo que aumenta el tiempo para el tránsito en el capilar pulmonar, y por tanto, la oxigenación. Por tanto, los deportistas que entrenan en altitud poseen una mayor capacidad de difusión pulmonar. Este aumento proviene de una mayor capacidad de difusión de la membrana, aumento del volumen de la sangre capilar-pulmonar y volúmenes pulmonares totales mayores.

En este sentido, Sheel et al. (2010) estudia la aclimatación en altitud del deportista a corto plazo, obteniendo una disminución del VO₂Max y la

saturación arterial de O₂ en los primeros días, así como un aumento de la ventilación en un 40% y la presión alveolar-arterial un 150%. Después de 8 semanas de aclimatación, aumentó la presión parcial de O₂ y la saturación arterial de O₂, reduciendo la ventilación hasta un 12%. Al mejorar el intercambio de gases, disminuye el gasto cardiaco máximo por un mejor tiempo de tránsito capilar-pulmonar. En una línea similar, Zinner et al. (2015) estudian los efectos del entrenamiento hipóxico en la activación muscular y oxigenación. La saturación arterial de O₂ con recuperación hiperóxica fue mayor en las condiciones de hipoxia como de normoxia. El PO₂ se incrementó entre 2-3.5 veces al final de los periodos de recuperación hiperóxica siendo significativamente más alto.

Trabajo de los músculos de la respiración

Del mismo modo, es importante destacar que en situaciones de hipoxia hay una actividad adicional de los músculos respiratorios asociada al aumento de la ventilación, lo que es debido a que tienen que realizar un trabajo mayor. Según Sheel et al. (2010), para un volumen de oxígeno concreto, el trabajo implicado en la respiración es un 35-40% superior en situaciones de hipoxia comparado con el ejercicio realizado a nivel del mar. Esto además, ocasiona un aumento del requerimiento ventilatorio, pues lleva al deportista cerca del límite de ventilación. La limitación del flujo espirado provoca un trabajo adicional de los músculos respiratorios, distorsionando la pared torácica y aumentando el volumen pulmonar. Los músculos inspiratorios funcionan a longitudes más cortas, disminuyendo la presión intratorácica y aumentando el trabajo elástico de respiración (Chapman, 2013).

En una línea similar a lo expuesto, Verges, Bachasson y Wuyan (2010) estudian el efecto que producen las situaciones en hipoxia, incluidas aquellas que implican ejercicio, en la fatiga producida en los músculos respiratorios, concluyendo que las situaciones en hipoxia aumentan la fatigabilidad del diafragma y los músculos abdominales. Esto es debido a la situación de hiperpnea que genera el déficit de oxígeno, a lo que el organismo responde con un aumento de la ventilación por minuto, y por tanto, el trabajo invertido en esta

Chacón-Cuberos, R.; González Valero, G.; Espejo-Garcés, T.; Puertas-Molero, P.; 371 Moreno-Arrebola, R.; Cachón-Zagalaz, J. (2017). Respuestas y adaptaciones respiratorias asociadas al entrenamiento en altura. *Trances*, 9(supl 1):365-376.

hiperventilación. Si a este aumento del trabajo respiratorio producido por la hiperpnea se le une el trabajo realizado por los músculos del aparato locomotor al realizar ejercicio, aumentará significativamente más la fatiga de los músculos respiratorios ante la necesidad de aumentar la ventilación para reducir los metabolitos producidos en el ejercicio y aportar los nutrientes y oxígeno necesarios (Verges et al., 2010).

Consumo máximo de oxígeno (VO₂Max)

Existe una fuerte relación entre el consumo de oxígeno a nivel del mar y una disminución del mismo en sujetos entrenados en altitud con respecto a los entrenados a nivel del mar (Chapman, 2013). En sujetos entrenados en altitud se produce una disminución del consumo de oxígeno del 3.3% con respecto a los entrenados a nivel del mar. La explicación de este fenómeno reside a nivel pulmonar, pues hay una correlación negativa entre la saturación de oxígeno y la disminución del consumo máximo de oxígeno. Los individuos que son más capaces de mantener la saturación de oxígeno terminan siendo los que presentan una mayor caída en el consumo máximo de oxígeno.

Fundamentando las premisas expuestas, Publiese et al. (2014) comprueban en su estudio el efecto de 9 semanas consecutivas de entrenamiento, siendo las 3 intermedias en altura. Tal y como se muestra en el gráfico de la derecha, se produce una disminución importante del tiempo invertido en recorrer una distancia concreta, debido a una mejora del VO₂ Máx y la capacidad aeróbica. De hecho, establecen que esta mejora es significativa en el rendimiento. Estos mismos resultados son justificados por Garvican-Lewis et al. (2015), quienes observaron un aumento del rendimiento en deportistas que entrenaron en LHTH durante 3 semanas a 1800 m, principalmente debido a un aumento de la cantidad de hemoglobina. De hecho, revelan como incluso una altitud inferior a los 2000 metros produce efectos beneficiosos.

Conclusiones

El entrenamiento en hipoxia o altitud, caracterizado por una disminución del oxígeno disponible para el organismo, produce ciertas respuestas y

adaptaciones fisiológicas que permiten mejorar el rendimiento deportivo. Las principales adaptaciones beneficiosas que genera el entrenamiento en altitud son la mejora en la composición corporal, incremento en la capacidad de esfuerzo por mejoras en los umbrales de lactato, mejoras hematológicas como aumento de la cantidad de hemoglobina o hematocrito, así como un incremento en el suministro de ATP.

Abordando las respuestas y adaptaciones que produce el entrenamiento en altura en el sistema respiratorio, se ha observado que la exposición a situaciones de hipoxia produce un incremento de la respuesta ventilatoria. Esto es debido a la limitación de oxígeno existente, generando una hiperventilación para compensar dicho déficit. Asimismo, el intercambio de gas pulmonar representa otra de las principales respuestas del entrenamiento en altitud. En primeras exposiciones se produce desaturación arterial por la disminución de la presión de oxígeno, lo que disminuye el rendimiento del deportista. No obstante, una vez que este se ha adaptado, mejora el tránsito de gases en el capilar pulmonar, mejorando su rendimiento.

Por otro lado, el trabajo de los músculos de la respiración se ve incrementado, pues a la respuesta respiratoria que implica el ejercicio se le suma la respuesta inherente a una situación hipóxica. Los principales músculos que sufren la fatiga en este proceso son el diafragma y los abdominales. Finalmente, destacar el consumo de oxígeno como otra adaptación de gran interés sobre el entrenamiento en altitud. De hecho, se muestra que en aquellos deportistas que entrenan en altitud se produce una disminución del consumo de oxígeno por una correlación negativa entre la saturación de oxígeno y la disminución del consumo máximo.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bernardi, L., Passino, C., Serebrovskaya, Z., Serebrovskaya, T., & Appenzeller, O. (2001). Respiratory and cardiovascular adaptations to progressive

- hipoxia. *European Heart Journal*, 22(10), 879-886. doi: 10.1053/euhj.2000.2466.
- Bishop, D. J. & Girard, O. (2013). Determinants of team-sport performance: implications for altitude training by team-sport athletes. *British Journal of Sports Medicine*, 47, 17-21. doi: 10.1136/bjsports-2013-092950.
- Chapman, R. (2013). The individual response to training and competition at altitude. *British Journal of Sports Medicine*, 40, 40-44. doi: 10.1136/bjsports-2013-092837.
- Czuba, M., Maszczyk, A., Gerasimuk, D., Roczniok, R., Fidos-Czuba, O., Zajac, A., ..., & Langfort, J. (2014). The Effects of Hypobaric Hypoxia on Erythropoiesis, Maximal Oxygen Uptake and Energy Cost of Exercise Under Normoxia in Elite Biathletes. *Journal of Sports Science and Medicine*, 13, 912-920.
- Escrich, E., Solas, M., & Desola-Alá, J. (2005). Fisiología de la respiración en ambientes especiales. *Fisiología humana*, 3, 663-681.
- Garvican-Lewis, L. A., Halliday, I., Abbiss, C. R., Saunders, P. U., & Gore, C. J. (2015). Altitude Exposure at 1800 m Increases Haemoglobin Mass in Distance Runners. *Journal of Sports Science & Medicine*, 14(1), 413-417.
- Ofner, M., Wonisch, M., Frei, M., Gerhard, T., Domej, W., Kropfl, J. M., & Hofmann, P. (2014). Influence of Acute Normobaric Hypoxia on Physiological Variables and Lactate Turn Point Determination in Trained Men. *Journal of Sports Science & Medicine*, 13(4), 774-781.
- Pugliese, L., Serpiello, F. R., Millet, G., & La Torre, A. (2014). Training Diaries during Altitude Training Camp in Two Olympic Champions: An Observational Case Study. *Journal of Sports Science & Medicine*, 13(3), 666-672
- Ramos-Campo, D.J., Martínez, F., Esteban, P., Rubio-Arias, J.A., & Jiménez, J.F. (2016). Entrenamiento en hipoxia intermitente y rendimiento ciclista en triatletas. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte*, 16(61), 139-156. doi: 10.15366/rimcafd2016.61.011

- Ramos-Campo, D.J., Rubio-Arias, J.A., & Jiménez, J.F. (2015). Efectos sobre la composición corporal y la densidad mineral ósea de un programa de altitud simulada en triatletas. *Nutrición Hospitalaria*, 32(3), 1252-1260. doi: 10.3305/2Fnh.2015.32.3.9386.
- Sheel, W., MacNutt, M, & Querido, J. (2010). The pulmonary system during exercise in hipoxia and the cold. *Experimental Physiology*, 95(3), 422-430. doi: 10.1113/expphysiol.2009.047571.
- Verges, S., Bachasson, D., & Wuyam, B. (2010). Effect of acute hipoxia on respiratory muscle fatigue in healthy humans. *Respiratory Research*, 109(11), 1-9. doi: 10.1186/1465-9921-11-109.
- Zinner, C., Hauser, A., Born, D., Wehrin, J. P., Holmberg, H., Sperlich, B. (2015). Influence of Hypoxic Interval Training and Hyperoxic Recovery on Muscle Activation and Oxygenation in Connection with Double-Poling Exercise. *PLoS One*, 1-12. doi: 10.1371/journal.pone.0140616.

