

ADQUISICION DE LA ADAPTACION FISIOLÓGICA A LA ALTURA*

A.R. FRISANCHO

Centro de Crecimiento y Desarrollo Humano
Universidad de Michigan, Ann Arbor,
300 North Ingalls, Ann Arbor, MI 48109, USA.

RESUMEN

El stress de la baja presión del oxígeno presente en la altura requiere una respuesta conjunta del sistema cardiorrespiratorio. Por tanto las investigaciones de altura han estado dirigidas a determinar las características respiratorias, cardíacas y hematológicas de los visitantes y de los nativos de la altura. Durante los últimos años las investigaciones conducidas tanto en los Andes Americanos como en las Himalayas permiten determinar el proceso de adaptación fisiológica a la altura.

En esta presentación se hace una revisión de los estudios realizados en los Andes Americanos y los Himalayas con el propósito de demostrar que una adaptación completa desde el punto de vista funcional es adquirida durante el proceso de desarrollo y crecimiento. Se presenta, además, las diferencias que existen entre una adaptación adquirida durante el estado adulto y aquel producido durante el periodo de crecimiento, concluyendo con un esquema general acerca de los mecanismos que operan para una adaptación fisiológica a la altura.

Palabras Clave: Adaptación, Altura, Fisiología, Respiración, Hematología

Definición de Hipoxia: Es de conocimiento general de que hay una relación inversa entre la altura y la presión barométrica, de tal modo que en el Cusco situado a los 3400 metros sobre el nivel del mar, la presión barométrica ($P_b = 512$ mmHg) es 30% menos de la que existe en Lima ($P_b = 760$ mmHg). La reducción en la presión barométrica significa que la presión del oxígeno esté también reducida, lo cual se conoce como hipoxia (oxígeno con menor presión). Esto implica que el organismo en la altura respira aire que tiene menor presión y como la presión barométrica es la fuerza que permite a los gases pasar a través de un tejido; el que vive en la altura respira un aire y oxígeno que tiene poca fuerza para entrar a los pulmones, a la sangre y a las células. Pues bien, como el oxígeno es indispensable para la vida, el organismo para sobrevivir en la altura tiene que responder por medio de adaptaciones del sistema hematológico y cardiorrespiratorio. Durante los últimos años las investigaciones conducidas tanto en los Andes Americanos como en las Himalayas permiten determinar el proceso de adaptación fisiológica a la hipoxia de la altura.

En esta presentación, se revisarán los estudios

realizados en los Andes Americanos y las Himalayas con el propósito de demostrar de que una adaptación completa desde el punto de vista funcional es adquirida durante el proceso de desarrollo y crecimiento. Además se demarcarán las diferencias que existen entre una adaptación adquirida durante el estado adulto y el periodo de crecimiento.

Respuesta Respiratoria

Ventilación pulmonar: La principal respuesta a la hipoxia es el aumento en la ventilación pulmonar. Este aumento en el nativo del llano es hecho a través del incremento de la frecuencia de la respiración. Por ejemplo, la frecuencia puede subir de 12 respiraciones por minuto a 20 respiraciones por minuto. El objetivo fisiológico y positivo de este aumento en la ventilación es tratar de incrementar la presión del oxígeno a nivel de los pulmones y los alveolos. De otra parte el aumento de la ventilación tiene también un carácter negativo, ya que puede conducir a una pérdida excesiva de dióxido de carbono (CO_2) y producir alcalinidad respiratoria ($pH > 7.4$), lo cual puede traducirse en síntomas clínicos asociados con el soroche (o mal de altura). El aumento de la ventilación pulmonar en el nativo del llano continúa alto mientras viva en la altura, con la diferencia de que con el tiempo la

* Manuscrito elaborado por el autor para las II Jornadas Internacionales de Biopatología Andina.

frecuencia en la respiración tiende a disminuir pero la profundidad de la respiración (volumen tidal del pulmón) aumenta. Aunque esta clase de respiración conduce menos a la alcalinidad respiratoria no es suficiente como para compensar la hipoxia. De ahí, que el organismo para sobrevivir en la altura tiene que desarrollar cambios en el volumen pulmonar.

Volumen pulmonar: La capacidad vital del pulmón del nativo de la altura es un poco mayor que el del residente del llano. Además, el volumen pulmonar del nativo de altura está caracterizado por su mayor tamaño y especialmente por su expansión del volumen residual del pulmón. La expansión del pulmón no parece ser exclusividad del hombre andino, ya que los niños de la India o de Etiopía tienen una mayor capacidad vital que los del llano. Una pregunta importante es cómo el hombre de la altura adquiere un mayor volumen pulmonar, para lo cual se necesita estudiar el proceso de desarrollo.

Aspectos de desarrollo del pulmón: Estudios en los niños de los Andes indican que el crecimiento en la capacidad vital del pulmón es más rápido en los niños que crecen en la altura que en aquellos que crecen en el llano. Basado en el principio de que el organismo es más sensible a los efectos ambientales durante el periodo de crecimiento que durante el estado adulto, en 1972 realizamos una investigación en el Cusco. En este estudio participaron investigadores del Instituto de Biología Andina de la Facultad de Medicina de la Universidad San Marcos y de la Universidad de Cusco. Esta investigación incluyó 3 tipos de muestras: (a) 20 peruanos nativos de la altura (b) 20 peruanos nativos al nivel del mar pero aclimatados a la altura durante el periodo de crecimiento y (c) 10 norteamericanos nativos del llano y aclimatados a la altura durante el estado adulto. Los resultados indican que los peruanos nativos del llano pero que se aclimataron a la altura durante el periodo de crecimiento llegaron a tener una capacidad vital similar a la del hombre nativo de la altura, pero en cambio, el Norteamericano nativo del llano aclimatado durante el estado adulto tiene una menor capacidad vital que el nativo de la altura.

Varios estudios de niños andinos indican que el crecimiento en la capacidad vital del pulmón es más rápido en los niños que crecen en la altura que en aquellos que crecen en el llano. El proceso de crecimiento de la capacidad vital del pulmón por unidad de talla del hombre nativo de la altura es más rápido que el del europeo criado también

en la altura. Esta diferencia indica que la variabilidad en la capacidad pulmonar tiene tal vez orígenes genéticos pero hasta la fecha esta hipótesis no ha sido probada. De otra parte es posible que el desarrollo de la capacidad del pulmón sea más rápido si uno crece en la altura. Por ejemplo, los estudios realizados en el Cusco en 1972 indican que los peruanos nativos del llano pero que se aclimataron a la altura durante el periodo de crecimiento llegaron a tener una capacidad vital similar a la del hombre nativo de la altura, pero en cambio, el peruano nativo del llano aclimatado durante el estado adulto tiene una menor capacidad vital que el nativo de la altura.

Estos datos sugieren que el hecho de crecer en la altura implica un crecimiento rápido de la capacidad pulmonar. Por ejemplo, varios estudios experimentales hechos en ratas demuestran que los animales criados en la altura (3450 m) tienen un mayor volumen pulmonar y además este mayor volumen pulmonar está asociado con una mayor proliferación de unidades alveolares que aquellos criados a nivel del mar. Recientes investigaciones hechas en perros criados en la altura indican que el crecimiento en la altura resulta en una mayor capacidad pulmonar mientras que los perros criados en el nivel del mar tienen una menor capacidad pulmonar.

Capacidad de difusión del pulmón: Varios estudios hechos en nativos del llano aclimatados a la altura durante el estado adulto indican que no hay diferencias en la capacidad de difusión pulmonar cuando es comparado con grupos controles del llano. En cambio estudios hechos en el nativo de la altura indican que la capacidad de difusión pulmonar es mucho mayor que en la del nativo del llano. A propósito los estudios de Enrique Vargas realizados en La Paz, Bolivia indican que la mayor difusión pulmonar del nativo de la altura es evidente tanto en los niños como en los adultos.

En conclusión, las investigaciones realizadas en los Andes Sudamericanos y en los Himalayas indican que el crecimiento en la altura está asociado con un crecimiento más rápido del volumen pulmonar y mayor capacidad de difusión pulmonar. Sin embargo todavía no se sabe si existe una edad crítica para adquirir una mayor capacidad pulmonar.

Respuesta Hematológica

Una de las cualidades de la hemoglobina es que tiene 4 moléculas de hierro que le permite

atraer al oxígeno y es así que cuanto mayor es la cantidad de hemoglobina mayor es la combinación de oxígeno con hemoglobina. Es decir que una de las funciones principales de la hemoglobina es la de transportar oxígeno del pulmón a las células. Desde hace un siglo sabemos que la exposición a la altura conduce a una mayor producción de hemoglobina. Esta respuesta hematológica es una adaptación orientada a aumentar el transporte de oxígeno. Pero esta adaptación también tiene su aspecto negativo en el sentido de que la viscosidad de la sangre aumenta, lo cual implica un mayor trabajo para el corazón, ya que es el corazón que tiene que mover la sangre a través de todo sistema circulatorio. A pesar de este factor negativo, por ejemplo, la hemoglobina en nativos del llano que residen poco tiempo a los 4000 m. de altura o poblaciones que viven en las grandes alturas y centros mineros (Morococha, La Oroya, La Paz, Bolivia o Chile) fluctúa entre 17 a 22 g de hemoglobina y entre 6 a 8 millones de glóbulos rojos. En cambio, estudios hechos en los Himalayas sugieren que una mayor concentración de hemoglobina no es una característica general del hombre de la altura ya que los de los Himalayas tienden a tener menos de 18 g de hemoglobina y menos de 7 millones de glóbulos rojos. Hoy en día hay bastante controversia con respecto al origen de estas diferencias. Unos postulan que estas diferencias reflejan diferencias de carácter genético. Nosotros postulamos que las diferencias no son de carácter genético sino que están relacionados al tipo de muestra estudiado. El aumento de la hemoglobina con la altura es similar tanto en los Andes como en las Himalayas si las muestras son de origen rural. Las muestras andinas de las zonas mineras tienden a tener mayor hemoglobina que las no-mineras.

Capacidad Aeróbica

Significado de la capacidad aeróbica: El consumo de oxígeno durante el esfuerzo máximo es conocido como capacidad aeróbica. La capacidad aeróbica es uno de los mejores índices de adaptación a la baja presión barométrica de la altura, ya que para extraer una mayor cantidad de oxígeno se necesita poder ventilar bien, se necesita tener la capacidad de extraer oxígeno al aire que llega al pulmón; se necesita una cantidad apropiada de hemoglobina que permita transportar el oxígeno en la sangre y entregarlo a las células para su metabolismo. Por tanto, el individuo que consume más oxígeno que otro tiene un mejor funcionamiento respiratorio y cardio-vascular. De ahí que los atletas o personas activas tienen una mayor capacidad aeróbica que los sedentarios.

Reducción en la capacidad aeróbica: Es muy conocido que las personas del llano aún después de haber vivido y haberse aclimatado a la altura por mucho tiempo tienen la capacidad aeróbica menor que cuando estuvieron al nivel del mar. La capacidad aeróbica de los atletas disminuye a un ritmo de diez por ciento por cada 1000 m. de ascenso por encima de los 1500 m.

Adquisición de la capacidad aeróbica normal: Estudios hechos tanto en el Perú como en los Himalayas demuestran que los nativos en la altura tienen una capacidad aeróbica igual a los que se obtienen al nivel del mar. Entonces la pregunta obvia es cómo el nativo puede adquirir este nivel de adaptación. La capacidad aeróbica de los nativos del llano aclimatados a la altura durante el crecimiento fue similar a la del nativo de la altura. En cambio el nativo del llano ya sea peruano o norteamericano tiene una menor capacidad aeróbica que la del nativo de la altura. Tanto los nativos de la altura, como los aclimatados a la altura durante el crecimiento extraen una mayor cantidad de oxígeno pero lo hacen ventilando proporcionalmente una menor cantidad de aire que los aclimatados en la altura durante el estado adulto. Es decir, tanto en el hombre nativo de la altura como en el hombre aclimatado a la altura durante el crecimiento, la eficiencia de extracción de oxígeno es mejor. Una pregunta obvia es por qué mecanismos y por qué medios el crecer en la altura resulta en una mayor eficiencia respiratoria. Claro que ésta característica es implícitamente adaptativa.

Conclusiones

Usando como índice de adaptación funcional la capacidad aeróbica podemos concluir que el nativo de la altura y el nativo del llano aclimatado a la altura durante el crecimiento se ha adaptado en forma completa al medio hipóxico de la altura. En cambio el nativo del llano a pesar de haber vivido mucho tiempo en la altura llega a adquirir una adaptación parcial.

Tanto como en la aclimatación parcial, la adaptación completa depende en gran parte del aumento de la ventilación pulmonar y la respuesta hematológica indicado por el mayor aumento de hemoglobina. Estas respuestas a pesar de resultar en un mayor transporte de oxígeno y mayor circulación sanguínea no permiten al organismo extraer una cantidad de oxígeno igual a la del llano.

En cambio la aclimatación completa se basa en

una respuesta moderada del sistema hematológico y ventilatorio. Esta respuesta moderada se hace posible por el aumento de la capacidad de difusión pulmonar de oxígeno posiblemente facilitado por un mayor volumen residual del pulmón, adquirido durante el periodo de crecimiento y desarrollo. De esta manera entonces el nativo de la altura y el aclimatado a la altura durante el crecimiento pueden tener la misma capacidad aeróbica que los obtenidos en el llano. Estos hallazgos significan que los procesos adaptativos producidos en respuesta a la hipoxia de la altura desde el aspecto respiratorio conducen al desarrollo de un organismo más eficiente que el del llano.

SUMMARY

Taking into account the aerobic capacity, both HA natives (HAN) and sea level natives (SLN) acclimatized to HA during development have completely adapted to hypoxic environment of HA. Adult SL natives, regardless of the period of time living at HA, have developed only a partial adaptation.

During partial acclimatization, the process of adaptation depends on the increase of lung ventilation and hemoglobin. These responses produce higher oxygen transport and blood circulation but similar oxygen extraction than those described at SL.

During complete acclimatization, there are a moderate response of ventilatory and hematological systems. These moderate responses are the result of the increased lung capacity of oxygen which is facilitated by a higher residual lung volume which is acquired during growth and development to HA. HAN and the lowlander acclimatized to HA during growth and development have similar aerobic capacity than SLN.

REFERENCIAS

Beall CM, Brittenham GM, Macuaga F, and Barragan M. 1990. Variation in hemoglobin concentration among samples of high altitude natives in the Andes and the Himalayas. *Am J Hum Biol* 2: in press.

De Graff AC Jr, Grover RF, Hammond JW Jr, Miller JM, and Johnson RL, Jr. 1965. Pulmonary diffusing capacity in persons native to high altitude. *Clin Res* 13:74

Frisancho AR. 1975. Functional adaptation to high altitude hypoxia. *Science* 187:313-319

Frisancho AR. 1981. *Human Adaptation. A Functional Interpretation.* University of Michigan Press, Ann Arbor, MI

Frisancho AR. 1988. Origins of differences in hemoglobin concentration between Himalayan and Andean populations. *Respiration Physiology* 72:12-18

Frisancho AR. 1990. *Anthropometric standards for the assessment of growth and nutritional status.* Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.

Frisancho AR, Velásquez T, and Sanchez J. 1973. Influence of developmental adaptation on lung function at high altitude. *Hum Biol* 45:585-594

Frisancho AR, and L. Greksa 1989. Developmental responses in the acquisition of functional adaptation to high altitude. In: *Human Population Biology*, (eds M.A. Little and J.D. Haas, Oxford University Press, New York.

Frisancho AR, Velásquez T, and Sanchez J. 1975. Possible adaptive significance of small body size in the attainment of aerobic capacity among high altitude Quechua natives. In F. Johnston, E. Watts, and G. Lasker (eds), *Bio-social interrelations in population adaptation.* Chicago: Mouton

Greksa L.P. Spielvogel H, Paz-Zamora, M, and Cáceres, E. 1988. Effect of altitude on the lung function of high altitude residents of European ancestry. *Ann J. Phys Anthropol.* 75:77-85

Guleria JS, Pande JN, Dethi PK, and Roy SB (1971). Pulmonary diffusing capacity at high altitude. *J. Appl Physiol* 31:536-543

Hurtado, A. 1964. Animals in high altitudes: resident man. In: *Adaptation to the Environment*, D.B. DILL, E.F. Adolph and C.G. Wilbert (ed), *Handbook of Physiology*, Section 4, Washington, D.C. Amer. Physiol. Soc., 843-860.

Moore LG, Jahnigen D, Rounds SS, Reeves JT, and Grover RF. 1982a. Maternal hyperventilation helps preserve arterial oxygenation during high-altitude pregnancy. *J Appl Physiol: Respirat Environ Exercise Physiol* 52:690-694

Moore LG, Rounds SS, Jahnigen D, Grover RF, and Reeves JT. 1982b. Infant birth weight is related to maternal arterial oxygenation at high altitude. *J. Appl Physiol: Respirat Environ Exercise Physiol* 52:695-699

Santolaya RB, Lahiri S, Alfaro RT, and Schoene RB. 1989. Respiratory adaptation in the highest inhabitants and highest Sherpa mountaineers. *Resp Phys* 77:253-262

Vargas E, Beard J, Haas J, and Cudkowica L. 1982. Pulmonary diffusing capacity in young Andean Highland children. *Respiration* 43:330-335

Velásquez T. and Florentini E. 1966. Maxima capacidad de difusión del pulmón en nativos de la altura. *Archivos del Instituto Biología Andina* 1:179-187