

Efecto de la altitud sobre el flujo espiratorio máximo

Alicia Rojas González*

José Pérez Neria‡

Palabras clave: Espirometría, fisiología pulmonar, alpinismo, flujo espiratorio máximo, adaptación a la altitud.

Key words: Spirometry, pulmonary physiology, alpinism, peak expiratory flow, high altitude adaptation.

RESUMEN

El flujo espiratorio máximo aumenta en personas sanas a medida que ascienden sobre el nivel del mar. Hay discrepancia en cuanto a la explicación de este fenómeno, la más viable se fundamenta en la ecuación del flujo laminar de Poiseuille en la cual el valor de la densidad del aire está en el denominador. Por otra parte, también discrepan los resultados espirométricos obtenidos por diversos autores. Nosotros consideramos que además, este comportamiento responde a un factor biológico-dependiente y la oportunidad para investigar esta hipótesis se presentó cuando la Asociación Alpina de México, A.C. realizó con éxito la ascensión al Broad Peak, en el Himalaya, a 8,047 metros sobre el nivel del mar.

Material y métodos: A un integrante de esta expedición se le proporcionó un espirómetro portátil Mini Wright, para que durante el ascenso y el descenso, registrara su flujo espiratorio máximo a diferentes altitudes sobre el nivel del mar.

Resultados: El flujo espiratorio máximo se incrementó a partir de la medición en la ciudad de México hasta su valor más alto en el campamento situado aproximadamente a 5,100 metros sobre el nivel del mar. Entre este punto y la cumbre de la montaña, a 8,047 metros sobre el nivel del mar, el

flujo espiratorio máximo ya no se incrementó. Durante el descenso, el comportamiento fue en espejo, ya que se mantuvo relativamente estable hasta descender al campamento situado a 5,100 metros sobre el nivel del mar a partir del cual el flujo espiratorio máximo disminuyó gradualmente. **Discusión y conclusiones:** Hasta cierta altitud, el flujo espiratorio máximo es influenciado principalmente por la densidad del aire, pero cuando se realiza la espiración forzada a más de 5,000 metros sobre el nivel del mar, es probable que la disminución de la presión inspirada de oxígeno limite su ejecución, probablemente por que no se alcanza a cubrir el requerimiento apropiado de energía para realizar el esfuerzo implícito en la maniobra.

ABSTRACT

Peak Expiratory Flow in healthy people increases proportionally to the altitude above sea level. The explanation for this phenomenon is controversial, but the most accepted is based on the Poiseuille equation of laminar flow, where air density appears in the denominator. On the other hand, spirometric results obtained by several authors also differ. We consider that the phenomenon must have a biologically dependent factor, and the opportunity to investigate this hypothesis appeared when the Asociación alpina de México successfully climbed the Broad Peak of the Himalayas, which is 8047 m above sea level.

Material and methods. A member of this expedition was equipped with a portable, fixed orifice spirometer in order to self-measure his Peak Expiratory Flow (PEF) at different altitudes above sea

* Departamento de Fisiología, INER.

‡ Departamento de Investigación en Salud Ambiental y Fisiología, INER.

level. Results: PEF increased from the measurement obtained in Mexico City, to its maximum value at the camp, 5100 m above sea level. Between this point and the summit, 8047 m above sea level, PEF no longer increased. During the descent, the PEF mirrored the ascending behavior, since it showed no important changes until the camp at 5100 m above sea level, after which it gradually decreased.

Discussion and conclusions. Up to 5000 m above sea level, PEF is influenced by gas density, but above this altitude, the low partial pressure of inspired oxygen probably limits the PEF, because the energy requirement for this maneuver is not covered.

ANTECEDENTES

En la República Mexicana existen varias localidades con importantes núcleos de población, situadas a más de 2,000 metros sobre el nivel del mar (msnm)¹. Consideramos que este reporte será útil a los neumólogos, especialmente quienes manejan pacientes asmáticos que utilizan espirómetros portátiles para su control, que practican alpinismo o simplemente que radican en poblaciones situadas en altitudes significativas sobre el nivel del mar.

En México existen varias agrupaciones que practican el alpinismo, entre ellas la Asociación Alpina de México, A.C., la cual decidió enviar una expedición a la cumbre Broad Peak en la cordillera Karakorum del Himalaya.

El Karakorum es una cadena montañosa originaria del periodo terciario ubicada en Asia Central y que se extiende al norte de Cachemira y de la India, entre el Valle del Indo y el Turquestán Chino. El Karakorum alcanza sus mayores altitudes en el Monte K2 a 8,611 msnm y en el Broad Peak a 8,047 msnm.

El Broad Peak tiene tres cumbres y está localizado en la República de Pakistán sobre el glaciar Godwin Austen, al sureste del Monte K2. Sus altitudes medidas fotogramétricamente son: 8,047 msnm, para la cumbre Sur, 8,016 msnm para la cumbre Central y 7,500 msnm para la cumbre Norte.

Su nombre en lengua balti es Flacham Ri. Martin Conway la nombró Broad Peak en 1892, nombre que ha sido aceptado por todos los gobiernos incluyendo India y Pakistán.

La Asociación Alpina de México, A.C., obtuvo el permiso reglamentario del Ministerio de Cultura y Turismo del Gobierno de Pakistán para realizar la expedición a la cumbre Sur del Broad Peak la cual se integró con 11 alpinistas mexicanos. Se planeó el ascenso tipo clásico, es decir, empleando campamentos y sin oxígeno complementario. Apoyaron la expedición 45 porteadores, un cocinero, dos correos, un sardar y un oficial de enlace.

El grupo de alpinistas solicitó al Departamento de Fisiología del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias (INER) de México que se practicara valoración funcional pulmonar a los integrantes de la expedición como parte de su preparación y, la autora de este reporte

consideró útil aprovechar el ascenso de un alpinista del grupo a más de 8,000 metros de altitud para investigar el comportamiento del flujo espiratorio máximo a medida que se incrementa la elevación sobre el nivel del mar, pues existe el antecedente de que en la ciudad de Denver², Ciudad de México³⁻⁶ y en el Campamento Base de la expedición británica al Everest de 1994⁷, situadas a 1,600, 2,240 y 5,300 msnm respectivamente, los valores ideales de referencia para los flujos espiratorios forzados son superiores a los de sujetos sanos correspondientes en edad, sexo y somatometría, registrados al nivel del mar.

Por lo tanto, el flujo espiratorio forzado aumenta en personas sanas a medida que ascienden sobre el nivel del mar. Hay discrepancia en cuanto a la explicación de este fenómeno, la más viable se fundamenta en la ecuación del flujo laminar de Poiseuille en la cual el valor de la densidad del aire aparece en el denominador. Por otra parte, también discrepan los resultados obtenidos por diversos autores, tanto en altitudes reales como en cámaras hipobáricas⁸⁻¹⁰. Nosotros consideramos que además del factor densidad del gas, este comportamiento también responde a un factor biológico-dependiente y la oportunidad para investigar esta hipótesis se presentó cuando la Asociación Alpina de México, A.C., realizó con éxito la ascensión al Broad Peak a 8,047 msnm.

Se solicitó al alpinista designado para escalar la cumbre que llevara consigo un espirómetro, para que durante el ascenso y el descenso entre los campamentos y la cumbre registrara su Flujo Espiratorio Máximo (PEF).

MATERIAL Y MÉTODOS

Entre los integrantes de la expedición de la Asociación Alpina de México, A.C. al Broad Peak, se seleccionó a un alpinista (Sergio Zambrano García) para que transportara un espirómetro Mini Wright*, de orificio fijo. El espirómetro fue verificado calibrándolo antes y después de la expedición mediante el flujómetro certificado que se utiliza en el Departamento de Fisiología del INER. Se instruyó y capacitó al alpinista en el manejo del mismo y sobre el procedimiento para realizar una espiración forzada satisfactoria. Se le solicitó que registrara su mejor PEF, expresado en L/seg, seleccionando el mayor de tres esfuerzos espiratorios satisfactorios y consecutivos. Se le indicó que realizara la medición en la Ciudad de México y posteriormente en cada uno de los cuatro campamentos programados para el ascenso y el descenso entre Skardu, Pakistán y la cima del Broad Peak. De esta manera, durante el ascenso, se obtuvieron siete mediciones, la de la Ciudad de México (2,240 msnm), la de Skardu, (3,520 msnm), campamentos A (\approx 4,300 msnm), B (\approx 5,100 msnm), C (\approx 5,900 msnm), D (\approx 7,240 msnm) y la cumbre del Broad Peak (8,047 msnm). De la misma manera, se le solicitó que registrara las

* Mini Wright Peak Flow Meter PF-239, Armstrong Industries, Inc., Northbrook, ILL, USA.

Tabla 1. Flujo Espiratorio Máximo (PEF) a diferentes altitudes.

Altitud (msnm)	Etapas	PEF (L/s) alpinista	PEF (L/s) calculado*	PEF (L/s) calculado‡
0			7.6	7.6
2,240	ascenso	9.7	9.7	10.9
3,520	ascenso	10.5	10.9	12.3
~4,300	ascenso	11.4	11.6	13.8
~5,100	ascenso	12.1	12.3	15.0
~5,900	ascenso	11.9	13.1	15.2
~7,240	ascenso	11.8	14.3	15.5
8,047	cima	11.7	15.1	15.6
~7,240	descenso	11.9		
~5,900	descenso	11.6		
~5,100	descenso	12		
~4,300	descenso	10.8		
3,520	descenso	9.8		
2,240	descenso	9.1		
0				

* Extrapolación de la ecuación de Poiseuille a partir del PEF experimental a 2,240 msnm.

‡ Valores experimentales corregidos por el factor de Thomas.

mediciones en los mismos puntos durante el descenso y en el regreso a la Ciudad de México.

RESULTADOS

En la Tabla 1 y en la Figura 1, se muestran los valores de las determinaciones del PEF registradas durante el ascenso y el descenso, a las diferentes altitudes sobre el nivel del mar.

A medida que el alpinista realizaba el ascenso su PEF aumentó progresivamente hasta el campamento situado aproximadamente a 5,100 msnm. Sin embargo, a partir de esta altitud y hasta alcanzar la cumbre a 8,047 msnm el PEF disminuyó ligeramente. Se podría considerar que, para fines prácticos se estabilizó en una especie de meseta. Durante el descenso se observó un comportamiento en espejo del PEF.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Si el PEF dependiera exclusivamente de la densidad del aire, esperaríamos que debido a la progresiva disminución de él y a medida que se asciende sobre el nivel del mar, el flujo espiratorio debería aumentar en proporción inversa hasta alcanzar su máximo en la cima del Broad Peak, de acuerdo a la ecuación de Poiseuille:

$$\dot{V} = \frac{P(P_1 - P_2) \cdot r^4}{8Lh}$$

En la cual, h es la densidad del fluido, $P_1 - P_2$ es el gradiente de presión entre el inicio y final del conducto, L es su longitud y r su radio.

En la Figura 1, los datos experimentales están señalados con círculos claros durante el ascenso (o), un triángulo en la

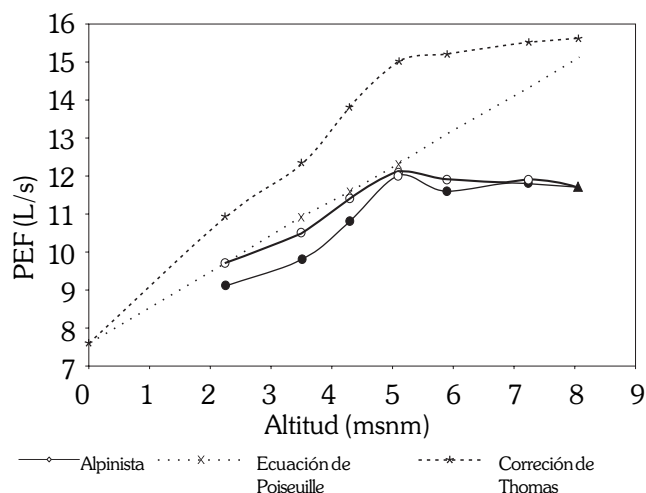
cumbre (Δ) y círculos sólidos (\bullet) en el descenso. Como se observa, el PEF aumentó hasta el último campamento antes del trabajo de montaña, y entre este sitio y la cumbre ya no se incrementó, inclusive se observa una leve disminución de este parámetro.

Con el propósito de comparar en forma gráfica los valores experimentales obtenidos por el alpinista, con los calculados empleando la ecuación de Poiseuille, agregamos estos últimos en la Figura 1, señalándolos con una línea discontinua. Estos valores se calcularon y extrapolaron a partir del PEF experimental, obtenido a la altitud de la ciudad de México, es decir 9.7 L/s.

Por otra parte, con línea de puntos señalamos (en la misma Figura 1), los valores experimentales que obtuvimos, corregidos de acuerdo con la proposición de Thomas¹¹, quien recomienda añadir 6.6% al valor obtenido con el Mini Wright por cada disminución en 100 mmHg de la presión atmosférica.

La pérdida de la relación del PEF con la altitud a partir de aproximadamente 5,000 msnm, posiblemente pueda explicarse si nos referimos a los estudios realizados por West, en 1983¹² en miembros de una expedición al Everest, en quienes determinó el consumo de oxígeno durante el ejercicio físico a diferentes altitudes y encontró que a medida que se incrementaba la altitud, el consumo máximo de oxígeno ($\dot{V}O_{2max}$) disminuye, de tal manera que a 8,260 msnm el $\dot{V}O_{2max}$ se limitó a 1 L/min, es decir apenas cuatro veces el correspondiente al de reposo en un adulto. Es muy probable que por esta razón los esfuerzos musculares invertidos en la locomoción y el trabajo respiratorio, consuman la mayor parte de la energía disponible en esas condiciones de baja presión inspirada de oxígeno^{13,14} modificando los parámetros ventilatorio y metabólico, limitando la energía que requiere la realización de la espiración forzada y consecuentemente interfiriendo con la magnitud del PEF.

Otros factores que intervienen en los cambios del PEF con la altitud, son las variaciones de la temperatura y la

**Figura 1.** Flujo Espiratorio Máximo (PEF) de un alpinista a diferentes altitudes.

humedad, y no tanto por su efecto en el funcionamiento del espirómetro, sino por que pueden modificar la resistencia de las vías aéreas. Sin embargo, en el presente estudio no fue posible que controláramos estos factores.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración de la Asociación Alpina de México, A.C. y en especial la del jefe de la Expedición, Ing. Antonio Cortés Avila y la del subjefe Sergio Zambrano García.

REFERENCIAS

1. Lizardi-García D, Pérez-Padilla R. *Las altitudes sobre el nivel del mar en México: Principales poblaciones, carreteras, vías férreas, montañas y viajes aéreos. Guía para los neumólogos y sus pacientes.* Neumol Cir Torax 1993; 52: 7-14.
2. Leighton LA, Willcox ML, Silliman J, Blount GB. *The pulmonary physiology of normal individuals living at an altitude of one mile.* J Clin Invest 1953; 32: 490-496.
3. Siller H, Pérez-Neria J. *Espirometría cronometrada en niños normales de la ciudad de México.* Rev Mex Ped 1971;40:169-174.
4. Namihira D, Strobe GL, Helms RW, Pekow P, Muñoz-Bojalil B, Fernández F. *A study of spirometry in children from Mexico City.* Pediatr Pulmonol 1986; 2: 337-343.
5. Muñoz-Bojalil B, De la Fuente-Zuno E, Heredia-Márquez A, Adalid-Diez de Urdanivia CM. *Estudio espirométrico en niños y jóvenes sanos de la ciudad de México.* Neumol Cir Torax. 1995; 54:49-53.
6. Muñoz-Bojalil B, Sánchez-Robles J. *Análisis de los valores de referencia espirométricos (CVF,VEF1 y FEF25) para niños de la zona metropolitana de la ciudad de México.* Neumol Cir Torax 1988; 57: 78-86.
7. Pollard AJ, Mason NP, Barry PW, Pollard RC, Collier DJ, Fraser RS et al. *Effect of altitude on spirometric parameters and performance of peak flow meters.* Thorax 1996; 51: 175-178.
8. Pedersen OF, Miller MR, Sigsgaard T, Tidley M, Harding RM. *Portable peak flow meters: Physical characteristics, influence of temperature, altitude, and humidity.* Eur Respir J 1994;7: 991-997.
9. Welsh CH, Wagner PD, Reeves JT, Lynch D, Cink TM, Armstrong J et al. *Operation Everest II: Spirometric and radiographic changes in acclimatized humans simulated high altitudes.* Am Rev Respir Dis 1993;147:1239-1244.
10. Miller MR, Dickinson SA, Hitchings DJ. *The accuracy of portable peak flow meters.* Thorax 1992; 47: 904-909.
11. Thomas PS, Harding RM, Milledge JS. *Peak expiratory flow at altitude.* Thorax 1990; 45: 620-622.
12. West JB, Hackett PH, Maret KH, Milledge JS, Peters RM, Pizzo CJ et al. *Pulmonary gas exchange on the summit of Mount Everest.* J Appl Physiol 1983; 55: 678-687.
13. Schoene RB. *Hypoxic ventilatory response and exercise ventilation at sea level and high altitude.* In: West JB, Lahiri S, editors. *High altitude and man.* Bethesda MA, American Physiological Society, 1984: 19-30.
14. Townes BD, Hornbein TF, Schoene RB, Sarnquist FH, Grant I. *Human cerebral function at extreme altitude.* In: West JB, Lahiri S, editors. *High altitude and man.* Bethesda MA, American Physiological Society 1984: 31-72.