

# Gaceta Médica de México

PERIODICO DE LA ACADEMIA NACIONAL DE MEDICINA

Tomo LIX

MEXICO, MARZO DE 1928

Núm. 3

## TRABAJOS REGLAMENTARIOS

### El Gasto Respiratorio Máximo del Hombre en la Altitud

(Segunda Memoria)

POR EL DR. J. J. IZQUIERDO

Dado que la función esencial del aparato respiratorio consiste en hacer circular en un tiempo dado determinada cantidad de aire en los pulmones, en relación con las necesidades de los organismos en O<sub>2</sub>, y se comprende que los volúmenes de aire que circulan en la unidad de tiempo son los que traducen con mayor justeza su capacidad funcional, de modo muy superior a los antiguos datos puramente estáticos de la espirometría. Así se comprendió cuando desde hace años, en vez de determinar las diferentes categorías de aire respiratorio se pensó en precisar la velocidad y el gasto de la corriente de aire que entra y sale al aparato respiratorio, pero los primeros aparatos como el anapnógrafo de Bergeon y Kastus que descansa en el método anemométrico y el aerodromómetro de Marey, fundado en el método piezométrico (tubo de Pitot) aunque muy interesantes en principio, tuvieron que ser abandonados en vista de su escasa sensibilidad para estudiar los movimientos de una corriente gaseosa cuya velocidad y sentido varían a cada momento.

Pero desde 1918, el doctor Pech, (1) de Montpellier tuvo la idea de aplicar a la medida del gasto respiratorio el método manométrico utilizando las diferencias de presión que se establecen entre las dos caras de una pared delgada atravesada por una corriente gaseosa que pasa por un orificio practicado en ella.

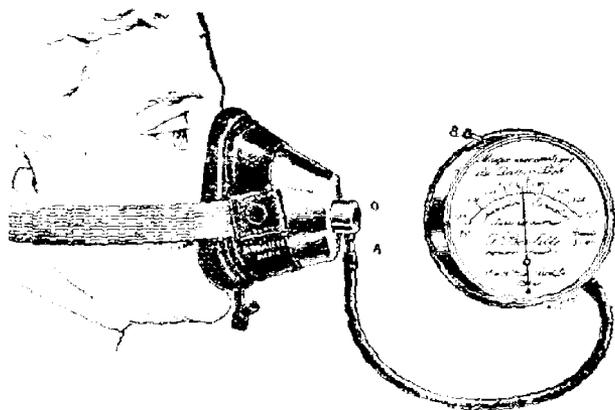


FIGURA NUM. 1.

Después de estudios teóricos cuidadosos y de pacientes ensayos mecánicos construyó su aparato, designado con el nombre de máscara manométrica de Pech, basada en los datos siguientes: Si llamamos S a la superficie de sección de la tráquea y designamos con Q el volumen y por V la velocidad del aire que pasa a través del aparato respiratorio en la unidad de tiempo, podemos escribir que

$$Q = SV$$

Si llegamos a saber cuál es el valor S y podemos medir a cada instante la velocidad V, es evidente que podremos determinar el gasto gaseoso Q. Bastará para ello colocar por delante de los orificios respiratorios, para que a través de ella tenga lugar la ventilación, una máscara provista de un orificio cuya área de sección S no ofrezca una resistencia diferente de la del aparato respiratorio estudiado, pues de no ser así, tendríamos el gasto dado por el orificio y no por el aparato respiratorio en cuestión. Para determinar el área de sección del orificio, Pech se basa en la demostración

(1) Pech, J. L. Masque manométrique. Thèse de doctorat en médecine, Montpellier, 1918.

Pech, J. L. Masque manométrique. Société de biologie, 15 mai 1920.

experimental hecha por Murgue (2) según la cual, todas las resistencias opuestas a la ventilación por una serie de conductos, pueden considerarse como equivalentes a las de un solo orificio practicado en una pared delgada, cuya magnitud podrá determinarse buscando que el paso de la misma cantidad de aire en la unidad de tiempo, determine una depresión igual a la que provoca la serie de conductos considerados. Valiéndose de esta noción, sirviéndose del teorema de las fuerzas vivas para evaluar  $V$  y determinando experimentalmente la depresión  $H$ , necesaria para que se establezca el gasto  $Q$ , Pech encuentra que la superficie de sección del orificio equivalente del aparato respiratorio de un individuo adulto normal es de 90 mm. cuadrados. Y como el orificio de la máscara es un círculo de 10 mm. 7 de diámetro y está practicado en una pared delgada, no habrá riesgo de que impida la ventilación de un individuo que respire a través de él.

Pasando a describir el aparato, (figuras 1 y 2), diremos que consiste en una máscara metálica que cubre la nariz y la boca del individuo, provista en sus bordes de un rodete neumático de caucho, gracias al cual se

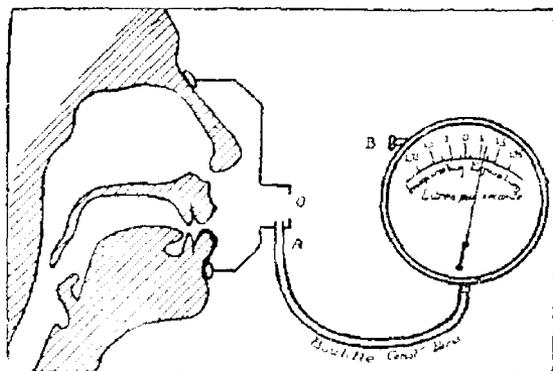


FIGURA NUM. 2.

la puede aplicar exactamente sobre la cara e impedir entre los orificios respiratorios del individuo y el exterior, toda comunicación que no sea a través del orificio  $O$ , practicado en una pared delgada, cuya sección, según ya vimos, es ligeramente superior al orificio equivalente del aparato respiratorio de la especie animal a que pertenece el individuo estudiado. Las diferencias entre las presiones adelante y atrás de la pared delgada permiten deducir el valor del gasto respiratorio; las depresiones indicarán el

(2) Murgue. Bull L'Industrie minérale. 2<sup>a</sup> serie, t. IV et IX.

paso del aire del exterior hacia el interior de la máscara y las presiones traducirán el fenómeno inverso, y como ha demostrado Pech, que las variaciones registradas, por su raíz cuadrada, son función del volumen de aire que pasa a cada momento a través del orificio, ya se comprenderá que los errores que resulten en la evaluación de esta variable, no intervendrán en el cálculo sino por su raíz cuadrada. En la práctica, la medida del gasto respiratorio en un momento cualquiera, se logra uniendo el pequeño tubo A que se abre en el interior de la máscara, inmediatamente debajo del borde inferior del orificio, con un manómetro convenientemente graduado en litros y fracciones de litro por segundo. Dicho tubo de comunicación puede ponerse en relación, al mismo tiempo, con un tambor inscriptor de Marey, para obtener neumogramas cuyas ordenadas pueden graduarse en litros por segundo y cuyas abscisas representan el tiempo. Aunque no ha sido posible llegar a determinar por medio de este aparato, con una aproximación satisfactoria, el volumen de aire espirado e inspirado por el sujeto en experiencia a cada respiración, en cambio gracias a él, Pech ha sido llevado a introducir en Fisiología una noción que permite juzgar el valor funcional del aparato respiratorio: la noción del gasto respiratorio máximo.

Podrían distinguirse una multitud de gastos respiratorios de valor variable de un momento a otro en el curso de los diferentes actos de la vida, pero el único que es particularmente interesante evaluar es el que expresando en litros y fracciones de litro los mayores volúmenes de aire que puede hacer circular un aparato respiratorio en la unidad de tiempo, constituye la mejor expresión de su capacidad funcional. El dato así considerado viene a ser tan uniforme en los diferentes individuos de una misma especie, que constituye una de sus constantes fisiológicas (Gley).

El gasto respiratorio máximo, será pues, la mayor cantidad de aire que puede hacer circular un aparato respiratorio, ya sea a través de la boca (gasto bucal) o de las fosas nasales (gasto nasal) obtenido haciendo respirar al individuo lo más rápida y enérgicamente que le sea posible a través de la máscara de Pech colocada por delante de la cara del individuo, de modo que la aguja ejecute las mayores oscilaciones posibles. En los individuos normales las cifras de los gastos bucal y nasal son iguales, pero en los casos de estrechamiento u obstrucción nasales, el gasto correspondiente se encuentra reducido con relación al bucal.

Cabe distinguir además un gasto respiratorio de inspiración y otro de expiración que en los individuos normales son sensiblemente iguales o difieren cantidades menores de medio litro por predominio, casi siempre, de los valores de la expiración, debido a que como se sabe, los músculos expiradores son generalmente más potentes y se agrega a su acción la de la elasticidad del tórax.

En un principio los autores franceses consideraron que el gasto respiratorio de un individuo adulto normal era 1.750 (Pech) (3) o cuando más dos litros (Desfosses) (4) por segundo, tanto en inspiración como en expiración.

Pero posteriormente a nuestro trabajo a que vamos a referirnos más adelante, el Dr. Pech declaró que aunque sus primeras cifras habían sido establecidas en individuos «examinados clínicamente por médicos de competencia indiscutible, eso no obstante habían resultado insuficientes respiratorios», añadiendo que la experiencia y la observación clínica ulteriores le habían enseñado que un individuo con menos de 3.5 lts. por segundo debe considerarse como deficiente respiratorio. Guès, (5) por su parte, consideró también, poco después, que el gasto normal es de cerca de cuatro litros tanto en inspiración como en expiración.

Pasando a referirnos a lo relativo a las modificaciones del gasto respiratorio en la altitud, distinguiremos, como siempre lo he hecho, primero, las que se observan en los individuos ya adaptados a sus condiciones, y segundo, las que siguen a los traslados más o menos bruscos a lugares elevados o a disminuciones más o menos bruscas de la presión atmosférica (vuelos en aviones, ascensiones a montañas, en globo, etc.; depresiones realizadas experimentalmente en cámaras especiales, etc).

## 19--EL GASTO RESPIRATORIO DE LOS INDIVIDUOS ACLIMATADOS A LA ALTITUD

Al año siguiente de la comunicación de Pech a la Sociedad de Biología de París fuimos los primeros en llevar a cabo observaciones acerca del gasto respiratorio en la altitud. La llevamos a cabo en doscientos individuos del sexo masculino, en buenas condiciones de salud y entre los 16 y los 40 años de edad, que llevaban períodos mayores de dos años, de vivir a 2240 mts. (7,348 pies), altura de la ciudad de México sobre el nivel del mar. Los resultados fueron como sigue:

- 
- (3) Desfosses, P. Masque manométrique de Pech en éducation physique. La Presse Médicale, 1921, pág. 94.
  - (4) Pech, J. L. La mesure du débit respiratoire maximum a l'état normal et a l'état pathologique. La Clinique, XVII, 102, Avril, 1922.
  - (5) P. Guès, Mesure du débit respiratoire maximum a l'état normal et a l'état pathologique. Thèse de Paris, 1922.

## GASTO RESPIRATORIO MAXIMO

En 11 individuos		5.000 c.c. por segundo		
"	3	"	4.750	" " "
"	17	"	4.500	" " "
"	15	"	4.250	" " "
"	65	"	4.000	" " "
"	33	"	3.750	" " "
"	34	"	3.500	" " "
"	14	"	3.250	" " "
"	5	"	3.000	" " "
"	2	"	2.750	" " "
"	1	"	2.500	" " "
200				

Es decir, que de 200 individuos observados, en 132 o sea el 66%, el gasto respiratorio máximo estuvo comprendido entre 3.500 y 4.000 c.c. por segundo, en 89% (o sea en 178) osciló entre límites apenas más amplios, de 3.250 a 4.500 y la cifra media, que coincide con la más frecuente observada, da para el habitante de la ciudad de México un gasto respiratorio máximo de cuatro litros por segundo. No fueron raros los casos de cinco litros por segundo y más raros aún, los inferiores a los límites señalados (4%); uno de 2.500, encontrado en un individuo cuyo tórax estaba muy poco desarrollado, resultó verdaderamente excepcional.

La gráfica número 3 de neumogramas obtenidos con la máscara conectada con un tambor registrador, en tres de las personas cuyo gasto máximo correspondía a las cifras medias que hemos dado, demuestra que los valores inspiratorios y expiratorios eran aproximadamente iguales, y la número 4, corresponde a uno de los individuos que alcanzaron los valores más altos. Confiando en la exactitud de las primeras determinaciones llevadas a cabo por Pech y Desfosses en lugares bajos de Francia, que de ninguna manera nos considerábamos autorizados para combatir o rectificar, concluimos entonces, (6) con fundamento suficiente, que el gasto respiratorio de los individuos aclimatados a la altitud estaba aumentado hasta cerca del doble con relación a los que viven en los lugares bajos.

Pero después de nuestra comunicación de enero de 1922, las nuevas cifras fisiológicas reconocidas por Pech en su artículo de *La Clinique*, de

(6) J. J. Izquierdo. Contribución a la Fisiología de la respiración en las altitudes. El gasto respiratorio máximo. Academia Nacional de Medicina. Sesión del 15 de enero de 1922 y Comptes rendues de la Société de Biologie. 22 juillet, 1922.

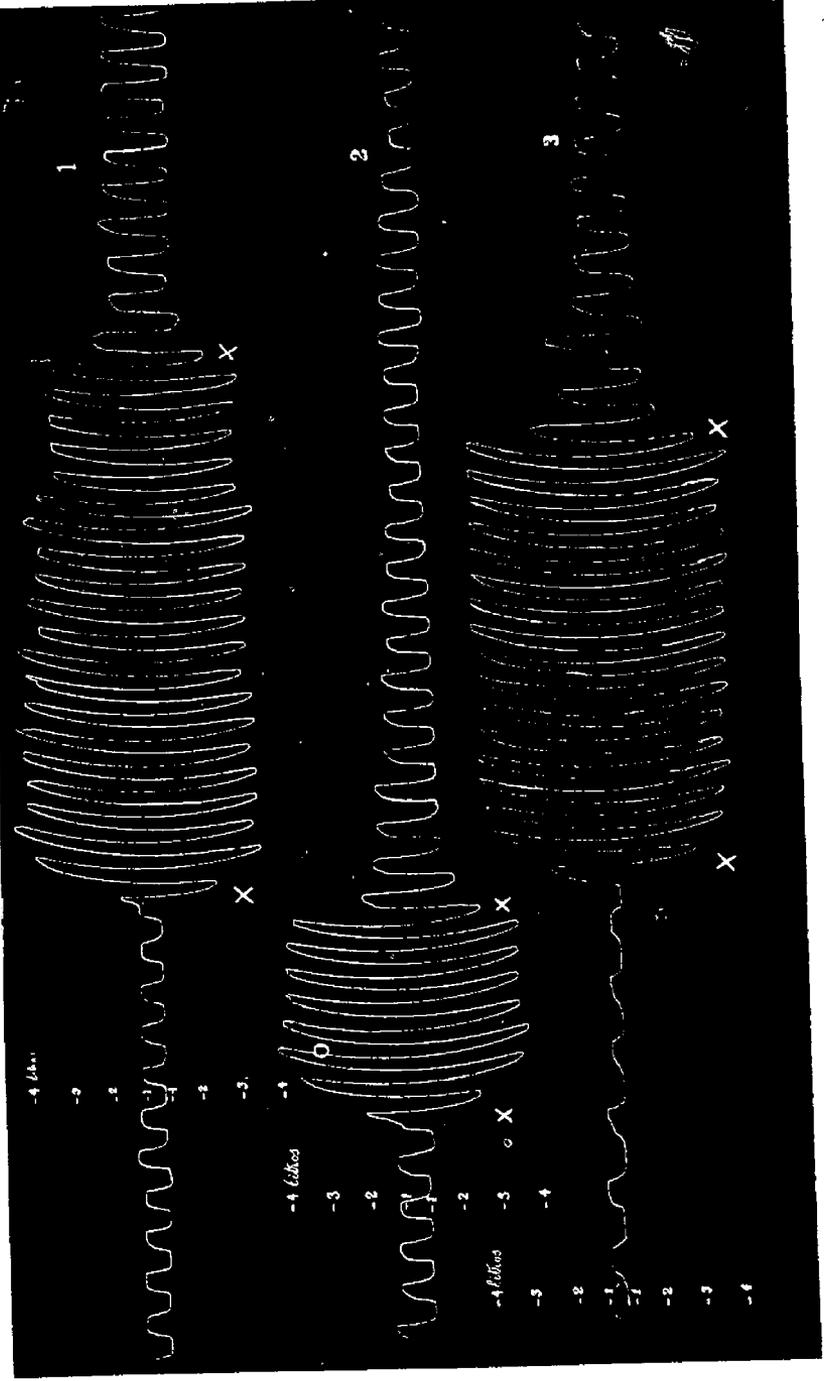


Fig. 3.—Neumogramas tomados con la máscara manométrica de Pech, conectada con el mismo tambor inscriptor de Marcy. Se lee de izquierda a derecha: la inspiración se dirige hacia arriba y la expiración hacia abajo. Entre las dos cruces los individuos respiran tan energica y rapidamente como pueden y en el resto de las graficas el estado de los individuos está en relajación con la raíz cuadrada de las

*El Gasto Respiratorio Máximo del Hombre en la Altitud*  
*Segunda Memoria*

POR EL DR. J. J. IZQUIERDO

GACETA MÉDICA DE MÉXICO.  
TOMO LIX. NUM. 8.

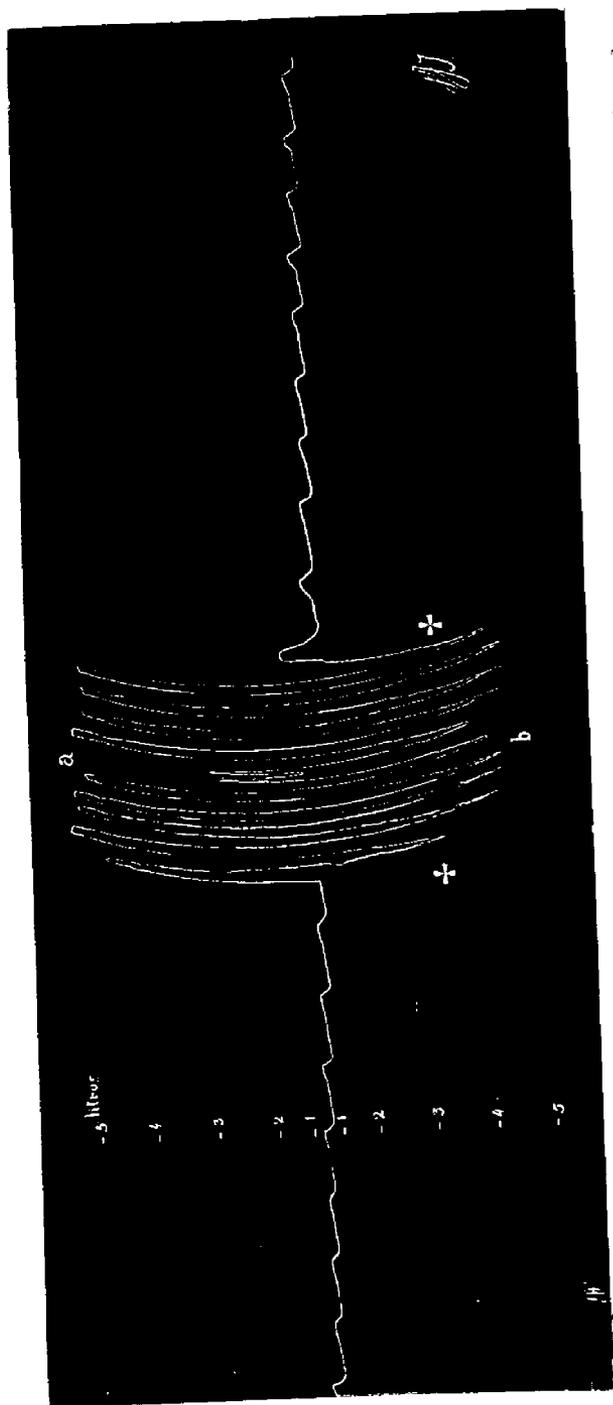


Fig. 4. Trazo neumográfico de uno de los mayores gastos respiratorios observados. Se lee de izquierda a derecha; la inspiración termina en **a** y la expiración en **b**. La mayor parte de la gráfica corresponde a la respiración tranquila; entre las dos cruces al **gasto respiratorio máximo**. Las pequeñas pausas que se ven en **a**, al fin de la inspiración, se deben al choque de la pajilla inscriptora contra el arco del tambor. En las tres gráficas de la figura 3 no ocurrió ésto.

abril de ese mismo año; la tesis de Guès, de ese mismo año, y la nota de Pech en la Presse Médicale de 9 de junio de 1923, cambiaron por completo los términos de comparación tomados para nuestras apreciaciones y nos llevaron a escribir un segundo trabajo de rectificación (7) en que después de decir «que las cifras encontradas por nosotros, de este modo dejan de guardar la gran desproporción que ofrecían con las dadas por Pech en sus primeros trabajos; de dobles que eran pasan a ser tan sólo un poco superiores» agregaba que «por esas razones ya no sabía sostener un aumento de la magnitud que creíamos en el gasto respiratorio de los individuos que viven en las altitudes». (8) Hacíamos notar, sin embargo, que el mismo Pech, en una de sus cartas, nos decía que los valores tan altos de nuestra estadística no se observan con tanta frecuencia en Francia.

Después de nosotros, Padilla (9) y Ocaranza y Delgado (10) han recogido nuevas series de observaciones del gasto respiratorio de los habitantes de la ciudad de México. Padilla como resultado de 112 mediciones, concluyó en su tesis recepcional que las cifras medias eran de cuatro litros para el gasto inspiratorio y de 4.6 para el expiratorio, pero Ocaranza y Delgado consideran que sólo veinticinco de sus observaciones corresponden a individuos normales y deducen de los datos así seleccionados un promedio de 3 litros a 3.5 por segundo. El señor doctor Ocaranza y su discípula la señorita Delgado llevaron a cabo 800 observaciones de las que sólo utilizan 460 consideradas como correspondientes a individuos normales y desechan las 340 restantes; obtuvieron como valores más frecuentes: litros 3 a 3.5 para el gasto inspiratorio y litros 3.5 a 4 para el expiratorio, con medias absolutas de litros 3.175 para la inspiración y de litros 3.360 para la expiración, pues por lo general predomina el gasto expiratorio y sólo en un 10.43% de los casos tuvieron valores iguales. Los valores más altos se encontraron entre los 25 y los 40 años, pero en general se vió que la edad no es motivo constante de variación, como tampoco las profesiones. En la mujer fueron algo menores.

En resumen, los observadores que han medido el gasto respiratorio máximo de los habitantes adaptados a la ciudad de México (2240 metros de altitud), han leído en el manómetro las cifras siguientes:

- 
- (7) J. J. Izquierdo. Nota adicional a mi estudio acerca del gasto respiratorio máximo. Rev. Mex. de Biología, tomo IV, p. 144, diciembre de 1923.
  - (8) Id. Soc. cit. p. 146.
  - (9) Padilla. G. T. El gasto respiratorio máximo. Tesis de la Escuela Médico Militar. México, junio de 1923.
  - (10) Ocaranza F. y Delgado M. El gasto respiratorio máximo en el Valle de México. Gaceta Médica de México, LXI, p. 373. Sesión del 5 de agosto de 1925.

CUADRO NUMERO 1

OBSERVADORES	Valores más frecuentes comprobados para el gasto respiratorio máximo.		PROMEDIOS	
	INSPIRACION	EXPIRACION	INSPIRACION	EXPIRACION
Izquierdo (1921-1922)	3.5-4 lits.	3.5-4 lits.	4 litros	4 litros
Padilla, (1923)	4 litros	4.6 litros	4 litros	4 litros
Ocaranza-Delgado (1924)				
a. Interpretando observaciones de Padilla.	3.3-3.5 lits.	3.5-4 lits.		
b. Según sus propias observaciones.	3-3.5 lits.	3.5-4 lits.	3.175	3.360

## 29--EL GASTO RESPIRATORIO MAXIMO DE LOS INDIVIDUOS RECIEN TRASLADADOS A ATMOSFERAS ENRARECIDAS

Con relación a este punto, transcribiremos a continuación lo que decíamos en diciembre de 1923: (11)

«Michel (12) hizo cinco observaciones, por desgracia sólo sobre sí mismo, durante una ascensión entre 0 y 2500 metros de altura y después practicó en compañía de Piéry (13) dos series más de observaciones en dos individuos durante un vuelo en avión hasta 6,000 metros de altura. En uno y en otro caso pudo comprobar que el gasto respiratorio disminuía a medida que aumentaba la altura. De donde concluyen: «Que el gasto respiratorio máximo decrece a medida que aumenta la altura y que la disminución de los gastos expiratorio e inspiratorio son paralelas; que la disminución es tanto más marcada cuanto mayor es el trabajo que hay que desplegar pa-

(11) J. J. Izquierdo. Nota adicional. Rev. Mex. de Biol. loc. cit.

(12) Michel. Le débit respiratoire dan les ascencions en avion et en montagne. These de Lyon, 1921.

(13) Piéry et Michel. Lyon Medical. 25 juillet, 1922.

ra alcanzarla; que los valores van aumentando durante el descenso hasta las cifras observadas para cada altura durante la ascensión, y que el déficit funcional es sensiblemente el mismo para cada altura, independientemente del individuo considerado». El tiempo empleado para subir o bajar, así como la duración del vuelo horizontal, no influirían sobre las variaciones del gasto».

«Bayeux (14) ha realizado experiencias análogas comparando lo que se observa en los lugares bajos con lo anotado durante una ascensión al Monte Blanco, y ha visto que a medida que se asciende, el gasto respiratorio máximo sufre una disminución importante y progresiva (individuo que en París tenía un gasto inspiratorio de 4.1 y expiratorio de 3.750, marcaba 2.750 y 2.500 respectivamente)».

«Por nuestra parte, el año próximo pasado, durante una excursión al Popocatepetl, que desgraciadamente no pudimos completar hasta el cráter, debido al mal tiempo, pudimos comprobar los siguientes resultados en cuatro estudiantes de medicina y en nosotros mismos:

CUADRO NUMERO 2.

	IZQUIERDO	B. FLORES	SAM. PENA	E. FLORES	MAZZOTTI
Gasto respiratorio máximo en Amecameca (2500 m. de altitud), antes del ascenso.					
Septiembre 12 de 1922.	4.500	4.500	4.400	3.700	4.200
En Tlaxcas (3912m.) después de una noche de descanso.					3.200 insp.
Septiembre 14 de 1922.	4.200	4.200	3.750	3.000	3.500 exp.

«Estos datos, — seguimos diciendo, — concuerdan perfectamente con los que acabamos de citar, así como con los del Dr. Beyne, llevados a cabo en la cámara de aire enrarecido del Instituto Aerotécnico de Saint-Cyr en individuos sometidos a presiones correspondientes a alturas de 0 a 5600m.

(14) Bayeux, R. La respiration maximum aux tres hautes altitudes. Comptes rend. Acad. des Sciences, 174, 1037; Avril 1922.

Hay, pues, uniformidad por lo que respecta a lo que debe considerarse como consecuencias inmediatas del traslado a los lugares elevados o variaciones del primer momento, consecutivas a la depresión atmosférica, y que consisten en una disminución del gasto respiratorio máximo, que para Beyne sería más bien aparente, dadas las condiciones y principio en que se funda el aparato\*.

Los párrafos que anteceden deben haber pasado desapercibidos para el señor doctor Ocaranza y la señorita Delgado, pues de otra manera no hubieran afirmado en su memoria que los trabajos de Michel y Piéry-Michel estaban "en contradicción con los resultados obtenidos por Izquierdo en 1922, rectificadas en 1924". En efecto, como dicen ellos mismos, más adelante, "en 1922 me refería únicamente a individuos adaptados a la vida en las alturas" y en cuanto a mi rectificación de diciembre de 1923, publicada en 1924, ya acabamos de transcribir la parte que expresa la completa concordancia de resultados y la ninguna contradicción que existe entre ellos.

## INTERPRETACION Y CRITICA DE LOS RESULTADOS

### RECTIFICACIONES PRELIMINARES.

Desde que mis primeras mediciones resultaron superiores a las obtenidas en Francia por Pech y Desfosses, antes de seguir adelante decidí verificar experimentalmente la exactitud del aparato, comprobando si las cifras de la escala manométrica correspondían realmente al gasto de la corriente fluida que atravesaba el aparato. Al efecto llevé a cabo una comprobación experimental que está descrita con detalle en la página 139 y siguientes del tomo 41 de las memorias de la Sociedad Alzate: (15)

Se hacían pasar a través de la máscara volúmenes de aire que marcaran en ella gastos de 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 y 5 litros por segundo, y se calculaba después el gasto real, midiendo el volumen de aire que había pasado y dividiéndolo por el tiempo que había durado la experiencia  $\left(\frac{v}{t}\right)$ .

Como las cifras encontradas entonces, resultaron constantemente un poco superiores a las marcadas por el aparato resultó que los valores que habíamos obtenido debían ser corregidos en el sentido de un aumento todavía mayor. Sin embargo, decíamos entonces, «he preferido no corre-

(15) J. J. Izquierdo. El gasto respiratorio máximo. Memorias de la Soc. «Antonio Alzate», tomo XXXXI, págs. 109-149, 15 enero 1922 y Gaceta Médica de México, LV 3-386-712, diciembre de 1922.

girlos, teniendo en cuenta que según la ley de Mariotte Boyle, una masa de aire que ocupa a 760 mm. un volumen de 1 litro a 586 mm. presión barométrica media de la ciudad de México, ocupa un volumen de 1.296 cc.; que un volumen de 1.500 c.c. se vuelve de 1.943 y que 2 litros adquieren el de 2.598, etc. Y como los gastos reales demostrados por la experimentación, correspondieron más o menos a los volúmenes que adquieren a nuestra altura las masas de aire que a 760 mm. de presión ocupan los volúmenes citados, he preferido dar a continuación los resultados tal como fueron recogidos en el manómetro construido por Boullitte, *lo que tiene la ventaja de darnos de modo aproximado los gastos, con relación a 760 mm. de presión. El hecho me parece de acuerdo con el fundamento físico del aparato, pues si a nivel del mar se requiere un gasto Q para determinar entre los dos lados del orificio, un cambio de presión p. en una atmósfera donde la densidad del aire está enrarecida en razón de la menor presión, para producir el mismo desnivel p, será preciso que pase en la unidad de tiempo una cantidad de aire, mayor Q'*. (loc. cit., enero 15 de 1922).

Poco después el doctor Beyne (16) se ocupó de esta misma cuestión en un artículo acerca de las relaciones que existen entre el gasto respiratorio máximo y la presión atmosférica, en que llegó a conclusiones perfectamente concordantes con las nuestras, que acabamos de transcribir, según podrá apreciarse haciendo lo propio con sus palabras:

"Instrumento sensible y correcto, la máscara manométrica de Pech conserva en la altitud su funcionamiento correcto. Pero graduada en litros de aire por segundo, a 0° y 760 mm. de Hg. a todas las presiones, es decir, a todas las altitudes, continúa midiendo gastos en litros de aire reducido a 0 y 760 mm. de Hg. Es decir, que en presencia, a 5,000 metros, de una corriente gaseosa que la atraviese a una velocidad de cinco litros por segundo, su manómetro indicará un gasto segundo de 3 litros 900. De tal manera que un individuo que presente en el suelo un gasto máximo inspiratorio de cinco litros por segundo, y que conserve el mismo gasto a 5,000 metros de altitud, la máscara de Pech indicará a esta altitud un gasto-segundo máximo correspondiente a 3 litros 900 de aire medido a la presión de 760 mm. Hg. y el gasto máximo expresado en aire medido a 5,000 m. será obtenido multiplicando la cifra leída en el manómetro de Pech por

$$V \frac{D}{D_0} \frac{D_0}{h} \dots, \text{ o sea en el caso particular, por } 1.28.$$

(16) J. Beyne. Recherches sur la relation qui unit le débit respiratoire maximum et la pression atmosphérique. Journ. de Physiol. et Pathol. Générales, XXI, 30, 1923.

Las citas anteriores nos permiten pues:

1º rectificar la afirmación hecha por el doctor Ocaranza y la señorita Delgado en su trabajo citado, de que no hubiéramos tomado en consideración, antes que Beyne, las relaciones entre las lecturas hechas en los lugares bajos y en la altitud;

2º comprobar que el criterio que tuvimos entonces coincidió enteramente con el sostenido posteriormente por Beyne; y

3º demostrar que el reproche que en dos ocasiones nos hacen el señor Ocaranza y la señorita Delgado, al considerar que habíamos caído en error pensando que las indicaciones del aparato debían tomarse como reales, "cualquiera que fuesen las condiciones de la presión barométrica" atendiendo a que Beyne «había puesto el asunto en claro» al hacer observar (17) que «Izquierdo atribuyó a las cifras leídas en el manómetro de Pech, una *significación real* ..... », tampoco puede sostenerse. En primer lugar, porque en las líneas que anteceden ya ha quedado evidenciado el perfecto acuerdo que existe entre nuestro criterio y el de Beyne y luego, porque las palabras de Beyne que se citan en contra nuestra en realidad son diferentes, ya que no habla de que hubiésemos dado a las cifras «una *significación real*» sino «*su (leur) significación real*», es decir, la que le es propia y legítimamente les pertenece. Si en vez de conformarnos con esta cita fragmentaria, aún después de corregida, leemos todo el párrafo, veremos que expresa el acuerdo perfecto con nuestros resultados. (18) «Atribuyendo a las cifras leídas sobre el manómetro de Pech, *su significación real* y considerando que corresponden «cualesquiera que sean las condiciones de presión barométrica», a las masas de aire que tienen a 760 mm. de mercurio de presión los volúmenes registrados por el aparato, concluye Izquierdo que los habitantes de México presentan un gasto respiratorio máximo aumentado por adaptación a la altitud de esta ciudad y a la disminución de tensión parcial del oxígeno del aire que soportan».

#### TEORIA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA MASCARA MANOMETRICA EN LA ALTITUD

Si llamamos  $s$  a la superficie de sección de la tráquea,  $Q$  el volumen de aire que circula en un segundo (*gasto respiratorio*) y  $v$  a su velocidad, también por segundo, podremos escribir que

$$Q = sv \dots \dots \dots (1)$$

Y como  $s$  no cambia, es evidente que si llegamos a determinar el valor de  $v$  en un momento dado, podremos averiguar el valor de  $Q$ .

(17) Ocaranza-Delgado, Gaceta Médica, loc. cit. página 377.

(18) Beyne, loc. cit. página 36.

Por otra parte, ya hemos visto que en realidad lo que determina las oscilaciones de la aguja del manómetro de Pech, son los cambios de presión que sufre un punto colocado inmediatamente hacia adentro y abajo del borde del orificio de la máscara (véase fig. 1) cuando se establece la corriente gaseosa del interior al exterior (aumento de presión expiratoria) o viceversa, de fuera hacia adentro (depresión inspiratoria).

Por lo tanto, las presiones así acarreadas por el escurrimiento del aire serán en cada caso proporcionales a su energía cinética que, como se sabe, puede expresarse en función de la masa gaseosa (M) y de su velocidad (v) por.

$$p = \frac{1}{2} M v^2 \dots \dots \dots (2)$$

de suerte que siempre que M permanezca constante y no varíen ni su temperatura ni su presión, las presiones ejercidas sólo serán proporcionales a las velocidades de la corriente en cada momento. Son las condiciones en que ha sido graduado el aparato y para las cuales los valores del cuadrante manométrico expresan con toda precisión los gastos a través de la ventana de la pared de la máscara, a 0<sup>o</sup> y a 760 mm. de presión y para el valor de g que se comprueba cerca del nivel del mar.

Pero si hacemos la medición en un lugar elevado, para que el escurrimiento de la columna gaseosa provoque la misma presión p. necesaria para llevar la aguja hasta el mismo punto que en el caso anterior, será preciso que escurra una masa  $M_h$  con una velocidad mayor ( $v_h$ ), conforme a la ecuación:

$$p = \frac{1}{2} M_h v_h^2 \dots \dots \dots (3)$$

y como (2) y (3) expresan igualmente el valor de p. que se conserva constante, podemos escribir, que:

$$\frac{1}{2} M_h v_h^2 = \frac{1}{2} M_o v_o^2 \dots \dots \dots (4)$$

igualdad que nos va a servir para calcular cual es el gasto de aire que se hace a través de la máscara en la altitud, medido en volúmenes relacionados a la presión y temperatura del aire ambiente.

Pueden seguirse para ello dos caminos:

### 1<sup>o</sup>—PROCEDIMIENTO Y FORMULA DE BEYNE

Beyne no tuvo inconveniente en reemplazar en las ecuaciones que expresan la energía cinética (3) el valor de la M (masa de aire que atraviesa la máscara en un segundo) por sus densidades respectivas a nivel del mar ( $D_o$ ) y en la altitud ( $D_h$ ) y escribe (página 34, loc. cit):

$$\frac{D_h v_h}{2g} = \frac{D_o v_o}{2g} \dots \dots \dots (5)$$

que después de quitar los denominadores,

$$D_h v_h^2 = D_o v_o^2$$

puede escribirse:

$$\frac{v_h^2}{v_o^2} = \frac{D_o}{D_h} \quad \text{ó} \quad \frac{v_h}{v_o} = \sqrt{\frac{D_o}{D_h}}$$

y finalmente,  $\frac{v_h}{v_o} = \sqrt{\frac{D_o}{D_h}}$  ..... (6)

Haciendo la substitución correspondiente en (1), encuentra Beyne la fórmula que expresa el gasto respiratorio Q' en volúmenes de aire medidos en las condiciones de temperatura y de presión que se encuentran en la altitud:

$$Q' = s v_h = (s v_o) \sqrt{\frac{D_o}{D_h}} \quad \text{o sea} = Q \sqrt{\frac{D_o}{D_h}} \dots \dots (7)$$

según lo cual, lo único que habrá que hacer es multiplicar la cifra Q leída en el manómetro (que como sabemos se refiere a 0° C. y 760 mm. Hg.), por la raíz cuadrada del cociente de las densidades del aire a nivel del mar y en la altitud.

La fórmula, sin embargo, descansa en un error: en (5) se ha substituído M por D, cosa que no es equivalente de ninguna manera, pues mientras la masa gaseosa M (es decir la cantidad de materia considerada, medida en gramos), es un valor invariable que no cambia a diferentes presiones, por más que ocupe diferentes volúmenes; su densidad si varía en relación inversamente proporcional a dichos volúmenes, lo que quiere decir que para expresar una masa gaseosa M en función de su densidad, no puede prescindirse del volumen.

La fórmula de Beyne, aunque ha sido aceptada por los autores, sin someterla a la crítica, debe ser desechada porque entraña un error.

2º -PROCEDIMIENTO Y FORMULA DEL AUTOR

Tomando como punto de partida la misma igualdad,

$$\frac{1}{2} M_h v_h^2 = \frac{1}{2} M_o v_o^2 \dots \dots \dots (4)$$

insistiremos en que una misma gaseosa M, que ocupa un V<sub>o</sub> y tiene una densidad d<sub>o</sub> al nivel del mar, por más que no cambie en la altitud, ofrecerá en ella un mayor volumen V<sub>h</sub> y una menor densidad d<sub>h</sub>. Por lo tanto, de acuerdo con consideraciones sencillas que se derivan de la ley de Mariotte-Boyle, puesto que la masa específica de la masa gaseosa M<sub>o</sub> y de

de volumen V<sub>o</sub>, viene a ser d<sub>o</sub> =  $\frac{M_o}{V_o}$ ; para la masa M<sub>h</sub> de volumen V<sub>h</sub>, será d<sub>h</sub> =  $\frac{M_h}{V_h}$ , conforme a lo cual podremos expresar que las masas de

aire consideradas son:  
a nivel del mar, (0 y 760 mm. Hg.): M<sub>o</sub> = V<sub>o</sub> x d<sub>o</sub> ..... (8)

en la altitud, a t y p: M<sub>h</sub> = V<sub>h</sub> x d<sub>h</sub> ..... (9)

Substituyendo en (4) a M<sub>o</sub> y M<sub>h</sub> por sus valores (8) y (9) tenemos:

$$\frac{1}{2} (V_h d_h) x v_h^2 = \frac{1}{2} (V_o d_o) v_o^2$$

$$o (V_h d_h) x v_h^2 = (V_o d_o) x v_o^2 \dots \dots \dots (10)$$

y como el gasto V = v x s y por lo mismo, v =  $\frac{V}{s}$ , substituyendo estos valores de

V<sub>o</sub> y V<sub>h</sub> (10) tendremos (V<sub>h</sub> d<sub>h</sub>) x  $\frac{V_h^2}{s^2}$  = (V<sub>o</sub> d<sub>o</sub>) x  $\frac{V_o^2}{s^2}$  ..... (11)

simplificando, V<sub>h</sub><sup>3</sup> = V<sub>o</sub><sup>3</sup>  $\frac{d_o}{d_h}$  ..... (12)

y finalmente V<sub>h</sub> = V<sub>o</sub>  $\sqrt[3]{\frac{d_o}{d_h}}$

--- La influencia de la gravedad resulta insignificante, que no vale la pena tomarla en cuenta.

que es la fórmula verdadera, que proponemos y que indica que *para obtener el gasto expresado en aire a las condiciones en que se encuentra en la altitud, habrá que multiplicar la cifra leída en el manómetro correspondiente a volúmenes de aire a 0° C. y a 760 mm. de presión por la raíz cúbica de cociente que resulta de dividir la densidad del aire en las primeras condiciones, por su densidad a la temperatura y altitud consideradas.*

### EL GASTO RESPIRATORIO DE LOS HABITANTES DE LA CIUDAD DE MEXICO EXPRESADO EN LITROS MEDIDOS EN LA ALTITUD

Todos los investigadores se han ocupado del g. r. m. de los habitantes de la ciudad de México —incluso nosotros en nuestra memoria de 1922— sólo han tenido en cuenta los datos que figuran en el cuadro núm. 1, en litros de aire medidos a 0° C. y a 760 mm. de presión. Pero ninguno los ha expresado en litros medidos en la altitud: por nuestra parte, ni en nuestras memorias de 1922 en las que sólo nos conformamos con dejar consignado de modo vago que los volúmenes que circulan en la altitud eran necesariamente mayores, ni en la nota adicional de diciembre de 1923 consideramos tan interesante punto, y en cuanto a don Fernando Ocaranza y Margarita Delgado, se contentaron con señalar la necesidad de corregir las cifras obtenidas en México por medio de la fórmula de Beyne, pero sin llegar a aplicarla y a consignar las cifras obtenidas por medio de ella. Esto no obstante, suponen (página 378, loc. cit.) que los resultados generales que así deberían obtenerse «no tienen diferencia con las medias encontradas en las llanuras bajas de Francia por Guès y Desfosses».

Tratándose de la multiplicación de dos valores positivos cuyo producto necesariamente tendrá que ser mayor, los conceptos anteriores nos indican

que Ocaranza-Delgado consideraron que el valor de  $V \frac{D_o}{D_h}$  era tan corto

que podía considerarse como despreciable. Pero la verdad es que aplicando a sus cifras la fórmula tal y como la aceptan de Beyne, resultan aumentados los valores que expresan los volúmenes leídos en la altitud en un 20%.

En efecto aplicando la fórmula a su gasto más frecuente, de 3.5, como

$$V \frac{D_o}{D_h} = V \frac{0.0012932}{0.0009092} = V 1.42 \approx 1.19$$

resultaría un gasto  $Q' = 3.5 \times 1.19 = 4.165$ .

El resultado no nos extraña, puesto que ya hemos señalado el error que entraña la fórmula de Beyne.

Pasemos pues a presentar los valores del gasto respiratorio máximo del habitante de la ciudad de México, expresando en litros medidos en la altitud, o sea el gasto real, calculándolo a partir de las mediciones de los diferentes observadores que figuran en el cuadro núm. 1, corregidas por medio de la fórmula del autor.

Mas como para ellos se requieren los datos relativos a las densidades del aire atmosférico en los puntos considerados, empezaremos por determinarlas.

La densidad del aire seco con un 0.06% de  $\text{CO}_2$ , a  $0^\circ \text{C}$ . y a 760 mm. de Hg. se sabe, desde los trabajos de Regnault que es

$$d_c = 0.0012932.$$

La densidad del aire a determinada altitud, a  $t$  y bajo una presión  $H$ , se calcula por la fórmula (19) siguiente en que  $\alpha = 0.00367$ , es el coeficiente de dilatación de los gases:

$$d_n = \frac{0.0012932}{1 - \alpha t} \frac{H}{760}$$

y con objeto de que los resultados en México y en Tlamacas sean más comparables, aplicaremos a la fórmula anterior datos de presión atmosférica y de temperatura anotados simultáneamente en ambos lugares por el ingeniero Heriberto Camacho, (20) miembro de una comisión enviada por el Instituto Geológico para estudiar las actividades del Popocatepetl.

Así la densidad del aire, con una presión barométrica de 581 mm. y una temperatura de  $18^\circ \text{C}$ , resulta para México:

$$d_{2240} = \frac{0.0012932}{1.074} \frac{581}{760} = 0.0009092$$

Y en Tlamacas, Pue., a 3912, con una columna barométrica de 480 mm. y una temperatura de  $4.8^\circ \text{C}$ .

$$d_{3912} = \frac{0.0012932}{1.01762} \frac{480}{760} = 0.008026$$

(19) Kohlraush, Lehrbuch der Praktischen Physik, p. 76 y tablas 6 y 7 (páginas 760-761). Berlín, 1923.

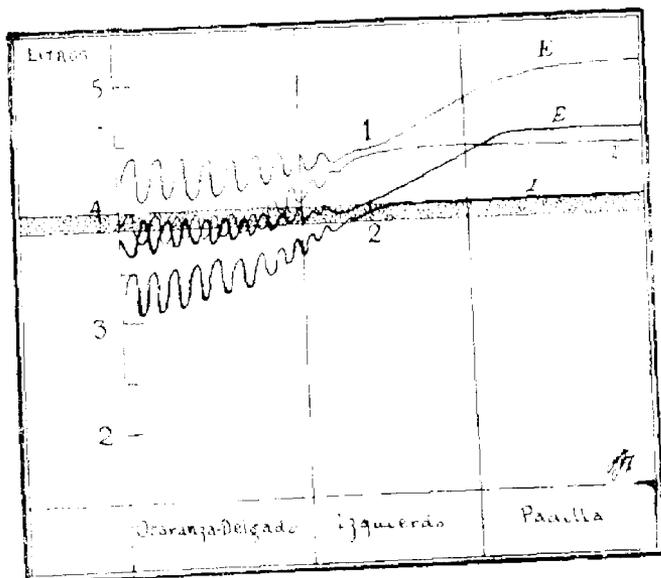
(20) Anales del Instituto Geológico de México, II, 1, 2 y 3, págs. 39 y 40.

Luego, para obtener los gastos respiratorios expresados en litros medidos a las alturas de México y Tlamanca, habrá que multiplicar los volúmenes leídos en la máscara: en el primer caso, por  $\frac{0.0012932}{0.0009062}$  o sea 1.124 lo que indica que un litro de aire a 0° y 760 mm. en México adquiere un volumen de 1124 c.c. por  $\frac{0.0012932}{0.0008026}$  o sea 1.172, en el caso de Tlamanca, a cuyo nivel el litro medido cerca del mar se convierte en 1172 c.c.

El siguiente cuadro núm. 3 contiene los gastos respiratorios reales o sea en litros medidos en la altitud, que he calculado tomando como base los datos reducidos a 0° C. y 760 mm. de presión de los investigadores del cuadro núm. 1 y los de nuestras observaciones del cuadro núm. 2.

CUADRO NUM. 3

Gasto respiratorio máximo de los individuos adaptados a la altitud. (En litros de aire medidos a 18° 9 C; 581 mm. y $d = 0.0009062$ ).		Gasto respiratorio máximo de los individuos recién trasladados a la altitud. (Observaciones personales).		
Observadores		Individuos observados	En Amecameca a 2500 m.	En Tlamanca, a 2912 m. Aire a 16°C. 480 mm. y $d = 0.0008026$
Izquierdo	3.934 - 4.496			
Padilla	I 4.496	Izquierdo	5.274	4.922
	E 5.170	B. Flores	5.274	4.922
Ocaranza Deigado	I 3.709 3.934	San Peña	5.156	4.395
	E 3.934 4.496	E. Flores	4.333	3.519
		Mazzotti	4.922	I 3.867 E 4.102



Comparación gráfica de los gastos reales (1) y los gastos reducidos a 0°C y 760 mm. (2), en la inspiración (I) y en expiración (E), con las cifras fisiológicas (banda gris *Phys*) encontradas por Pech y Guès para los habitantes de los lugares más bajos.

El esquema adjunto que representa gráficamente los gastos respiratorios máximos reales y reducidos a 0° y 760 mm. según las cifras Ocaranza-Delgado, Padilla e Izquierdo, también nos permite compararlos con los valores de cuatro litros tenido ya definitivamente como fisiológicos en las llanuras bajas de Francia propuestos por Guès y reconocidas por el mismo Pech en su nota de la «*Presse Medicale*» del 9 de junio de 1923.

CONCLUSIONES.

- 1.—Las cifras encontradas para el gasto respiratorio máximo del habitante de la ciudad de México reducidas a 0° y 760 mm. (3 — 3.5 para la inspiración y 3.5 — 4 para expiración, según Ocaranza-Delgado; 4 según Izquierdo y 4 — 4.6 según Padilla) coinciden más o menos con las señaladas para los habitantes de los lugares bajos (4 litros según Pech y Guès).  
Semejante invariabilidad del gasto independientemente de la altitud.

viene a constituir una nueva prueba de la ley de Pflügger, según la cual el consumo de oxígeno de un organismo sólo está en relación con sus propias necesidades y es independiente del desarrollo del tórax, de la capacidad pulmonar, de la frecuencia y profundidad de las respiraciones, etc.

2.—*El gasto respiratorio máximo o real, o sea expresado en litros de aire medidos en las condiciones de presión y temperatura de la ciudad de México* (de alrededor de 3. 934, si se toman como base las cifras reducidas de Ocaranza-Delgado; de 4,496, según las nuestras y hasta de más de 5 según las de Padilka), es 12,5% mayor que el del hombre en los lugares bajos.

Es obvio que a medida que la densidad del aire y con ella la tensión parcial del oxígeno van disminuyendo con la altitud, el único medio para que el gasto reducido a 0° y 760 mm. se mantenga constante y la ventilación pulmonar siga poniendo a disposición de un organismo las mismas cantidades de oxígeno máximas de que era capaz en los lugares bajos, será preciso que la ventilación se intensifique de modo tanto mayor cuanto menos sea la densidad atmosférica. Por eso, puede decirse que:

3.—*Mientras el gasto respiratorio computado a 0° C y a 760 mm. es constante e independiente de la altitud y sólo depende de las necesidades en () de un organismo, computado en litros medidos en la altitud está en relación inversa con la tensión del oxígeno atmosférico.*

Precisando más nuestras ideas, queremos hacer notar, que lo que decimos en relación al gasto respiratorio máximo, no se aplica a la respiración ordinaria del habitante de la ciudad de México, pues además de que no se ha llegado a precisar —ni creemos que tuviera mayor importancia— el estudio de cada ciclo respiratorio, como no está demostrado que los individuos adaptados a las altitudes respiran con mayor frecuencia, ni que su caja torácica posea mayores dimensiones, ni que sea mayor su capacidad pulmonar, ni que esté aumentado el volumen de aire corriente que entra y sale a cada respiración normal, es evidente que en tales condiciones no existe aumento del gasto respiratorio.

En tales circunstancias nuestra opinión se adhiere francamente a la tesis que ha venido sosteniendo brillantemente el Dr. Ocaranza —de que la hiperglobulia constituye por sí sola todo el mecanismo de la adaptación a la altitud: El aumento de glóbulos rojos y de la tensión hemoglobínica de la sangre, aumentan su capacidad respiratoria en una proporción que basta para compensar la disminución de tensión del oxígeno atmosférico.

Pero que sobrevenga la mayor necesidad de oxígeno de que habla la ley de Pflügger, v. g. bajo la influencia de un violento trabajo muscular y entonces se realizará una ventilación pulmonar mucho más activa que a nivel del mar (aumento del gasto real), de modo que los volúmenes de oxí-

genos puestos a disposición del organismo sean iguales a los que a nivel de mar logra introducir el aparato respiratorio haciendo circular volúmenes más reducidos (constancia del gasto reducido).

4.—«A nuestro modo de ver, esto quiere decir: que la hiperglobulia debe considerarse como el elemento constante del mecanismo de adaptación a las altitudes, pero además, el aumento del gasto respiratorio máximo real que únicamente se realiza cuando los organismos se encuentran de modo pasajero en condiciones de mayor necesidad de oxígeno, viene a constituir un segundo factor eventual o intermitente de la adaptación.»

5.—«El traslado brusco a la altitud no trae como consecuencia aumento del gasto reducido ni del gasto real, sino por el contrario, pequeña disminución que, por lo menos, atestigua que el aumento ha de irse estableciendo progresivamente como todo fenómeno de adaptación.»

México, marzo de 1927.

J. J. IZQUIERDO.

Me complace en hacer presentes mis agradecimientos al señor ingeniero don Joaquín Gallo por la valiosa ayuda que me prestó para la revisión y corrección de las fórmulas y cálculos de este trabajo.