

Transferencia de calor, convección y gradiente altitudinal

Heat Transfer, Convection and Altitudinal Gradient

FRANCISCO BOZINOVIC¹, MARIO ROSENMANN¹ y
GRICELDA RUIZ²

¹ Departamento de Ciencias Ecológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, Casilla 653, Santiago, Chile.

² Departamento de Biología, Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación, Casilla 147, Santiago, Chile.

Measurements of heat loss from fur covered aluminium cylinders were made under barometric pressures ranging from 760 to 368 torr (sea level up to 5.8 km, simulated altitudes).

Heat transfer diminished at high altitudes and a relative greater diminution was observed when forced convection was applied.

The virtual increase in thermal insulation at high altitudes may be useful to compensate the expected larger difference between body and ambient temperatures.

La transferencia de energía calórica desde un organismo al ambiente físico que lo rodea se realiza a través de cuatro formas fundamentales: radiación, conducción, evaporación y convección (Kleiber, 1961; Gates, 1962; Birkebak, 1966).

En el intercambio de energía por radiación se transfiere calor entre superficies físicamente separadas. Conducción de calor ocurre básicamente cuando dos objetos entran en contacto. La pérdida de calor por evaporación depende principalmente de la diferencia entre la presión de vapor de agua de la superficie del cuerpo y de la del aire. Por último, la pérdida de calor por convección (arrastre de calor) depende de la velocidad del movimiento y densidad del fluido que rodea al cuerpo, de un diferencial térmico y de la conductividad térmica del fluido. Cuando la transferencia de calor entre el cuerpo y el fluido (normalmente aire) es fundamentalmente causada por la diferencia de temperatura entre la superficie del cuerpo y las moléculas de los gases que componen el aire, hablamos de convección natural. Por otra parte, si el movimiento del fluido se incrementa por sobre la convección natural (ejemplo, viento), entonces la transferencia de calor aumenta por convección forzada (Gascón, 1976).

Cuando un objeto que no está produciendo calor tiene no obstante una tem-

peratura superior a la de su ambiente se establece un gradiente térmico que en el curso del tiempo tiende a disminuir, debido a la pérdida de calor del cuerpo y a la ganancia calórica del ambiente. Este simple hecho refleja la importancia que tiene la diferencia de temperatura entre cuerpo y ambiente en las 3 formas de transferencia de calor seco brevemente descritas.

En general, un animal endotermo mantiene una diferencia positiva de temperatura con el ambiente, lo que origina una pérdida de calor neta, que corresponde a la suma de las cantidades perdidas a través de radiación, conducción, evaporación y convección (McNab, 1970).

En los animales endotérmicos que habitan las altas altitudes la pérdida de calor por convección es una vía que merece ser examinada. Como ya se mencionó, la pérdida de calor por esta ruta depende, entre otros parámetros, de la densidad del fluido que rodea el cuerpo en cuestión y de ciertas variables adimensionales como los números de Prandtl, Nusselt, Grashof y Reynolds (Gascón, 1976). En convección forzada, el número de Reynolds (Re) adquiere una gran importancia, puesto que relaciona la velocidad y densidad del flujo, su viscosidad y las dimensiones del cuerpo (Bartlett y Gates, 1967; Davies y Birkebak, 1975; Johnson II, 1975; Gascón, 1976).

Así entonces, en altas altitudes, donde la densidad del aire es menor, se esperaría que a una misma temperatura ambiente la pérdida de calor por convección fuese también menor que a nivel del mar. El objetivo de la presente comunicación es demostrar esta hipótesis y estimar la magnitud del cambio en la transferencia de calor.

MATERIAL Y METODOS

Los estudios de pérdida de calor se realizaron en cilindros de aluminio cubiertos con piel de *Phyllotis darwini*. A estos cilindros se les insertó en su centro geométrico una termocupla cobre-constantan conectada a un registrador automático de 24 canales, Honeywell Elektronik 112, donde se registró la caída de temperatura del cilindro (T_c) $\pm 0,1^\circ\text{C}$ en función del tiempo (min.). Paralelamente otra termocupla registró la temperatura ambiente (T_a) $\pm 0,1^\circ\text{C}$, de acuerdo al método propuesto por Morrison y Tietz (1957).

Cada cilindro se calentó hasta $45 \pm 2^\circ\text{C}$ y se depositó en una cámara de cobre que fue sumergida en un baño termostático a $10 \pm 0,1^\circ\text{C}$. T_a y T_c fueron registrados continuamente hasta un gradiente ($T_c - T_a$) = 10 a 12°C .

Las curvas de enfriamiento se calcularon a partir de los datos obtenidos a presiones barométricas de 760 torr (altura simulada = cero metros), 738 torr (~ 3.100 metros), 438 torr (~ 4.400 metros) y 368 torr (~ 5.800 metros).

Los estudios de convección forzada se realizaron utilizando un ventilador incluido en la cámara (calibrado con un anemómetro Weather W 131), que generó una velocidad del viento de $0,63 \pm 0,30$ metros por segundo.

La transferencia de calor con convección natural (Q_n) y con convección forzada (Q_f) se calculó a través de la siguiente relación:

$$Q = b \times C_p \text{ (cal g}^{-1}\text{h}^{-1}\text{°C}^{-1}\text{)}$$

En la que:

b = pendiente de la curva $\ln(T_c - T_a)$ vs. tiempo (min^{-1})

C_p = calor específico del aluminio ($0,214 \text{ cal g}^{-1}\text{°C}^{-1}$)

La velocidad experimental del viento de $0,6 \text{ m sec}^{-1}$ corresponde aproximadamente a la convección forzada creada por la locomoción de los animales en un medio con convección natural. Por lo tanto, los valores de Q_f presentados son probablemente los mínimos que pueden encontrarse en el ambiente en el que los animales se desplazan.

RESULTADOS

A partir de las curvas de enfriamiento que se ilustran en la Figura 1, podemos observar que a una altura simulada de ~ 4.400 metros, Q_n es 9,8% menor que a nivel del mar ($0,275$ vs. $0,305 \text{ cal g}^{-1}\text{h}^{-1}\text{°C}^{-1}$). Con convección forzada esta disminución es aún mayor y equivale a 11,6% ($0,513$ vs. $0,580 \text{ cal g}^{-1}\text{h}^{-1}\text{°C}^{-1}$).

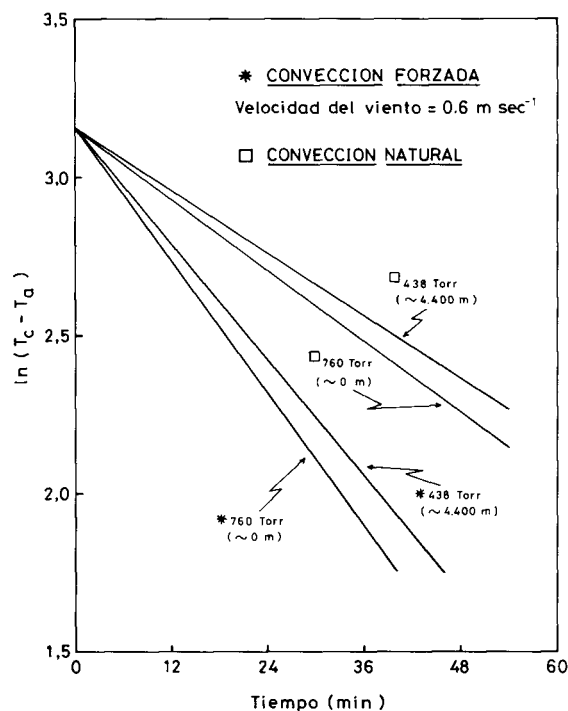


Fig. 1: Logaritmo natural de la diferencia de temperatura ($T_c - T_a$) en función del tiempo, bajo diferentes presiones barométricas con convección natural y convección forzada.

La Figura 2 muestra que este efecto se incrementa a mayor altitud (~ 5.800 metros). En este caso Q_f disminuye en 37,1% en relación a los valores obtenidos a ~ 200 metros ($0,4738$ vs. $0,7537 \text{ cal g}^{-1}\text{h}^{-1}\text{°C}^{-1}$).

Los coeficientes de regresión de todas las curvas (Figs. 1 y 2) son altamente significativos ($r = 0,999$, $p < 0,001$).

DISCUSION

Los resultados encontrados señalan claramente que a medida que disminuye la

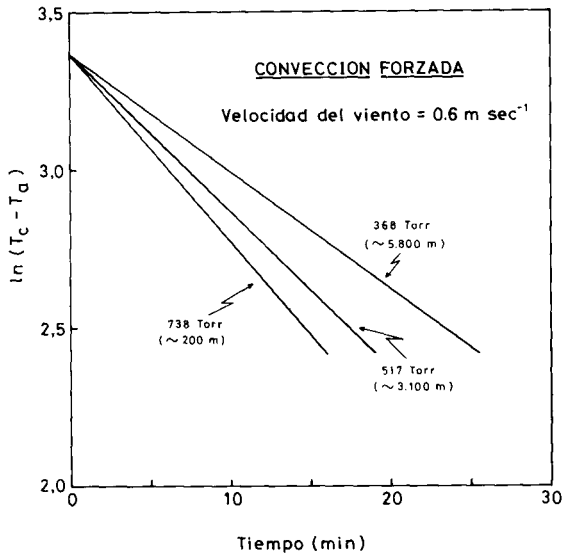


Fig. 2: Logaritmo natural de la diferencia de temperatura ($T_c - T_a$) en función del tiempo, bajo diferentes presiones barométricas con convección forzada.

densidad del aire, como sucede en las altas altitudes, la pérdida de calor por convección también disminuye. Este hecho podría hacernos pensar que a igualdad de estructuras morfológicas, los animales de altura tendrían un "exceso" de aislación, comparados con los del nivel del mar. Sin embargo, a medida que aumenta la altitud, la temperatura ambiente promedio disminuye en aproximadamente $6,4^{\circ}\text{C}$ por km. Vale decir, que a 4.000 metros de altitud es probable que T_a sea $25,6^{\circ}\text{C}$ menor que a nivel del mar y a igual latitud (Strahler, 1972). Para ejemplificar la probable compensación térmica a la disminución de la conductancia hacemos referencia al trabajo de Rosenmann y Morrison (1975), quienes trabajando a nivel del mar con *Mus musculus* silvestres capturados en Morococha, Perú, a 4.500 metros, encontraron que este roedor posee una conductancia térmica de $1,1328 \text{ cal g}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ y una producción de calor máxima de $66,24 \text{ cal g}^{-1} \text{ h}^{-1}$, a $T_a = -22^{\circ}\text{C}$ (Fig. 3).

Nuestros resultados muestran que a 4.400 m Q_f puede disminuir en, al menos, 11,6% (esta reducción puede ser más importante con una convección mayor); vale decir, en la altura y en teoría el valor de conductancia térmica encontrado en

M. musculus quedaría reducido a $0,9925 \text{ cal g}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (asumiendo nuestras condiciones experimentales) y, por lo tanto, alcanzaría su máxima producción de calor de $66,24 \text{ cal g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ a $T_a = -30^{\circ}\text{C}$. A una altitud de 5.800 m (condición hipotética), el valor de conductancia térmica sería $0,7057 \text{ cal g}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, alcanzando la producción de calor máxima a $T_a = -57^{\circ}\text{C}$. De este modo, el rango de temperatura ambiente tolerable por este animal se ampliaría teóricamente de -22°C a -30°C a 4.400 m y de -22°C a -57°C a 5.800 m, por efecto de una disminución de Q_f y Q_n en alta altitud. Si relacionamos este efecto con la probable disminución de T_a en estas altitudes, el fenómeno descrito daría cuenta de la ampliación del rango térmico por el aumento en altitud (disminución de la densidad del aire) (Fig. 3).

Finalmente, el aumento virtual de la aislación térmica en altas altitudes puede considerarse como un mecanismo que atenúa los efectos de la gran diferencia térmica entre animal y ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Ana Godoy por mecanografiar este trabajo y a Francisco Marín por su valiosa ayuda técnica. Este trabajo fue financiado por el proyecto DIB N-1753-8534 de la Universidad de Chile.

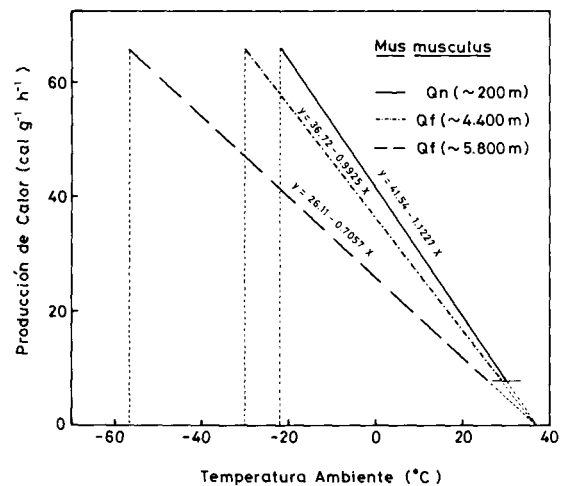


Fig. 3: Producción de calor a diferentes T_a en *M. musculus*. La pendiente de la línea continua representa la transferencia de calor con convección natural a nivel del mar. Las pendientes de las líneas segmentadas indican la reducción en la transferencia de calor con convección forzada en altas altitudes (ver texto).

REFERENCIAS

- BARTLET, P.N. y GATES, D.M. (1967) The energy budget of a lizard on a tree trunk. *Ecology* 48: 315-322.
- BIRKEBAK, R.C. (1966) Heat transfer in biological systems. *Intern. Rev. Gen. Exp. Zool.* 2: 269-344.
- DAVIES, L.B. y BIRKEBAK, R.C. (1975) Convective energy transfer in fur. En: *Perspectives of Biophysical Ecology* (Gates, D.M. y Schmerl, R.B., eds.), pp. 525-548. Springer-Verlag, New York.
- GASCON, F. (1976) *Fundamentos de termotecnia*. Tecnos, Madrid.
- GATES, D.M. (1962) *Energy exchange in the biosphere*. Harper y Row, New York.
- JOHNSON II, S.E. (1975) Microclimate and energy flow in the marine rocky intertidal. En: *Perspectives of Biophysical Ecology*. (Gates, D.M. y Schmerl, R.B., eds.), pp. 559-587. Springer-Verlag, New York.
- KLEIBER, M. (1961) *The fire of life*. Wiley, New York.
- McNAB, B.K. (1970) Body weight and the energetics of temperature regulation. *J. Exp. Biol.* 53: 329-348.
- MORRISON, P.R. y TIETZ, W.J. (1957) Cooling and thermal conductivity in three small alaskan mammals. *J. Mamm.* 38: 78-86.
- ROSENMANN, M. y MORRISON, P.R. (1975) Impairment of metabolic capability in feral house mice by *Klosiella muris* Infection. *Lab. An. Sci.* 25: 62-64.
- STRAHLER, A.N. (1972) *Planet earth: its physical systems through geologic time*. Harper y Row, New York.