

# TASA DE ENFRIAMIENTO ADIABATICO DEL AIRE EN EL VALLE DEL RIO MOLINA, PROVINCIA DE SANTIAGO, CHILE CENTRAL (33°S)

LOHENGRIN A. CAVIERES Y MARY T.K. ARROYO

Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, Casilla 653, Santiago, Chile.  
Departamento de Botánica, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción.

## RESUMEN

Debido a las altas elevaciones que alcanza la cordillera de los Andes, el clima de alta montaña es uno de los climas con mayor representación a lo largo de Chile. Sin embargo, debido a la escasez de estaciones meteorológicas en zonas de alta montaña, donde las pocas estaciones existentes generalmente se ubican en cuencas separadas, poco se sabe en relación a cómo disminuye la temperatura del aire con la altura (tasa de enfriamiento adiabático del aire). En este trabajo se estudiaron los registros de temperatura del aire a lo largo de años de monitoreo a 2.600 y 3.150 m de altitud en laderas de exposición sur en el valle del río Molina, cerca del centro de esquí Valle Nevado, ubicado a 50 km al este de la ciudad de Santiago. Para los dos años de registros, la tasa promedio de enfriamiento adiabático del aire (*lapse-rate*) es de 6,1°C/km, presentando variaciones estacionales en su magnitud. Los mayores valores se obtienen para los meses de verano con 7,0°C/km mientras que los menores se obtienen en invierno con 4,0°C/km.

## SUMMARY

On account of the dominant physiographic role of the Andes, the high mountain climate is ampli represented throughout the length of Chile. However, due to the scarcity of weather stations in the Andes, and their location in separate basins, little is known about how air temperature decreases with elevation (*lapse-rate*). In this study we monitored air temperature for two years at 2,600 and 3,150 m a.s.l. on south-facing slopes in the río Molina valley, near the Valle Nevado Ski complex, located 50 Km east of Santiago. The average annual lapse-rate is 6.1°C/km, but with strong seasonal variation. Higher values were obtained during summer months with an annual average of 7.0°C/km, while lower values were obtained during winter with an annual average of 4.0°C/km.

## INTRODUCCION

Debido a su amplia extensión latitudinal, desde los 17°S a los 56°S, factores como el Anticiclón del Pacífico, la corriente fría de Humboldt, los vientos Alisios o "Westerlies" del Pacífico sur y la presencia de la cordillera de los Andes se combinan en múltiples y diferentes formas, determinando en Chile continental un variado conjunto de climas, que van desde tropicales a la latitud de Arica (18°S), hasta subantárticos a la latitud del cabo de Hornos (56°S) (Fuenzalida, 1965).

Un clima ampliamente representado a lo largo de Chile es el de alta montaña desarrollado gracias a las altas elevaciones que alcanza la cordillera de los Andes. Su principal característica es la baja temperatura del aire que disminuye en forma progresiva a medida que se asciende en altitud. Esta disminución ocurre a una determinada tasa, conocida como tasa de enfriamiento adiabático del aire (*lapse-rate*) (Berry, 1981).

La temperatura del aire en cualquier punto de la tierra es producto de la absorción que efectúa el aire de la radiación infrarroja proveniente del sol y de la radiación calórica que emite la superficie del suelo, siendo la cantidad de radiación absorbida una variable dependiente de la densidad de aire (Berry, 1981). Producto de la fuerza de gravedad, las moléculas de los gases que componen la atmósfera se concentran hacia las partes más bajas de la atmósfera, provocando mayores valores de densidad y presión. A medida que se asciende en altitud, los gases disminuyen su concentración, reduciéndose la densidad y la presión atmosférica. En consecuencia, las bajas temperaturas del aire en zonas de alta elevación se deben a que hay menos aire que calentar y menos aire que retenga la radiación calórica emitida por la superficie del suelo. Dado que la densidad del aire disminuye en forma gradual con la altitud, la temperatura del aire lo va haciendo del mismo modo, generando el fenómeno conocido como tasa de enfriamiento adiabático del aire o "*lapse-rate*".

En general, el *lapse-rate* fluctúa alrededor de los 6°C/km (Berry, 1981). Sin embargo, factores como el grado de continentalidad de la localidad, la latitud, la pendiente y la exposición pueden modificar el valor global (Mani, 1978).

En general, el clima de Chile central es del tipo mediterráneo (di Castri & Hajek, 1976) con estacionalidad en las temperaturas y precipitaciones, y una moderada amplitud térmica entre el período invernal y la época estival. En lo referente al clima de alta montaña en Chile central, Santibáñez y Uribe (1990), basados en datos disponibles para la región Metropolitana, lo han clasificado como clima templado mediterráneo microtermal subhúmedo.

Debido a la escasez de estaciones meteorológicas ubicadas en altas elevaciones de la cordillera de Chile central (c.f., di Castri & Hajek, 1976), y a que las pocas existentes se encuentran ubicadas en diferentes cordones y cuencas, no ha sido factible hasta el momento determinar la tasa de enfriamiento adiabático del aire con precisión. El objetivo de este trabajo es determinar en forma anual y estacional los valores de la tasa adiabática del aire a partir de los resultados de dos años de monitoreo continuo de la temperatura en dos estaciones ubicadas a diferentes altitudes en una misma cuenca de la zona cordillerana de Chile central.

## METODOS

El estudio se realizó en la zona cordillerana de la provincia de Santiago, específicamente en dos laderas de exposición sur ubicadas en la cuenca del río Molina, cercanas al centro de esquí Valle Nevado (33°20'S 70°16'W), distante 50 km al este de Santiago.

Con el propósito de caracterizar las condiciones de temperatura se instalaron 2 termohidrógrafos Lambrecht modelo 252c de registro mensual, a 2.600 y 3.150 m de altitud registrando en forma continua la temperatura del aire a 1,5 m del suelo, desde enero de 1995 hasta diciembre de 1996.

A partir de las planillas de registro continuo se extrajeron los valores de temperatura a intervalos de 4 horas, además de las temperaturas máximas y mínimas de cada día. La temperatura media del día

se estimó dividiendo por dos la suma de la temperatura máxima y la mínima (cf., Rozzi *et al.*, 1989). Los promedios mensuales de las temperaturas máximas, mínimas y media diaria se obtuvieron a partir del cálculo de la media aritmética de todas las temperaturas registradas dentro de un mes.

Para cada mes se estimó la tasa de enfriamiento adiabático del aire (*lapse-rate*) como la diferencia aritmética entre la temperatura promedio mensual de cada una de las estaciones, dividiendo el valor obtenido por la diferencia en altitud (expresada en metros) que separa las estaciones. El valor obtenido se expresó en °C/km de altitud (Berry, 1981). La tasa anual de enfriamiento adiabático del aire se estimó a través de la media aritmética de los valores calculados para cada mes dentro del año. Los valores del *lapse-rate* correspondientes a “invierno” y “verano” se calcularon como la media aritmética de abril a septiembre, y de octubre a marzo, respectivamente.

## RESULTADOS

En las Tablas 1 y 2 se resumen en forma mensual la media de las temperaturas máximas, la temperatura máxima absoluta, la media de las temperaturas mínimas, la temperatura mínima absoluta y la temperatura media a 2.600 y 3.150 m de altitud durante los años 1995 y 1996.

A 2.600 m de altitud la temperatura media anual fue de 6,5°C en 1995 y 6,6°C en 1996. A 3.150 m de altitud en cambio la temperatura media anual fue de 3,1°C en 1995 y 2,9°C en 1996. Como es de esperar, en ambos años, las temperaturas más bajas corresponden a los meses de invierno (junio, julio y agosto), siendo julio el mes con la más baja temperatura media registrada en ambas altitudes durante 1995 con 0,8°C a 2.600 m y -2,1°C a 3.150 m (Tabla 1). En 1996 la temperatura media más baja ocurrió en junio con -1,1°C a 2.600 m y -3,0°C a 3.150 m (Tabla 2). La temperatura mínima absoluta durante 1995 ocurrió en el mes de agosto a 2.600 m con -10,0°C y en el mes de julio a 3.150 m con -15,4°C; durante 1996 la mínima absoluta ocurrió en agosto a 2.600 m con -12,5°C y en mayo a 3.150 m con -15,0°C.

TABLA 1

Valores mensuales de la temperatura media (TM), media de las máximas (TMAX), media de las mínimas (TMIN), temperatura máxima absoluta (ABMAX) y temperatura mínima absoluta (ABMIN) para dos estaciones ubicadas a 2.600 y 3.150 m en el valle del río Molina, Chile central (33°S), durante 1995 [Todas las temperaturas están expresadas en grados Celsius (°C)].

2.600 m de altitud

MES	TMAX	ABMAX	TMIN	ABMIN	TMED
ENERO	14.3	18.1	9.3	5.0	11.8
FEBRERO	14.9	19.5	9.2	5.0	12.1
MARZO	14.5	18.6	9.0	4.0	11.8
ABRIL	11.6	17.0	5.4	2.0	8.5
MAYO	5.6	13.6	-0.9	-9.0	2.3
JUNIO	5.9	13.4	0.1	-6.0	3.0
JULIO	3.8	10.3	-2.2	-10	0.8
AGOSTO	7.0	14.1	-0.0	-10.0	3.5
SEPTIEMBRE	5.4	13.6	-0.9	-10.0	2.2
OCTUBRE	8.5	18.6	2.1	-9.0	5.3
NOVIEMBRE	10.3	17.8	3.7	-3.0	7.0
DICIEMBRE	13.1	17.6	7.3	-1.0	10.2

## 3.150 m de altitud

MES	TMAX	ABMAX	TMIN	ABMIN	TMED
ENERO	12.3	17.0	1.8	0.0	7.1
FEBRERO	11.6	16.0	1.5	-1.0	6.6
MARZO	9.9	15.0	0.9	-2.0	5.4
ABRIL	7.3	13.0	-1.8	-4.0	2.8
MAYO	4.9	12.0	-3.7	-9.0	0.6
JUNIO	4.1	11.6	-3.3	-11.1	0.4
JULIO	2.3	8.8	-6.4	-15.4	-2.1
AGOSTO	7.0	13.9	-3.5	-13.7	1.8
SEPTIEMBRE	7.6	13.9	-5.6	-14.5	1.0
OCTUBRE	10.0	18.1	-3.3	-9.3	3.3
NOVIEMBRE	8.9	17.0	-0.5	-7.0	4.2
DICIEMBRE	11.2	17.0	1.7	-5.0	6.5

A 3.150 m de altitud durante los meses de mayo, junio y julio de 1995 (Tabla 1) y abril, mayo, junio, julio y agosto de 1996 (Tabla 2) la media mensual de la temperatura del aire bordea los 0°C. A los 2.600 m de altitud en cambio, condiciones de temperaturas cercanas a los 0°C sólo ocurrieron en julio de 1995 (Tabla 1) y junio de 1996 (Tabla 2).

TABLA 2

Valores mensuales de la temperatura media (TM), media de las máximas (TMAX), media de las mínimas (TMIN), temperatura máxima absoluta (ABMAX) y temperatura mínima absoluta (ABMIN) para dos estaciones ubicadas a 2.600 y 3.150 m en el valle del río Molina, Chile central (33°S), durante 1996 (Todas las temperaturas están expresadas en grados Celsius (°C)).

## 2.600 m de altitud

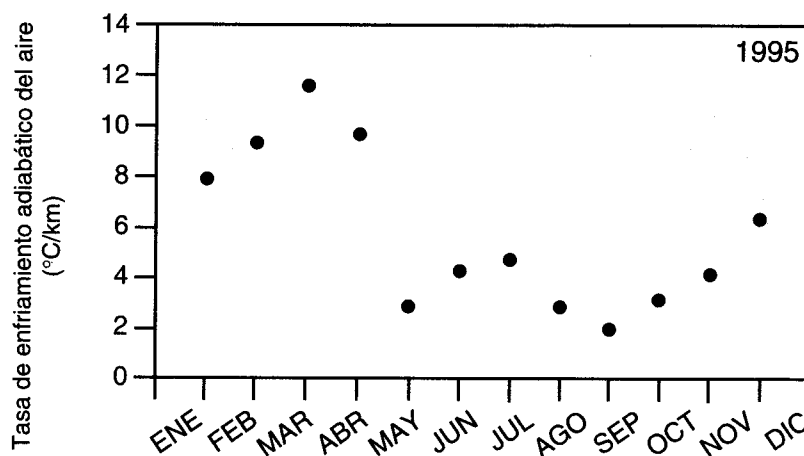
MES	TMAX	ABMAX	TMIN	ABMIN	TMED
ENERO	13.4	18.0	6.2	4.0	9.8
FEBRERO	15.0	20.3	6.6	-1.0	10.8
MARZO	15.4	21.0	6.5	1.8	11.0
ABRIL	11.1	19.0	1.2	-6.0	6.2
MAYO	6.6	15.0	-0.8	-8.0	2.9
JUNIO	1.8	5.0	-4.1	-9.0	-1.2
JULIO	7.8	13.5	-0.4	-10	3.7
AGOSTO	7.4	15.0	-3.8	-12.5	1.8
SEPTIEMBRE	13.7	23.0	-0.8	-10.0	6.5
OCTUBRE	15.5	29.0	-0.5	-8.0	7.5
NOVIEMBRE	14.8	19.0	6.6	1.5	10.7
DICIEMBRE	15.2	23.0	5.8	0.0	10.5

3.150 m de altitud

MES	TMAX	ABMAX	TMIN	ABMIN	TMED
ENERO	10.9	14.5	2.3	-0.5	6.6
FEBRERO	12.1	17.0	3.0	-3.0	7.6
MARZO	11.8	16.5	3.0	-2.5	7.4
ABRIL	6.9	12.0	-0.9	-8.0	3.0
MAYO	4.7	15.0	-5.4	-15.0	-0.4
JUNIO	-0.5	4.0	-5.5	-11.0	-3.0
JULIO	5.2	11.0	-2.0	-11.0	1.6
AGOSTO	2.3	10.0	-6.2	-14.5	-2.0
SEPTIEMBRE	7.6	15.0	-2.5	-11.5	2.6
OCTUBRE	7.0	14.0	-1.6	-10.0	2.7
NOVIEMBRE	8.8	14.0	-0.3	-6.5	4.3
DICIEMBRE	9.2	16.0	-0.5	-5.0	4.4

Los meses cálidos, como era de esperar, ocurren en primavera y verano, especialmente durante este último. En el verano (enero, febrero, marzo), las temperaturas medias mensuales del aire durante 1995 bordearon los 12,0°C a 2.600 m y los 10,0°C a 3.150 m (Tabla 1), mientras que en 1996 bordearon los 10,0°C a 2.600 m los 7,0°C a 3.150 m (Tabla 2). Durante 1995 a 2.600 m el mes más cálido fue febrero con una media de 12,1°C y una máxima absoluta de 19,5°C, mientras que a 3.150 m el mes más cálido fue enero con una media de 7,1°C; sin embargo, la temperatura máxima absoluta ocurrió en el mes de octubre, con 18,1°C (Tabla 1). Durante 1996 tanto a 2.600 m como a 3.150 m de altitud el mes más cálido fue febrero con una temperatura media de 10,8°C y 7,6°C, respectivamente (Tabla 2). En relación a las máximas temperaturas registradas estas ocurrieron en diciembre con 23,0°C a 2.600 m y febrero con 17,0°C a 3.200 m.

Los cálculos de la tasa de enfriamiento adiabático del aire con la altitud muestran que existe una variación mensual de este parámetro a lo largo del año y entre años (figura 1). En ambos años los mayores valores se obtienen para los meses más cálidos (enero, febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre) (7,1°C/km en promedio durante 1995 y 7,6°C/km en promedio durante 1996), disminuyendo hacia los meses más fríos (abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre) (4,4°C/km en promedio durante 1995 y 5,1°C/km en promedio durante 1996). El promedio anual de la tasa de enfriamiento adiabático del aire para 1995 es de 5,9°C/km, mientras que en 1996 fue de 6,3°C/km, dando un promedio de 6,1°C/km para los dos años.



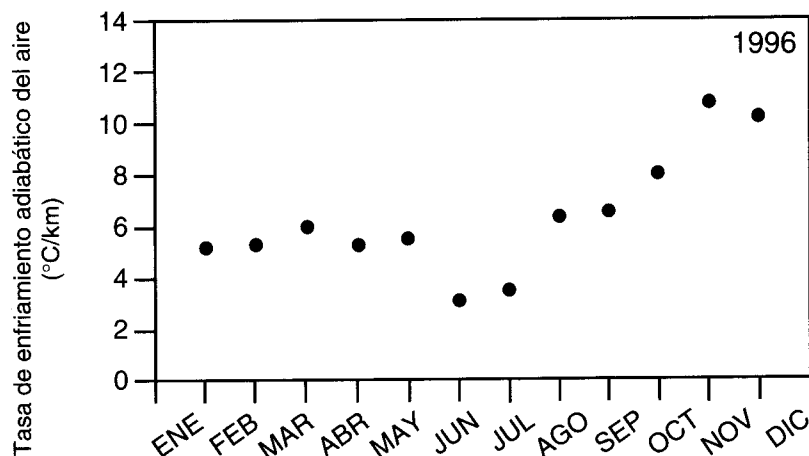


Fig. 1: Valores mensuales de la tasa de enfriamiento adiabático del aire con altitud en el valle del río Molina, Chile central (33°S), durante 1995 y 1996.

## DISCUSION

En general, a nivel mundial, existe un déficit de registros de las condiciones climáticas en zonas de alta montaña (Berry, 1981). Esto se debe principalmente a la dificultad de acceder a sitios de mayor altitud y mantener en funcionamiento estaciones meteorológicas a lo largo de la estación de invierno. En Chile, a pesar de la enorme extensión de la cordillera de los Andes, los registros son escasos.

Los valores anuales de la tasa de enfriamiento adiabático del aire de 5,9°C/km en 1995 y 6,3°C/km en 1996 registrados para la alta cordillera de Chile central, con un promedio de 6,1°C/km para los dos años, se encuentran muy cercanos al valor universal de 6°C/km (Berry, 1981), y dentro de lo esperado para zonas montañosas de latitudes templadas (op. cit.). Sin embargo, es interesante notar que el *lapse-rate* puede variar considerablemente de un año a otro. Evidentemente, registros de temperatura por un mayor número de años son deseables para llegar a un valor más estable.

La variación estacional de la tasa de enfriamiento adiabático del aire parece ser un fenómeno común en varias zonas del mundo (Tabla 3). En general, los valores más altos tienden a encontrarse durante los meses cálidos, mientras que los valores más bajos se encuentran en los meses de invierno (Berry, 1981). En este estudio la variación estacional va desde 4,4°C/km a 7,1°C/km entre invierno y verano de 1995 y entre 5,1°C/km a 7,6°C/km entre invierno y verano de 1996, valores que estarían dentro de la variación estacional esperada basados en el conocimiento actual (Tabla 3). Esta variación estacional se debe a que en invierno el aire contiene más humedad lo que mitiga las diferencias altitudinales de su densidad disminuyendo por lo tanto la tasa de enfriamiento adiabático del aire. En el verano el aire es más seco y por lo tanto tiene un comportamiento más cercano a un gas ideal, donde el valor de *lapse-rate* esperado es 10°C/km (Berry, 1981).

Squeo (1990) en un estudio del clima de verano en Cerro Diente y Cerro Santa Lucía, ubicados a 50°S en la Patagonia chilena, reporta valores del *lapse-rate* de 6,8 y 9,8°C/km, respectivamente. En el caso del Cerro Santa Lucía ubicado más hacia el interior del continente, con un clima mucho más seco, la tasa de enfriamiento adiabático del aire es más alta que los cálculos para el sector del valle del río Molina. Esto es concordante con la mayor sequedad del aire en esa zona. En el caso de cerro Diente, ubicado más cerca del océano Pacífico, con un clima más húmedo, el valor del *lapse-rate* es menor que en el valle del río Molina. Comparando los valores de *lapse-rate* obtenidos con los reportados en la literatura para otras zonas de alta montaña fuera de Chile (Tabla 3), se destaca que tanto en la Sierra

Nevada como en la cordillera de Chile central, ambas con climas tipo mediterráneo, el *lapse-rate* de verano es casi idéntico.

TABLA 3

Valores de la tasa de enfriamiento adiabático del aire (*lapse-rate*) para algunas localidades de Australia, Chile, Estados Unidos y Japón.

Localidad	Latitud	Lapse-rate		Referencia
		Invierno	Verano	
Cerro Diente	50°S		6,8	1
Cerro Santa Lucía	50°S		9,8	1
Valle Nevado 1995	33°S	4,4	7,1	2
Valle Nevado 1996	33°S	5,1	7,6	2
Monte Fuji	40°N	5,4	6,1	3
Alpes Australianos	20°S	4,9	6,0	3
Sierra Nevada	34°N		7,8	4

1: Squeo (1990); 2: Este estudio; 3: Berry (1981); 4: Chabot & Billings (1972).

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al centro de esquí Valle Nevado, en especial al señor Samuel Bahamondes por todas las facilidades brindadas en la instalación y mantención de las estaciones meteorológicas. Este estudio ha sido financiado por los proyectos Fondecyt 2-95-0072 (LC) y 1-95-0461 (MTK). Lohengrin Cavieres agradece además el financiamiento de sus estudios de postgrado a la Fundación A.W Mellon, USA. Redacción final del manuscrito financiada por la Cátedra Presidencial en Ciencias a Mary T.K. Arroyo.

## REFERENCIAS

- ANTONIOLETTI, R.; SCHNEIDER, H.; BORCOSQUE, J. L. & ZARATE, E. (1974). Características climáticas del Norte Chico. Instituto de Investigaciones de Recursos Naturales N° 40595, Santiago, Chile.
- ARROYO, MTK.; VILLAGRAN, C. & ARMESTO, J. (1981). Plant phenological patterns in the high Andes Cordillera of central Chile. *Journal of Ecology* 69:205-223.
- BERRY, R.G. (1981). *Mountain Weather and Climate*. Methuen & Co. Ltda., London, 313 pp + xi.
- DI CASTRI, F. & HAJEK, E. (1976). *Bioclimatología de Chile*. Ediciones de la Pontificia Universidad Católica de Chile. p. 128.
- FUENZALIDA, H. (1965). Clima. En H. Fuenzalida (Ed.) *Geografía Económica de Chile*, Corporación de Fomento de la Producción, Santiago, pp. 188-257.
- MANI, M.S. (1978). *Ecology and Phytogeography of High-altitude Plants in Northwest Himalaya*, Chapman and Hall Ltd., p.205.

ROZZI, R; MOLINA, J. D. & MIRANDA, P. (1989). Microclima y períodos de floración en laderas de exposición ecuatorial y polar en los Andes de Chile central. *Revista Chilena de Historia Natural*, 62:75-84.

SANTIBAÑEZ, F. & URIBE, J. M. (1990) Atlas Agroclimático de Chile. Regiones V y Metropolitana. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.

SQUEO, F. (1990). Estructura de comunidades vegetales andinas en relación con la polinización en la cordillera de los Baguales, Patagonia, Chile. Tesis Doctorado, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, p. 263.