

### CLIMATOLOGIA ACTUAL DEL CAMPO DE HIELO SUR Y POSIBLES CAMBIOS POR EL INCREMENTO DEL EFECTO INVERNADERO

#### CURRENT CLIMATOLOGY OF THE SOUTHERN ICEFIELD AND POSSIBLE CHANGES BY AN INCREASE OF THE GREENHOUSE EFFECT.

Jorge F. Carrasco<sup>1</sup> Gino Casassa<sup>2</sup> & Andrés Rivera<sup>3</sup>

#### RESUMEN

El Campo de Hielo Sur (CHS) con una extensión promedio de 13.000 km<sup>2</sup>, se encuentra ubicado entre los 48 y 51°S en la región sur austral de Sudamérica, la cual está predominada por el flujo del oeste de las latitudes medias, viéndose afectada frecuentemente por el paso de depresiones frontales, lo que caracteriza un régimen de precipitación con distribución homogénea a lo largo del año. El CHS no está ajeno a sufrir los efectos de un cambio climático en la zona como consecuencia del incremento de los gases invernadero. De acuerdo a los resultados de modelos de escala global, se espera un aumento de la temperatura superficial y troposférica en la región del CHS y un cambio en el régimen pluvial con menor precipitación en verano y mayor en invierno respecto al presente. Un aumento de la precipitaciones líquidas y una elevación de la línea de nieve puede incidir en una reducción de la actual extensión del CHS. Se postula que el retroceso generalizado que ha sido observado en los glaciares es una consecuencia del aumento de la temperatura en la región austral sur, probablemente evidenciando, al menos en parte, una intensificación antropogénica del efecto invernadero.

Palabras clave: Cambio climático, campos de hielo, temperatura, precipitación.

#### ABSTRACT

The Southern Patagonia Icefield (SPI), with an area of 13,000 km<sup>2</sup> is located between 48 and 51°S in Southern South America. In this region mid-latitude westerlies predominate,

1 Dirección Meteorológica de Chile, Casilla 717, Correo Central, Santiago.  
2 Instituto de la Patagonia, Universidad de Magallanes, Casilla 113-D, Punta Arenas  
3 Depto. Geografía, Universidad de Chile, Marcoleta 250, Santiago.

being frequently exposed to frontal lows, which result in a homogeneous precipitation regime throughout the year. This area would also suffer from the effect of an increase in greenhouse gases. According to results from global models, an increase in tropospheric and surface temperature is predicted for the area around SPI, with a simultaneous lowering of the summer precipitation and an increase in winter precipitation. The increase of liquid precipitation and a rise of the equilibrium line altitude could result in a decrease of the extent of the SPI. The current generalized retreat of glaciers of SPI is postulated to be a consequence of the temperature increase in southern South America, which is probably, at least partly due to an anthropogenic greenhouse effect.

Keywords: Climate change, Patagonia Icefield, temperature, precipitation.

## INTRODUCCION

Estudios de la variabilidad y evolución del clima indican que el aumento global de la temperatura del aire observado en los últimos siglos, a partir de la revolución industrial es, al menos parcialmente, producto del incremento de la concentración atmosférica de los «gases invernadero» debido a actividades humanas. El impacto de este calentamiento puede ser detectado tempranamente en la criósfera, en donde las extensiones de la superficie de nieve/hielo, y los glaciares se ven rápidamente afectados (IPCC 1990, 1996).

El Campo de Hielo Sur (CHS) con una extensión aproximada de 13.000 km<sup>2</sup> (Aniya *et al.* 1992) se encuentra ubicado entre los paralelos 48 y 51°S, y no está ajeno a los efectos de un calentamiento de la atmósfera inferior. En este artículo se presentan algunos aspectos climatológicos que caracterizan la región del CHS y se exploran algunos impactos que podría sufrir la climatología del lugar como consecuencia del incremento sostenido del CO<sub>2</sub> y otros gases invernadero, según las proyecciones realizadas por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC 1990, 1996).

### Aspectos generales

El relieve de la región en donde se encuentra inserto el CHS puede dividirse longitudinalmente en tres sectores orográficamente diferenciables (Fig. 1). Desde el oeste, el primero formado por un elevado número de islas, fiordos y canales; el segundo está definido por la cordillera de los Andes, relativamente baja a esta latitud, con cumbres máximas promedio de 2.500 m y algunas pocas que exceden 3.000 m, formando un altiplano de hielo que constituye el CHS, con numerosos

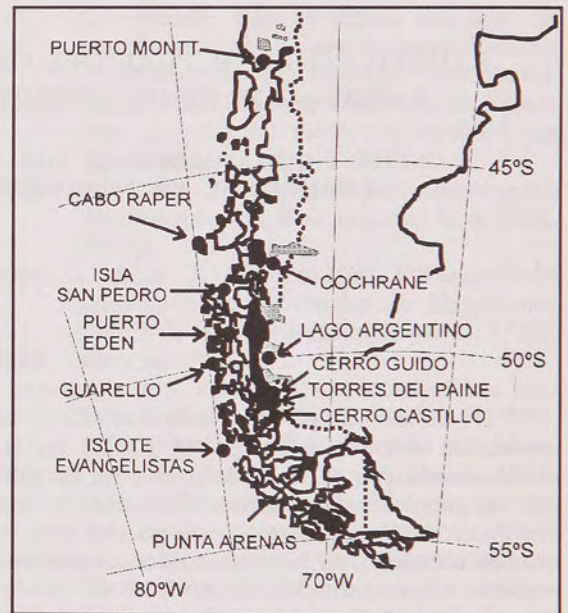


Fig. 1. Mapa de localización geográfica incluyendo las estaciones meteorológicas usadas.

glaciares que desaguan abruptamente hacia ambos lados de la cordillera; y el tercero correspondiente a la vertiente oriental de la cordillera caracterizada por un relieve más suave y la presencia de grandes lagos pedemontanos.

El CHS se ubica en su totalidad dentro del cinturón de los vientos del oeste que predominan al sur de Puerto Montt. El régimen climático sinóptico presenta poca variabilidad a través del año, estando la región permanentemente afectada por el paso de depresiones frontales, siendo éstos los principales responsables de la precipitación en la región austral de Sudamérica (Endlicher &

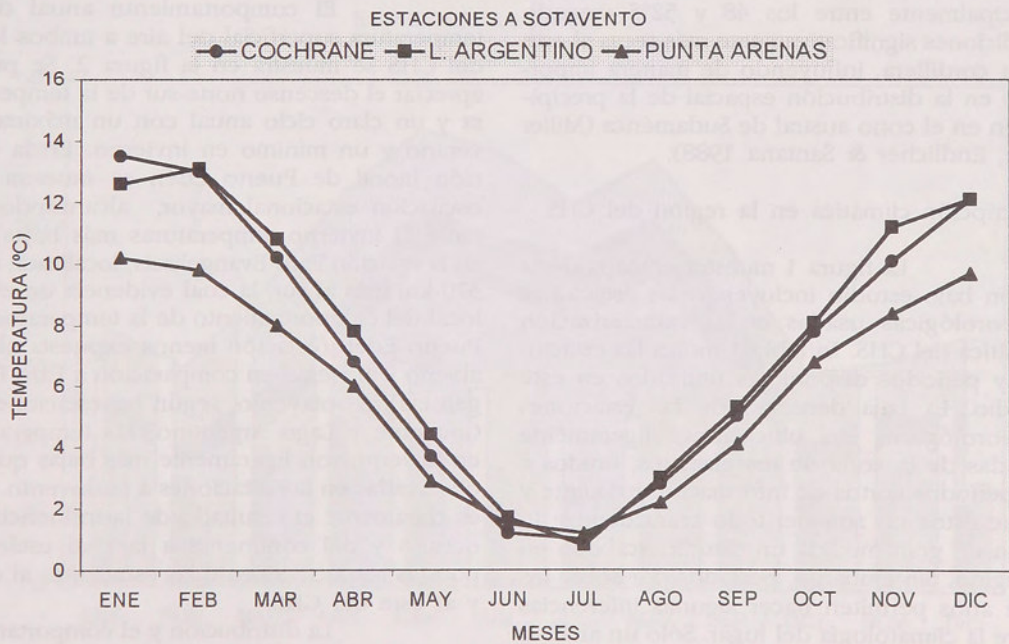
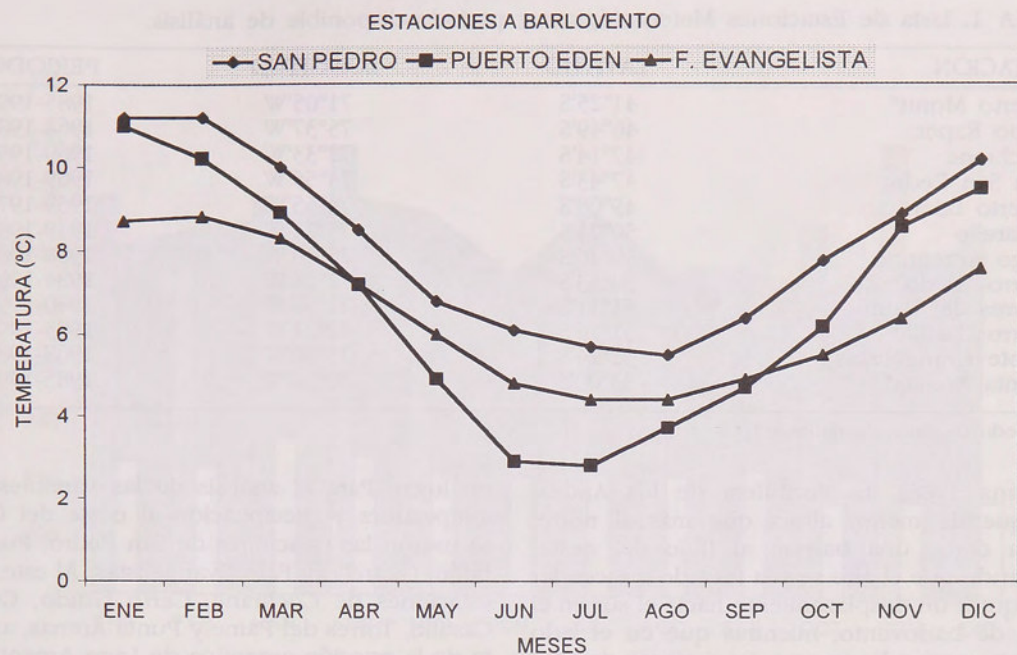


Fig. 2. Curvas de temperaturas a barlovento y a sotavento en estaciones cercanas al Campo de Hielo Sur.

TABLA 1. Lista de Estaciones Meteorológicas y período disponible de análisis.

ESTACION	LATITUD	LONGITUD	PERIODO
Puerto Montt*	41°25'S	71°05'W	1985-1994
Cabo Raper	46°49'S	75°37'W	1964-1983
Cochrane	47°14'S	72°33'W	1969-1991
Isla San Pedro	47°43'S	74°55'W	1969-1983
Puerto Edén	49°08'S	74°55'W	1959-1973
Guarello	50°21'S	75°21'W	1949-1985
Lago Argentino	50°20'S	75°18'W	1968-1983
Cerro Guido	50°53'S	72°24'W	1984-1994
Torres del Paine	51°11'S	72°58'W	1980-1994
Cerro Castillo	51°16'S	72°21'W	1983-1994
Islote Evangelistas	52°24'S	75°06'W	1968-1983
Punta Arenas*	53°00'S	70°54'W	1985-1994

\* Período de datos de radiosondas

Santana 1988). La cordillera de los Andes, aunque de menor altura que más al norte, actúa como una barrera al flujo del oeste, haciendo que el aire se vea forzado a ascender y adquirir un desplazamiento hacia el sur en el lado de barlovento, mientras que en el lado de sotavento adquiere un movimiento descendente. De este modo, los Andes Patagónicos favorecen la precipitación en la región insular, principalmente entre los 48 y 52°S creando condiciones significativamente más secas al este de la cordillera, influyendo de manera importante en la distribución espacial de la precipitación en el cono austral de Sudamérica (Miller 1976, Endlicher & Santana 1988).

#### Descripción climática en la región del CHS

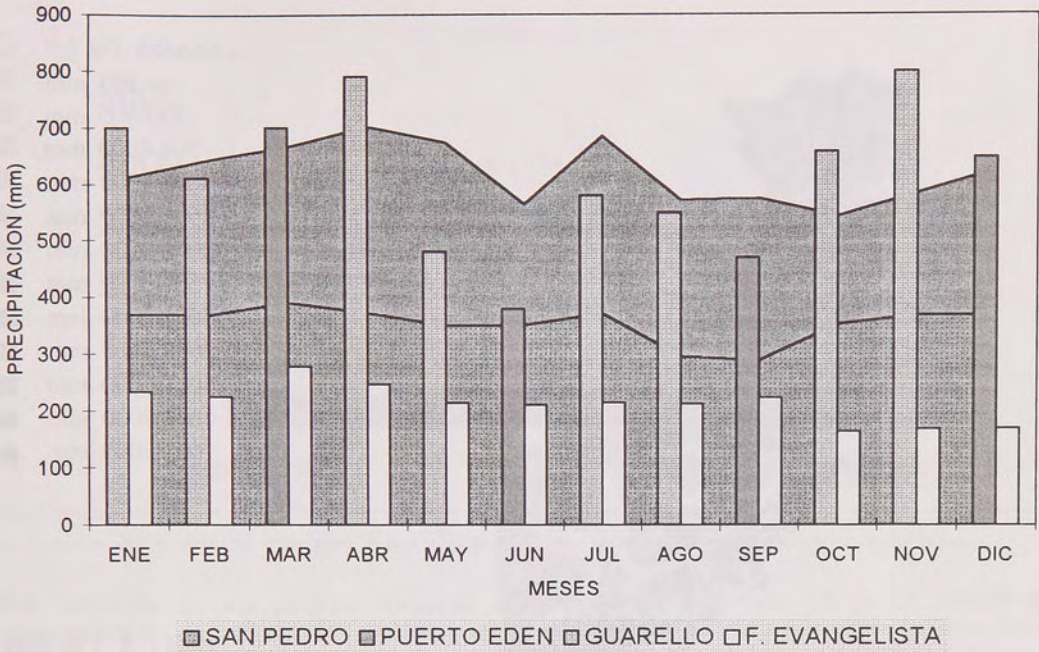
La figura 1 muestra el mapa de la región bajo estudio incluyendo las estaciones meteorológicas usadas en la caracterización climática del CHS. La tabla 1 indica las estaciones y períodos disponibles utilizados en este estudio. La baja densidad de las estaciones meteorológicas, sus ubicaciones ligeramente alejadas de la zona de los glaciares, unidos a los períodos cortos de información existente y a que éstos no son del todo coincidentes; limitan en gran medida un estudio acabado en la región. Sin embargo, períodos por sobre los siete años permiten hacer algunas inferencias sobre la climatología del lugar. Sólo un análisis de la temperatura superficial del aire y de la precipitación es realizado en este estudio. Estas dos variables son las más comúnmente consideradas para la definición del clima en

un lugar. Para el análisis de las variables de temperatura y precipitación al oeste del CHS se usaron las estaciones de San Pedro, Puerto Edén, Guarello y Faro Evangelistas. Al este, las estaciones de Cochrane, Cerro Guido, Cerro Castillo, Torres del Paine y Punta Arenas, aparte de la estación argentina de Lago Argentino, obtenida del *Monthly Climate Data for the World*.

El comportamiento anual de la temperatura superficial del aire a ambos lados del CHS se muestra en la figura 2. Se puede apreciar el descenso norte-sur de la temperatura y un claro ciclo anual con un máximo en verano y un mínimo en invierno. En la estación litoral de Puerto Edén se muestra una oscilación estacional mayor, alcanzando durante el invierno temperaturas más bajas que en la estación Faro Evangelistas, localizada unos 370 km más al sur, la cual evidencia un efecto local del comportamiento de la temperatura en Puerto Edén (estación menos expuesta al mar abierto y al viento en comparación a Faro Evangelistas). A sotavento, según las estaciones de Cochrane y Lago Argentino, las temperaturas en invierno son ligeramente más bajas que las observadas en las estaciones a barlovento. Esto es claramente el resultado de la influencia del océano y del continente a la cual están expuestas respectivamente las estaciones al oeste y al este del CHS.

La distribución y el comportamiento anual de la precipitación se muestran en la figura 3. Es evidente el efecto de la orografía que induce a una mayor precipitación en el sector insular, a barlovento, decreciendo

ESTACIONES A BARLOVENTO



ESTACIONES A SOTAVENTO

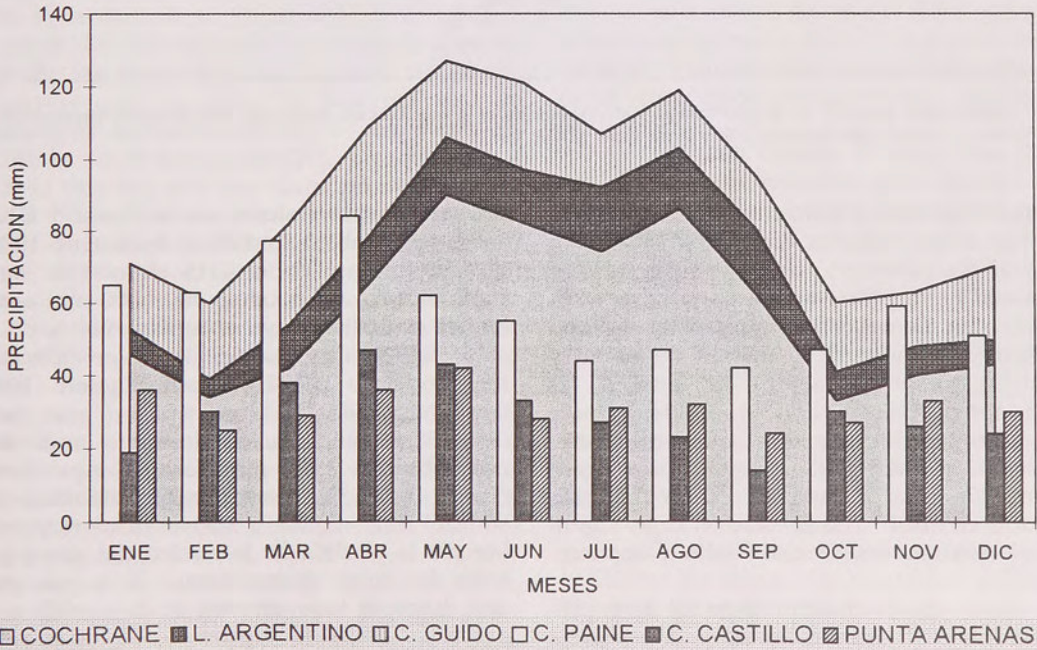


Fig. 3. Curvas de precipitación a barlovento y a sotavento del Campo de Hielo Sur. Las estaciones se designan mediante líneas o barras según se indica.

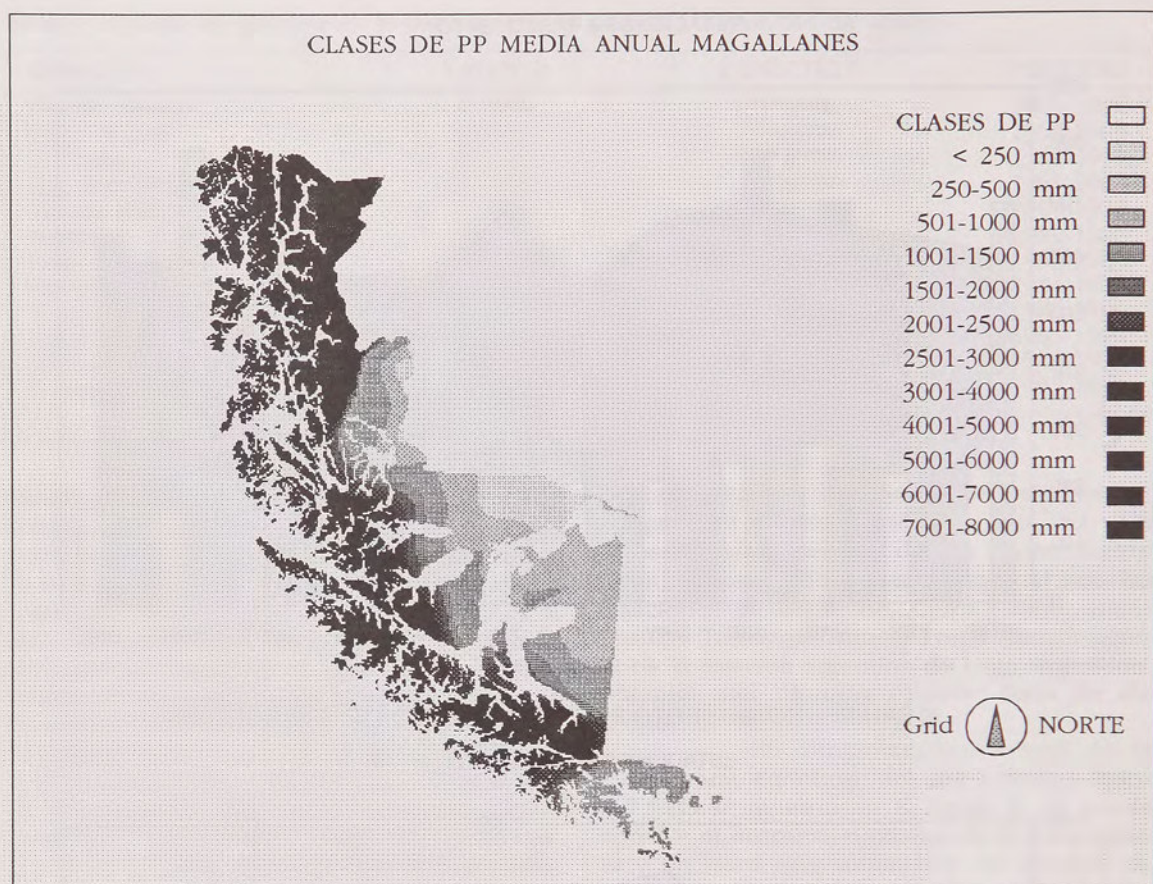


Fig. 4. Distribución espacial de la precipitación anual. Los tonos grises indican rangos de precipitación expresados en mm. Valores tomados del Balance Hídrico de Chile (DGA 1987).

significativamente a sotavento de la cordillera (ver Fig. 1 en Endlicher & Santana 1988). En general se observa una homogeneidad estacional en la precipitación en la costa insular, salvo en Guarello que muestra un máximo en abril y en noviembre (meses de otoño y primavera, respectivamente). En cambio, las estaciones de Cerro Guido, Torres del Paine y Cerro Castillo, ubicadas inmediatamente al este del sector sur del CHS, presentan un ligero máximo de precipitación en otoño (también centrado en abril) y en la estación Lago Argentino el máximo ocurre entre julio y septiembre.

La distribución espacial de la precipitación anual, usando los datos de todas las estaciones de la zona y considerando una relación lineal del efecto de la orografía en la

precipitación se muestra en la figura 4 (DGA 1987; ver también Endlicher & Santana 1988), que indica que en el CHS el total de agua caída alcanza un máximo de 8.000 mm anuales, el cual disminuye abruptamente hacia el este. Similar distribución de la precipitación fue modelada por Hulton & Sugden (1995) cuyos resultados indican que en gran parte del CHS la precipitación de nieve anual está por sobre los 2.000 mm de agua equivalente (ver su figura 3). La compresión adiabática que sufre el flujo de aire a sotavento es responsable por la pérdida de humedad del aire y por ende del fuerte decrecimiento de la precipitación hacia el lado oriental de la cordillera.

En la figura 5 se encuentra graficada la altura media de la isoterma cero para el mes de enero y julio del período 1985-

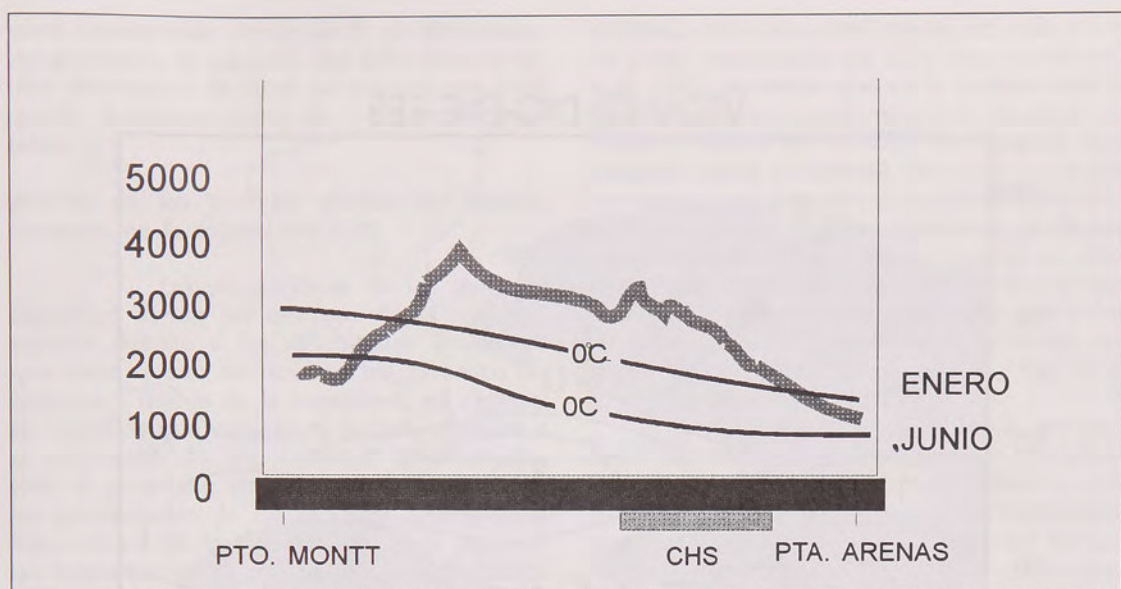


Fig. 5. Altura de la isoterma cero para enero y junio. La línea gruesa indica la línea de altas cumbres.

1994, obtenido de los perfiles verticales de temperatura de los radiosondas diarios que se realizan en Puerto Montt y Punta Arenas, y ajustado de acuerdo al descenso medio de la temperatura con la altura, estimado en  $0,55^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  de acuerdo al promedio de los sondeos a partir de los valores medios a nivel de superficie de las estaciones de la zona. Se puede observar que en enero la isoterma cero se encuentra aproximadamente a una altura de 2.000 m en el sector del CHS, y entre 1.000 y 800 m en julio, con una altura promedio anual de 1.450 m. Es interesante comparar estas alturas de la línea de nieve sobre los glaciares al final del verano, conocida como «línea de equilibrio», que fluctúa, en promedio, entre 1.000 y 800 m de altura en el sector occidental del CHS, siendo ligeramente superior en el lado oriental (Casassa 1995).

El hecho que la línea de equilibrio en el CHS se sitúe unos 500 m por debajo de la isoterma anual de cero grados centígrados indica la importancia de la precipitación de nieve en el balance de masas de los glaciares, resultando en un descenso de la línea de nieve debido al flujo de los glaciares, que de esta manera eliminan principalmente mediante fusión y desprendimiento de témpanos el exceso de masa que precipita en forma de nieve en las zonas altas (Rivera *et al.* 1997).

Otra consecuencia de la ubicación de la isoterma cero muy por sobre la línea de equilibrio es que el hielo del CHS es del tipo templado, vale decir está al punto de fusión durante todo el año. En las zonas de montaña que se encuentran fuera del CHS, pero que tienen una altura similar a la isoterma cero de invierno, ocurren áreas periglaciales con procesos criológicos característicos (Andrade & Peña 1993).

Los vientos de superficie predominan del oeste-noroeste con algunas variaciones por efecto local asociado a la orografía, existiendo en altura una marcada dirección del oeste a través del año. La constancia del régimen zonal se acentúa sobre los 1.500 m con una intensidad promedio estimada de  $10$  a  $15\text{ m s}^{-1}$  entre los 2.000 y 3.000 m en la zona del CHS. Los vientos predominantes que afectan a la región obedecen a la distribución promedio de la presión atmosférica, la cual muestra un fuerte gradiente entre el extremo austral y sur del continente (Miller 1976).

Como resultado de la frecuente actividad frontal en la región austral del país, el CHS se encuentra con abundante nubosidad la mayor parte del año. La media diaria anual indica que aproximadamente 75% del cielo se encuentra cubierto de nubosidad. A nivel anual, el número de días con cielos cubiertos en la

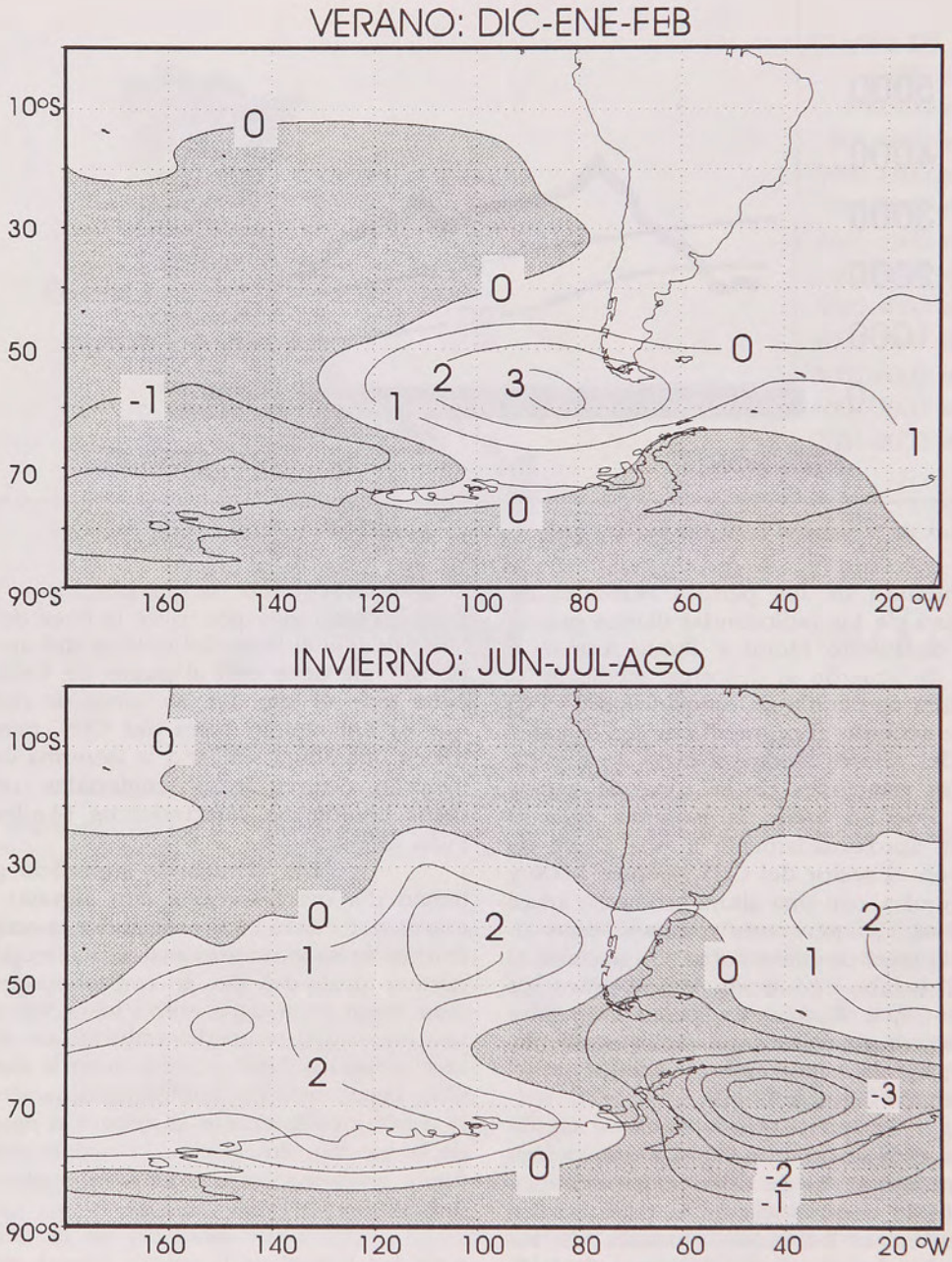


Fig. 6. Reproducción parcial de los cambios de la presión media del mar debido a la duplicación del CO<sub>2</sub>, según la simulación del modelo del Centro Climático Canadiense. Verano: Diciembre-Enero-Febrero. Invierno: Junio-Julio-Agosto (Mitchel *et al.* 1992)

costa corresponde alrededor de un 80%, estando asociados la mayoría del 20% restante de días despejados al paso de anticiclones fríos que se desplazan detrás de los sistemas frontales.

Análisis de los posibles efectos del cambio climático en la región del CHS.

Las predicciones de los modelos climáticos deben ser siempre vistos con precaución debido a las dificultades inherentes que estos tienen en resolver los procesos dinámicos y físicos de la atmósfera, en especial de aquellos que ocurren a escalas menores a la resolución de los modelos. Sin embargo, para el propósito de este trabajo se analizan las predicciones de los modelos para estimar los cambios en la climatología de la zona en un futuro escenario en donde la concentración de los gases invernadero, en especial el  $\text{CO}_2$ , estén aumentados al doble de los valores actuales.

El aumento de la temperatura superficial de aire se estima en la región en un rango de 0,2 a 6,0 °C en verano y entre 2,0 a 4,0 °C en invierno, según diversos modelos climáticos que simulan el efecto sobre el clima para una atmósfera con el doble de  $\text{CO}_2$  respecto al presente (IPCC 1990, 1996). El calentamiento superficial anual durante el presente siglo se estima entre 0,3 y 3,0 °C en 100 años en la región (Rosenbluth *et al.* 1995), con una tendencia lineal de entre 1,3 a 2,0 °C en 100 años, basado en el período homogeneizado entre 1933 y 1992 y con valores que alcanzan al doble en las últimas tres décadas (Rosenbluth *et al.* 1997). En la estación de Faro Evangelistas se ha detectado un calentamiento total de 0,7 °C en el período 1901-1988 (Aceituno *et al.* 1993), y un calentamiento del mismo orden en otras estaciones del cono sur de Sudamérica, las que validan, en parte, el aumento previsto por los modelos. A pesar de la incertidumbre de los valores pronosticados, en promedio la amplitud térmica anual no mostraría una variación significativa con respecto al presente. El aumento de la temperatura del aire superficial pronosticada por los modelos, puede indicar a su vez una elevación de la isoterma cero y consecuentemente de la altura de la línea de nieve.

De acuerdo a los cambios que

sufriría la presión a nivel medio del mar debido a una duplicación del  $\text{CO}_2$  (Fig. 6; Mitchell *et al.* 1992) se estima que en la zona austral la presión sería levemente mayor a la actual en verano y menor en invierno. Esto sugiere una amplitud anual levemente mayor al presente. Las variaciones del campo de presión pronosticado en verano (Fig. 6) sugieren un gradiente horizontal más débil, implicando que en promedio los vientos en la zona austral serían más débiles respecto al presente. Por otro lado, en invierno se insinúa un leve aumento del gradiente horizontal de la presión (Fig. 6) y por ende de los vientos.

La alta incertidumbre de los modelos climáticos en el pronóstico de precipitación no permite analizar este parámetro con confiabilidad. Sin embargo, algunas inferencias pueden ser obtenidas del análisis del campo de presión pronosticado (Fig. 6), el cual refleja los cambios de la actividad ciclónica y anticiclónica respecto al presente que podrían esperarse ante un cambio global por efecto del incremento de los gases invernadero. Así, las diferencias positivas centradas al suroeste del cono sur en verano y las negativas centradas en el sector sur del océano Atlántico en invierno; sugieren veranos e inviernos con menor y mayor actividad ciclónica, respectivamente. Esto implica un cambio del régimen pluviométrico en la zona austral y por ende en el CHS con tendencia a invierno más lluviosos que en la estación de verano. Es decir, habría un comportamiento estacional, quizás parecido al observado en la estaciones ubicadas al norte del CHS (ver por ejemplo, Cochrane en Fig. 3). En términos de totales anuales de precipitación, probablemente no se observen cambios significativos. Por otra parte, se espera un calentamiento troposférico que elevaría la isoterma cero por sobre los valores actuales, limitándose las precipitaciones de nieve a los sectores más elevados de la cordillera y por ende se esperaría una reducción del volumen nivoso del actual CHS.

## CONCLUSIONES

De acuerdo a lo descrito, el sector de los hielos patagónicos se encuentra inmerso en la circulación del oeste afectado por el paso frecuente de depresiones frontales, lo que trae como consecuencia una distribu-

ción mensual de precipitaciones casi homogénea a través del año. La orografía juega un rol importante en la distribución espacial de la precipitación en la región, siendo mayor en el lado oeste del CHS y disminuyendo abruptamente hacia el este. De acuerdo a las inferencias de los cambios esperados en el campo de presión a nivel del mar debido al aumento de los gases invernadero, se puede esperar un incremento (disminución) de las precipitaciones en invierno (verano), que sólo en los sectores más altos ocurriría en forma de precipitación de nieve en el CHS debido al levantamiento de la actual línea de nieve.

El calentamiento observado en la tropósfera en las latitudes medias según el radiosonda de Puerto Montt (estudio realizado por Aceituno *et al.* 1993), el calentamiento en el cono sur según Rosenbluth *et al.* (1997) y el retroceso mayoritario de los glaciares de la zona que Naruse *et al.* (1995) han reportado en sus investigaciones, a pesar que existen avances aislados de glaciares (*e.g.* Rivera *et al.* 1997), pueden ser indicativos del actual y progresivo calentamiento troposférico como respuesta al aumento de la concentración de los gases invernadero.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Proyecto FONDECYT N°1950722 y 1980293 y por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). La información meteorológica usada fue gentilmente proporcionada por la DMC y la Dirección General de Aguas.

#### LITERATURA CITADA

- Aceituno, P., H. Fuenzalida & B. Rosenbluth 1993. Climate along the extratropical west coast of South America. Pp. 61-69 *In: Earth System Responses to Global Change: Contrasts between North and South America* Academic Press.
- Andrade, B. & H. Peña 1993. Chilean Geomorphology and Hydrology: Response to Global Change. Pp. 101-113 *In: Earth System Responses to Global Change: Contrasts between North and South America*. Academic Press.
- Aniya, M., R. Naruse, M. Shizukuishi, P. Skvarca & G. Casassa 1992. Monitoring recent glacier variations in Southern Patagonia Icefield, utilizing remote sensing data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 29(B7): 87-94.
- Casassa, G. 1995. Glacier inventory in Chile: current status and recent glacier variations. *Annals of Glaciology*, 21:317-322.
- Dirección General de Aguas 1987. Balance Hídrico de Chile, Santiago.
- Endlicher, W. & A. Santana 1988. El clima del sur de la Patagonia y sus aspectos ecológicos. Un siglo de mediciones climatológicas en Punta Arenas. *Anales Instituto Patagonia*, Serie Cs. Nat. (Chile) 18:57-86.
- Hulton, N.R.J. & D.E. Sudgen 1995. Modelling mass balance on former maritime ice caps: a Patagonia example. *Annals of Glaciology*, 21:304-310.
- IPCC 1990. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. J.T. Houghton, G.J. Jenkins & J.J. Ephraums (eds). Cambridge University Press., Cambridge, U.K.
- IPCC 1996. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change IPCC*. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg & K. Maskell (eds). Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Miller, A. 1976. The climate of Chile. Pp. 113-145 *In: W. Schwerdtfeger (ed.) Climate of Central and South America*. Amsterdam, Elsevier (World Survey of Climatology, Vol. 12).
- Mitchel, J.F.B., S. Manabe, T. Tokioka & V. Meleshko 1990. Equilibrium Climate Change. Cambio Climático en Equilibrio. *Climate Change: The IPCC Impacts Assessment*, 131-172.
- Naruse, R., M. Aniya, P. Skvarca & G. Casassa 1995. Recent variation of calving glaciers in Patagonia, South America, revealed by ground survey, satellite-data analyses and numerical experiments. *Annals of Glaciology*, 21: 297-303.
- Rivera, A., J.C. Aravena & G. Casassa 1997. Recent fluctuation of glacier Pío XI, Patagonia: discussion of a glacial surge hypothesis. *Mountain Research and Development* 17(4): 309-322.
- Rosenbluth, B., G. Casassa & H. Fuenzalida 1995. Recent climatic changes in western Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 13: 127-132.
- Rosenbluth, B., H. Fuenzalida & P. Aceituno 1997. Recent temperature variations in Southern South America. *International Journal of Climatology* 17:67-85.