

ADELGAZAMIENTO Y DINÁMICA EN LA ZONA DE ABLACION DEL GLACIAR TYNDALL, CAMPO DE HIELO PATAGÓNICO SUR.

José Araos¹, María Angélica Godoi^{1,2} & Rubén Carvallo^{1,3}.

RESUMEN.

El Campo de hielo Patagónico Sur (CHPS) representa una de las mayores regiones englaciadas del hemisferio sur después de la Antártica. Gran parte de los glaciares que constituyen el CHPS han manifestado un adelgazamiento y retroceso de sus frentes, tales cambios pueden estar directamente relacionados con el calentamiento climático global.

En este trabajo se presentan las variaciones recientes en la elevación de la superficie del hielo y se describen las características de la dinámica en un sector de la zona de ablación del glaciar Tyndall, uno de los efluentes mayores del CHPS. Mediciones puntuales en 5 balizas de posiciones conocidas sobre la superficie glaciar permitieron estimar un adelgazamiento promedio de 2,63 m, entre marzo de 2002 y noviembre de 2003. La comparación de cotas superficiales de una red de 70 posiciones georreferenciadas en enero de 2003 con cotas extraídas de un modelo de elevación digital de terreno SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) del año 2000 indica una tasa de adelgazamiento del orden de $2,69 \pm 1,23 \text{ m a}^{-1}$.

La dirección y velocidad de flujo superficial de hielo fueron estimadas mediante un monitoreo del desplazamiento de balizas cuya posición fue medida en noviembre de 2003 y mayo de 2004. Se detectaron velocidades de flujo del orden de 18 m a^{-1} cerca del margen del glaciar. En un sector localizado aproximadamente a 3 km al oeste del margen la velocidad del flujo de hielo en el periodo fue de 270 m a^{-1} .

Palabras clave: Campo de Hielo Patagónico Sur (CHPS), glaciar Tyndall, dinámica, Adelgazamiento.

ABSTRACT.

The Southern Patagonia Icefield (SPIF) is the largest ice mass in the Southern Hemisphere excluding Antarctica. Most of its glaciers have shown thinning and retreat of their fronts, changes that might be directly related to global warming.

In this work we present recent variations in the ice-surface elevation and describe the ice-flow dynamic of an area located in the ablation zone of the Tyndall glacier, one of the major effluents of the SPIF. Discrete measurements of 5 stakes, located at known positions on the glacier surface, allowed to estimate an average thinning of about 2.63 m, between March 2002 and November 2003. Comparison of surface elevation for a net of 70 positions measured in the field in January 2003 with data obtained from a digital elevation model SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) for the year 2000, suggests a

¹ Fundación CEQUA (Centro de Estudios del Cuaternario). Av. Bulnes # 01890. Casilla 113 – D. Punta Arenas. jose.araos@gmail.com

² Dirección de programas Antárticos (DPA). Universidad de Magallanes.

³ Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Magallanes.

thinning rate of about $2.69 \pm 1.23 \text{ m a}^{-1}$.

Ice flow velocity and direction were estimated by comparing the position of stakes in two consecutive measurements, carried out in November 2003 and May 2004. Values of approximately 18 m a^{-1} were determined for the ice flow velocity near the glacier margin. In an area located about 3 Km west of the margin that was about 270 m a^{-1} .

Key words: Southern Patagonian Ice Field (SPIF), Tyndall glacier, glacier dynamic, ice-surface elevation.

INTRODUCCIÓN.

El CHPS representa el mayor cuerpo de hielo temperado de Sudamérica (Warren & Sudgen 1993). Con un área de 13.000 Km^2 , se considera como la tercera superficie cubierta de hielo del mundo, atribuyéndosele un importante rol en el sistema climático global (Nishida *et al.* 1995). La mayoría de los glaciares del CHPS han manifestado retrocesos de sus frentes desde el siglo pasado. Mediciones discretas de cambios de espesor en las zonas de ablación de algunos glaciares indican un rápido adelgazamiento (Aniya 1999). Tales variaciones pueden ser una respuesta al calentamiento atmosférico detectado en el sector austral de América del Sur en las últimas décadas (Carrasco *et al.* 2002; Rosenblüth *et al.* 1995).

En una etapa anterior a la década de 1980 los estudios de la relación clima - glaciares en la región Patagónica eran escasos (Casassa 1992; Nishida *et al.* 1995). Hoy en día, la disponibilidad de nuevos métodos y herramientas para el análisis detallado de las características de los cuerpos de hielo, han permitido la materialización de una serie de estudios que den cuenta de la relación entre comportamiento glacial y cambio climático. Con objeto de lograr un entendimiento más detallado de esta relación, se hace necesaria la sistematización de estudios glaciológicos utilizando métodos directos e indirectos, sobre todo en aquellas áreas que han presentado cambios drásticos durante el último siglo.

El Grupo de Glaciología y Geociencias del CEQUA en conjunto con la Dirección de Programas Antárticos (DPA) de la UMAG ha desarrollado una serie de campañas glaciológicas en la zona de ablación del glaciar Tyndall, en particular en el área denominada lóbulo Zapata Sur (nombre no oficial). Estos estudios han comprendido mediciones de radio-eco sondeo para estimar espesores de hielo (Godoi *et al.* 2003) y el control de la posición de

balizas para estimar la pérdida de masa y la dinámica superficial del glaciar.

Este trabajo presenta las variaciones recientes en la elevación superficial del hielo, estimada mediante mediciones en terreno y comparación de cotas de altura con un método indirecto. Se presentan además las características de la dinámica superficial del glaciar obtenidas mediante el control de la posición de balizas. En el aspecto metodológico se evalúa la aplicación de un método de observación indirecta el cual fue empleado por Krimell (1990) en el South Cascade glacier, Washington, para el estudio del balance de masa de los glaciares, y que resulta útil para estimar el adelgazamiento del hielo.

ÁREA DE ESTUDIO.

El glaciar Tyndall se localiza en el Parque Nacional Torres del Paine. De carácter temperado, este glaciar es uno de los más australes del CHPS. Según Aniya (1995) el glaciar Tyndall cuenta con un área aproximada de 340 km^2 y un largo de 32 km, por lo que correspondería al octavo glaciar más grande del CHPS. La lengua principal del glaciar, orientada hacia el sur presenta un frente de desprendimiento o calving en los lagos Tyndall (100 ms.n.m) y Geikie (85 m.s.n.m), los que se encuentran separados por un afloramiento rocoso. Ambos frentes de calving están retrocediendo desde 1945 y han manifestado un incremento en las tasas de retroceso desde 1986 (Rivera & Casassa 2004).

En el margen este del glaciar Tyndall y aproximadamente a 16 km aguas arriba desde el frente, se localiza una estribación lateral que se conoce como lóbulo Zapata Sur (Fig. 1). Rivera & Casassa (2004) y Raymond *et al.* (2005) asignan a este sector del glaciar el nombre de Lengua Este. El área de estudio, cuya topografía superficial es de carácter suave, difluje hacia el oriente y presenta una elevación cercana a los 700 ms.n.m. (Godoi *et al.* 2003).

El lóbulo Zapata Sur ha manifestado un claro retroceso durante los últimos 50 años, llegando a generar un pequeño lago proglaciar (Rivera & Casassa 2004). Mediante una comparación de la posición de su margen en el año 2003 con cartografía regular del Instituto Geográfico Militar (I.G.M), basada en las fotografías aéreas de 1975, se detectó una pérdida de área de aproximadamente $1,3 \text{ Km}^2$. (Godoi *et al.* 2003).

Los primeros estudios sobre el adelgazamiento del hielo en el sector del lóbulo Zapata Sur fueron realizados por Kadota *et al.* (1992) quienes lograron estimar una pérdida de $4,0 \text{ m a}^{-1}$ entre 1985 y 1990. Posteriormente, Nishida *et al.* (1995) señalan que entre los años 1990 y 1993 el adelgazamiento fue de $3,1 \text{ m a}^{-1}$, resultado que correspondía a la tasa más alta de los glaciares del CHPS. Recientemente, Raymond *et al.* (2005) señalan una tasa de $3,6 \text{ m a}^{-1}$ entre los años 1993 y 2002.

Por otra parte, los primeros registros de velocidad superficial del flujo de hielo en este sector del glaciar Tyndall fueron publicados por Naruse *et al.* (1987) quienes el año 1985 instalaron un transecto de balizas sobre el glaciar. El control de la posición de estas balizas durante 3 días les permitió estimar velocidades del orden de $0,1 \text{ m d}^{-1}$ cerca del margen del glaciar y $1,9 \text{ m d}^{-1}$, cerca de la morrena medial del glaciar. Posteriormente Kadota *et al.* (1992), indicaron velocidades del orden de $0,07 \text{ m d}^{-1}$ cerca del margen glaciar y $0,51 \text{ m d}^{-1}$ a $2,5 \text{ km}$ del margen. Nishida *et al.* (1995) señalan valores de $0,065$ y $0,61 \text{ m d}^{-1}$ cerca del margen del glaciar. Recientes estimaciones de velocidad en la misma posición del transecto instalado por los japoneses en 1985 indican valores de $350 \text{ m a}^{-1} \pm 10 \text{ m}$ hacia el centro del glaciar (Raymond *et al.* 2005).

MATERIALES Y MÉTODOS.

Datos GPS.

En los meses de enero y noviembre del año 2003 se llevaron a cabo dos campañas de terreno en el sector del lóbulo Zapata Sur. Entre los días 10 y el 24 de enero se georreferenciaron 70 mediciones puntuales donde se utilizó un sistema de radio-eco sondeo (RES). La posición de los puntos se midió utilizando un receptor GPS de calidad topográfica y frecuencia simple marca TRIMBLE modelo Geoplotter II. La captura de datos en cada punto se

realizó en modo estático, estimándose un error en la precisión de la posición del orden de 2 a 5 m, pues no se aplicó corrección diferencial en el post procesamiento de los datos.

Entre los días 15 y 23 de noviembre se instalaron 8 balizas sobre un transecto de coordenadas conocidas (balizas instaladas por Naruse *et al.* 1985). Las balizas se posicionaron usando un receptor GPS topográfico marca JAVAD modelo Legacy. La captura de datos se realizó en modo estático, recopilando datos a intervalos de 5 segundos. Cada baliza fue medida por un período cercano a 30 minutos. Se utilizó como base un segundo receptor, de las mismas características, el que permaneció en funcionamiento en las cercanías del glaciar. Los datos fueron corregidos diferencialmente en post-proceso, obteniéndose precisiones centimétricas para cada posición.

Entre los días 1 y 10 de mayo de 2004 se realizó una tercera visita al sector donde se volvió a georreferenciar parte de las balizas instaladas el año 2003. El posicionamiento de las balizas se realizó utilizando un receptor TRIMBLE Geoexplorer II, siguiendo el mismo procedimiento de enero de 2003.

El Datum de referencia utilizado corresponde al WGS 84 y las coordenadas se expresaron en sistema UTM. La figura 2 muestra la posición de los puntos medidos sobre el terreno durante las campañas desarrolladas el año 2003.

ESTIMACIÓN DE LA DINÁMICA Y ADELGAZAMIENTO DE LA SUPERFICIE GLACIAR.

Para la estimación del adelgazamiento del hielo en el lóbulo Zapata Sur se aplicaron los principios del método geodésico utilizado por Krimell (1990), para el estudio del balance de masa de aquellos glaciares que se encuentran en áreas remotas. El método consiste en la generación y comparación de modelos de elevación digital del terreno de distintas épocas. De esta forma, es posible estimar cambios en la elevación superficial del hielo entre intervalos de tiempo de unos pocos años o décadas (Cox & March 2004).

En el presente trabajo se utilizó un modelo SRTM de la NASA obtenido en febrero de 2000, el que se adquirió desde el sitio Global Land Cover Facility (GLCF)². Las coordenadas de referencia del

² <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>

modelo son path 231 / row 096. Los datos están georreferenciados según el datum WGS 84, la referencia vertical corresponde al datum WGS 84, geoide EGM 96. La resolución del modelo es de 3 arco-segundos, esto significa que cada lado del píxel representa una distancia de 90 m, la precisión vertical del modelo corresponde a 7 m (Rignot *et al.* 2003).

La aplicación del método geodésico requiere de un estricto control de terreno para determinar en detalle la precisión de las variaciones que pudiera presentar la superficie del glaciar. Dicho análisis debe realizarse en las áreas libres de hielo alrededor de los glaciares (Rivera & Casassa 2004). Se compararon cotas del modelo SRTM, con un reducido número de cotas altimétricas en roca extraídas de la carta topográfica "Río Serrano" del I.G.M, escala 1:100.000. Las cotas de la carta se encontraban georreferenciadas originalmente en el datum PSAD69, por lo que fueron llevadas a un Sistema de Información Geográfica (SIG) donde fueron transformadas al Datum WGS 84.

Las cotas de altura SRTM e I.G.M se procesaron en un SIG, donde se calculó aritméticamente la diferencia de altura. El error local detectado se encuentra en el rango de -2 a + 16 m, se asume que tal error está asociado tanto a la resolución espacial del modelo SRTM como a los escasos puntos de control obtenidos de la carta I.G.M.

La estimación del adelgazamiento del lóbulo Zapata Sur entre febrero de 2000 y enero de 2003 se realizó aritméticamente mediante álgebra de mapas en un SIG. El programa fue utilizado también para calcular la diferencia de altura de mediciones puntuales sobre el transecto de Naruse (1985), entre marzo de 2002 (Datos obtenidos por Raymond *et al.* 2005) y noviembre de 2003.

Mediante el uso de SIG fue posible estimar las velocidades superficiales del hielo del área de estudio. Se desplegaron las posiciones iniciales (noviembre 2003) y finales (mayo 2004) para calcular la distancia entre la posición inicial y la final de cada baliza y la orientación del flujo.

RESULTADOS.

ADELGAZAMIENTO.

Marzo de 2002 a noviembre de 2003.

La comparación de la elevación de la superficie del hielo en 5 mediciones puntuales (balizas), localizadas en un transecto de coordenadas conocidas (transecto instalado por Naruse *et al.* 1985) permitió estimar un valor de adelgazamiento promedio de 2,63 m para este periodo. El mayor adelgazamiento se detecta cerca del margen del glaciar en la baliza T1 y corresponde a 4,3 m. Hacia el centro del glaciar, en las balizas T2, T4 y T5, el adelgazamiento promedio corresponde a 2,5 m. Finalmente, la baliza T6, aproximadamente a 2,4 km del margen del glaciar, presenta un adelgazamiento del orden de 1,8 m (Fig. 3).

Febrero de 2000 a enero de 2003.

Para este periodo, la comparación de la cota de altura superficial del hielo de los 70 puntos donde se realizaron mediciones de RES (enero de 2003) con el modelo de elevación digital SRTM (2000), permitió estimar un adelgazamiento promedio de 8,07 m. Se estima una tasa anual de adelgazamiento del orden de $2,69 \pm 1,23 \text{ m a}^{-1}$. Las mayores diferencias de altura se detectaron en las mediciones más cercanas al margen del hielo del lóbulo Zapata Sur, promediando 24,3 m, mientras que en el resto de los puntos el adelgazamiento promedio corresponde a 6,24 m.

VELOCIDAD.

Durante la campaña de los días 1 al 10 de mayo de 2004 sólo se localizaron las balizas T2, T6 y T7 (Fig. 4). Si se considera el adelgazamiento del hielo en la parte baja de esta sección del glaciar, es probable que las balizas T3 a la T5 se hayan desprendido en su totalidad, cayendo a las grietas que aparecieron durante el periodo entre las mediciones.

La distancia entre la posición inicial (noviembre de 2003) y la posición final (mayo de 2004) de la baliza T7 (aproximadamente a 3 km del margen del glaciar) corresponde a 134 m. Por su parte, la baliza T6 presenta una distancia de 96 m entre su posición inicial y su posición final. La baliza T2, localizada aproximadamente a 600 m del margen del glaciar, presenta una distancia de 9 m entre su posición inicial y final. Extrapolando los datos obtenidos a un periodo de 365 días, se estima que las tasas anuales de velocidad hacia el centro del glaciar podrían

ser del orden de 270 m a^{-1} , mientras que cerca del margen del hielo la velocidad no debería superar los 18 m a^{-1} . Dicha estimación omite los posibles cambios en la velocidad superficial del hielo durante la época invernal y por tanto deben considerarse como valores referenciales para un sector de la zona de ablación del glaciar Tyndall.

Las balizas T6 y T7 muestran un desplazamiento predominante hacia el sureste. Por su parte, la baliza T2 se desplaza hacia el este. El flujo divergente del hielo cerca del margen de este sector del glaciar concuerda con la situación reportada por Kadota *et al.* (1992) y con la presencia del umbral subglacial indicado por Godoi *et al.* (2003).

DISCUSIÓN.

La estimación indirecta del adelgazamiento del hielo en un sector de la zona de ablación del glaciar Tyndall presenta un grado de incerteza no menor, esto es consecuencia de la escasez de puntos de control en terreno útiles para la comparación del modelo digital SRTM con los datos obtenidos sobre la superficie del glaciar. Si se considera el perfeccionamiento de aspectos metodológicos, como el señalado anteriormente, no se descarta el futuro uso del método geodésico para una estimación del balance de masa de la totalidad del glaciar Tyndall, incluyendo además otros glaciares donde la disponibilidad de información así lo permita.

Teniendo en cuenta el valor estimado de adelgazamiento del hielo y las tasas de adelgazamiento reportadas desde mediados de la década de 1980 hasta el año 2003 para el lóbulo Zapata Sur, se puede afirmar que esta sección del glaciar muestra un continuo adelgazamiento, que estaría favorecido por tendencias climáticas. Rosenblüth *et al.* (1995) sostienen que desde principios del pasado siglo, la temperatura atmosférica evidenció un incremento de $0,4$ a $1,4^\circ \text{ C}$ al sur de los 46° S , y las precipitaciones disminuyeron en los últimos 70 años (periodo 1945-1985) entre los 52° y 53° S , en el orden de 1.000 mm en islote Evangelistas y 1.400 mm en bahía Félix, lo que representa una disminución del orden de 25% a 33% durante los últimos 100 años (Rivera *et al.* 2002).

Adicionalmente, no debe descartarse lo planteado por autores como Raymond *et al.* (2005) y Rivera & Casassa (2004), quienes sugieren que

factores dinámicos podrían ejercer una importante influencia en el proceso de pérdida de masa del glaciar.

El adelgazamiento del hielo en otros glaciares del parque nacional Torres del Paine ha sido estudiado por Rivera & Casassa (2004). Los autores aplicaron el método geodésico para la comparación de dos modelos digitales de elevación basados en la cartografía I.G.M de 1975 y 1995, estimando un adelgazamiento del orden de $1,8 \text{ m a}^{-1}$ para un sector a media altitud del glaciar Grey y $2,35 \text{ m a}^{-1}$ para la zona de ablación del glaciar Dickson.

Presumiblemente el valor estimado de adelgazamiento del hielo para un sector zona de ablación del glaciar Tyndall ($2,69 \pm 1,23 \text{ m a}^{-1}$), mediante una metodología indirecta, podría estar relacionado con la mayor área de ablación de este (118 km^2) en relación a los glaciares Grey (103 km^2) y Dickson (29 km^2). No es posible realizar un análisis comparativo más detallado, debido a la mayor calidad y cantidad de los datos considerados por Rivera & Casassa (2004) en comparación a los considerados en este trabajo.

La estimación de cambios en la elevación de la superficie del hielo en 70 mediciones discretas realizadas en el lóbulo Zapata Sur, permitió determinar los patrones espaciales de adelgazamiento. Hacia el centro de este sector del glaciar el adelgazamiento presenta un valor promedio menor a 7 m, mientras que en el sector aledaño al margen del hielo (año 2003) el adelgazamiento supera los 20 m. El adelgazamiento del hielo entre los años 2002 y 2003, estimado en posiciones conocidas sobre el glaciar, muestra un patrón espacial similar, el adelgazamiento cerca del margen supera en casi 2 m el detectado hacia el interior del glaciar.

Al comparar la orientación del flujo de las balizas T6 y T7 con respecto a la T2, se puede apreciar que la componente principal de flujo hacia el interior de este sector del glaciar es sur, mientras que cerca del margen es principalmente este. No es posible discriminar con exactitud la posición de la divisoria superficial del hielo, debido a la desaparición de algunas de las balizas entre noviembre de 2003 y mayo de 2004. No obstante, es posible afirmar que esta divisoria superficial podría estar relacionada con la presencia de un umbral subglacial que estaría localizado cerca del margen del glaciar (Godoi *et al.* 2003).

Según señalan Rivera & Casassa (2004), el calentamiento atmosférico detectado en la región, no ha sido lo suficientemente extenso para explicar las altas tasas de adelgazamiento en las zonas de ablación de los glaciares del CHPS. Con objeto de estudiar en forma detallada la relación clima – dinámica glaciar en este sector, es recomendable la implementación de un programa de monitoreo glaciológico, con objeto de estimar la posible influencia de factores no climáticos en las variaciones recientes del glaciar.

CONCLUSIONES.

El lóbulo Zapata Sur del glaciar Tyndall presenta un continuo proceso de adelgazamiento, la mayor pérdida de masa se observa en las inmediaciones del margen de esta sección del glaciar. Si se considera el evidente retroceso del frente del hielo y las características de la topografía subyacente, que en este sector presentaría un umbral subglacial donde el espesor de hielo es menor, es posible que drásticos cambios operen en la zona frontal de este sector del glaciar, tales cambios podrían expresarse en la pérdida de una parte o una sección importante del volumen de hielo.

Este trabajo presenta una primera aproximación metodológica respecto a la comparación de información obtenida directamente en terreno, en una sección de la zona de ablación del glaciar Tyndall, con un modelo digital de terreno SRTM. El margen de error asociado a la estimación del adelgazamiento del hielo se considera propio de la naturaleza de los datos empleados, principalmente a la escasez de puntos de control en terreno. Futuras experiencias deben considerar la implementación de una red adecuada de puntos de control y el uso de modelos digitales de terreno multitemporales de mayor resolución espacial, esto con objeto de incrementar el nivel confianza para la estimación del balance de masa.

Finalmente es necesario destacar la necesidad de implementar un programa de monitoreo del balance de masa, energía y la componente hidrológica del glaciar Tyndall, puesto que el estudio sistemático de las características de la relación clima – dinámica glaciar, resultaría de gran relevancia para interpretar las causas de los cambios recientes y estimar las posibles variaciones futuras que podrían darse en la sección austral del CHPS.

AGRADECIMIENTOS.

Se agradece el apoyo de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) que facilitó el acceso de los investigadores al área de estudio y a la V División del Ejército de Chile, por el apoyo logístico brindado. El apoyo en terreno de los Sres. Marcelo Arévalo, John Emot y Rodrigo Traub fue fundamental para el desarrollo del trabajo. Los comentarios y aportes de los señores Alfonso Fernández y Jorge Marín son igualmente agradecidos.

Las actividades de terreno fueron cofinanciadas por el Centro de Estudios del Cuaternario, la Universidad de Magallanes y la V división del Ejército de Chile.

LITERATURA CITADA.

- Aniya, M. 1995. Holocene Glacial Chronology in Patagonia: Tyndall and Upsala Glaciers. *Arctic and Alpine Research*, 27 (4): 311-322.
- Aniya, M. 1999. Recent Glacier Variations of the Hielos Patagónicos, South America, and their Contribution to Sea-level Change. *Arctic and Alpine Research*, 31 (2): 165-173.
- Carrasco, J., G. Casassa & A. Rivera 2002. *Meteorological and Climatological Aspects of the Southern Patagonian Ice Fields*. The Patagonian Ice Fields, A Unique Natural Laboratory for Environmental and Climate Change studies. Kluwer Academic/Plenum Publishers. N. Y. USA. 192 pp.
- Casassa, G. 1992. Radio-echo Sounding of Tyndall Glacier, southern Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 10: 69-74.
- Cox, L. & R. March 2004. Comparison of Geodetic and Glaciological Mass-Balance techniques, Gulkana Glacier, Alaska, USA. *Journal of Glaciology*, 50 (170): 363-370.
- Godoi M., R. Carvallo & M. Arévalo 2003. Condición Actual del Lóbulo Zapata Sur, En la Zona de Ablación del Glaciar Tyndall, Mediante Radio-Ecosondeo Sobre la Superficie del Glaciar. *Anales Instituto Patagonia*. (Chile), 31: 5-15.
- Kadota T., R. Naruse, P. Skvarka & M. Aniya 1992. Ice Flow and Structure of Tyndall Glacier, southern Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, 10: 63-68.

- Krimell, R. 1990. Analysis of Difference Between Direct and Geodetic Mass Balance Measurements at South cascade Glacier, Washington. *Geogr. Ann*, 4: 653-658.
- Naruse, R., H. Peña, M. Aniya & J. Inoue 1987. Flow and Structure of Tyndall Glacier, the Southern Patagonian Ice Field. *Bulletin of Glacier Research*, 4: 133-140.
- Nishida, K., K. Satow, M. Aniya, G. Casassa & T. Kadota 1995. Thickness Change and Flow of Tyndall Glacier, Patagonia. *Bulletin of Glaciological Research*, 13: 29-34.
- Raymond, C., T. Neumann, E. Rignot, K. Echelmeyer, A. Rivera & G. Casassa 2005. Retreat of Glaciar Tyndall, Patagonia, Over the Last Half-century. *Journal of Glaciology* 51 (173): 239-247.
- Rignot, E., A. Rivera & G. Casassa 2003. Contribution of the Patagonia Icefields of South

America to Sea Level Rise. *Science* (302): 434-437.

- Rivera, A., C. Acuña, G. Casassa & F. Bown 2002. Use of Remotely Sensed and Field Data to Estimate the Contribution of Chilean Glaciers to Eustatic Sea-level Rise. *Annals of Glaciology*, 34: 367-372.
- Rivera, A. & G. Casassa 2004. Ice Elevation, Areal and Frontal Changes of Glaciers from National Park Torres del Paine, Southern Patagonia Icefield. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36 (4): 379-789.
- Rosenblüth, B., G. Casassa & H. Fuenzalida 1995. Recent Climate Change in Western Patagonia. *Bulletin of Glaciological Research*, 13: 127-132.
- Warren C. & D. Sudgen 1993. The Patagonian Icefields: A Glaciological review. *Arct. Alp. Res.*, 25: 316-331.

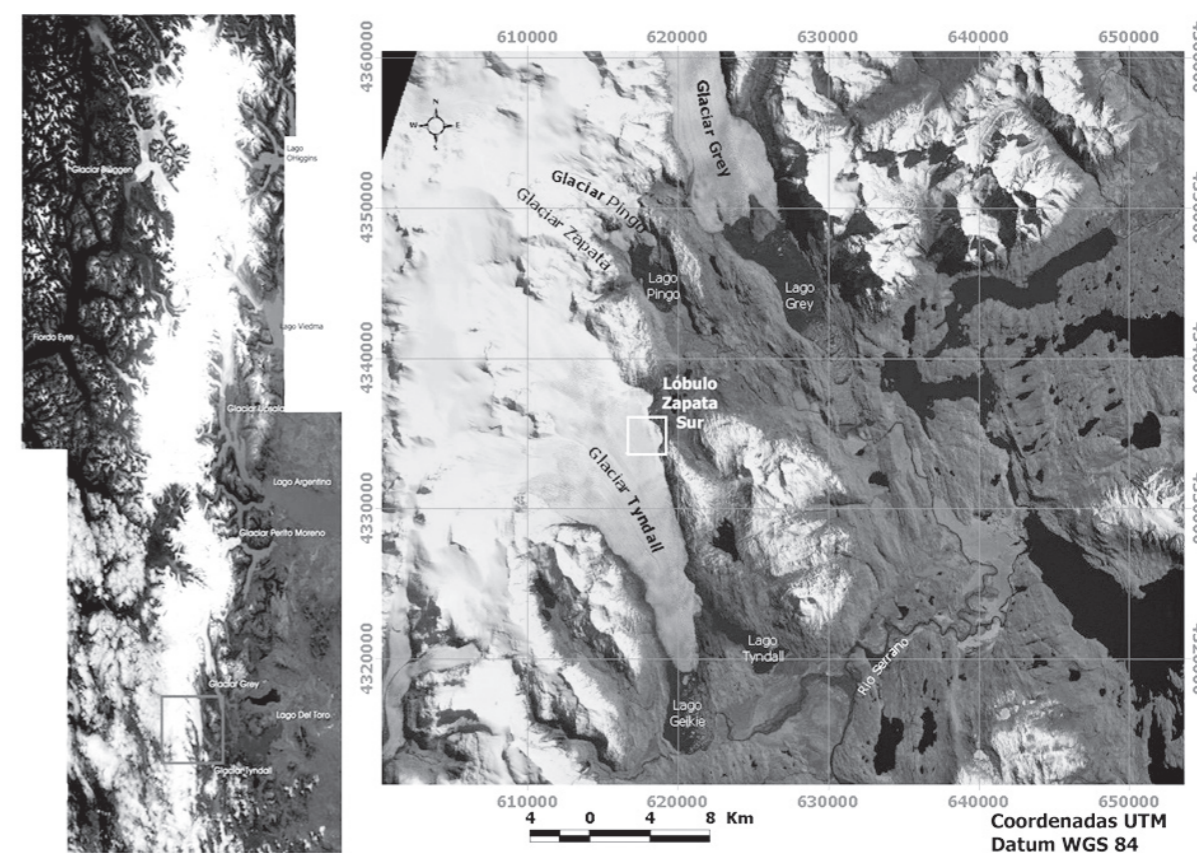


Fig. 1. A la izquierda un mosaico de imágenes Landsat del CHPS. La imagen de la derecha corresponde a una composición de las bandas 1, 4 y 5 de una imagen Landsat ETM+, adquirida en Noviembre de 1999. Se puede apreciar parte de los glaciares localizados en el Parque Nacional Torres del Paine.

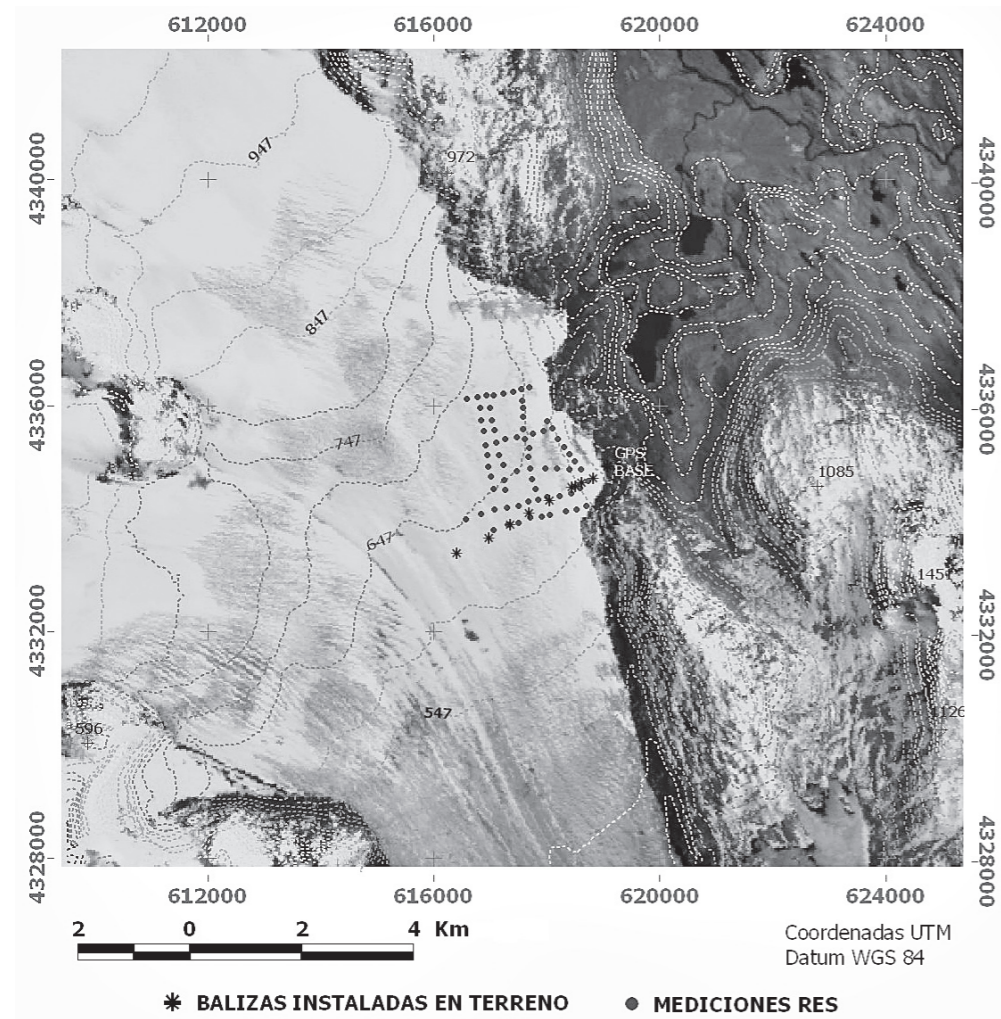


Fig. 2. Área de estudio, situada en la zona de ablación del glaciar Tyndall, las curvas de nivel fueron extraídas del modelo SRTM. Cotas de altura indicadas pertenecen a la carta I.G.M 1:100.000 Río Serrano.

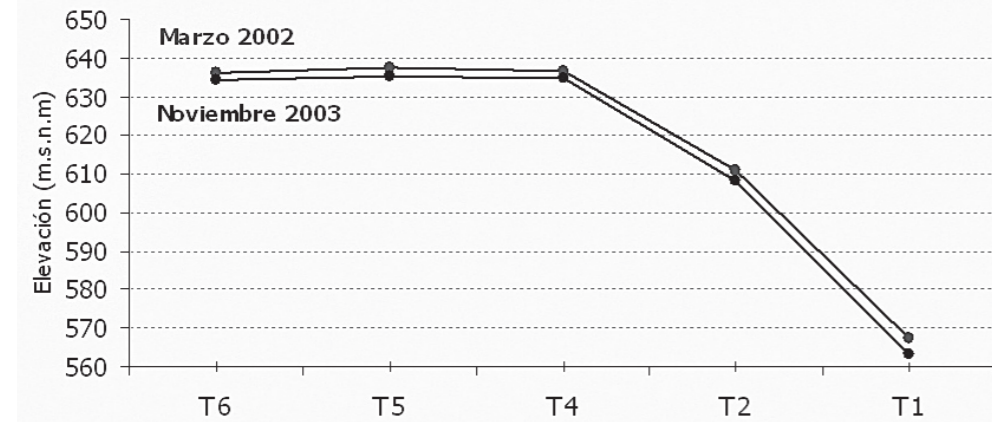


Fig. 3. Elevación de la superficie del hielo a lo largo del perfil instalado por investigadores japoneses. La distancia entre T1 y T6 corresponde aproximadamente a 2,1 Km.

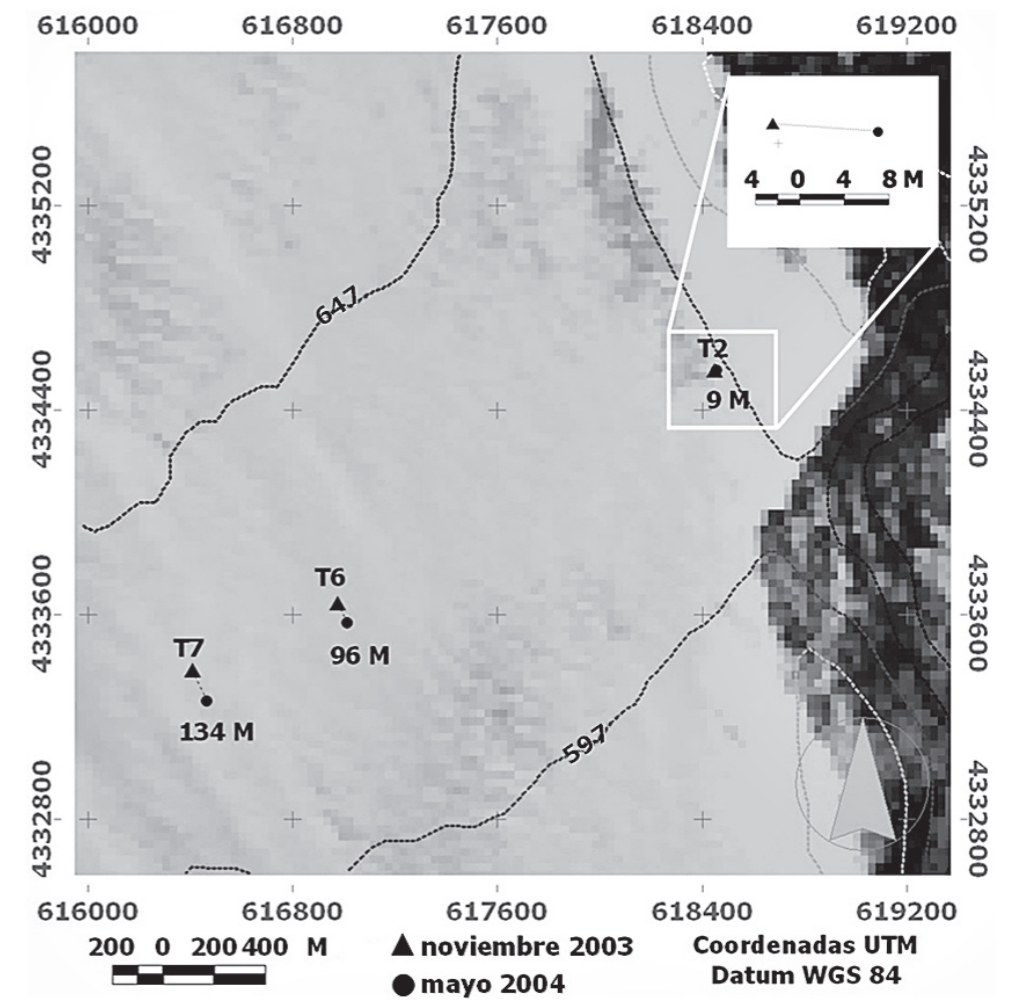


Fig. 4. Desplazamiento de las balizas T2, T6 y T7 entre noviembre de 2003 y mayo de 2004.

