

Desafíos glaciológicos del Campo de Hielo Sur

Andrés Rivera / Laboratorio de Glaciología, Centro de Estudios Científicos, CECs, Valdivia, Chile, Departamento de Geografía, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

El Campo de Hielo Sur (CHS) es un conjunto de glaciares que se extiende desde los 48.3° a los 51.6° de latitud sur, territorio que es compartido por Chile y Argentina (Figura 1), constituyéndose en la mayor masa de hielo temperado del hemisferio sur, con un área que totaliza en la actualidad 12,636 km² distribuidos en 139 glaciares mayores a 5 km² de superficie (De Angelis, 2014).

Las fluctuaciones de sus glaciares principales se han podido estudiar desde mediados del siglo XIX, cuando exploradores europeos realizaron viajes a la zona, como por ejemplo la expedición hidrográfica británica de 1826-1930 dirigida por el capitán Parker King que obtuvo el primer registro completo y relativamente detallado de las costas de Patagonia Occidental. A finales del siglo XIX, el conocimiento de la zona mejoró mucho gracias a las numerosas expediciones y registros de las comisiones de límites de Chile y Argentina que recorrieron

la zona para delinear la frontera entre ambos países, en particular por Hans Steffen representando a Chile y por Francisco Moreno a Argentina.

Desde principios de siglo XX algunos pioneros, como el alemán Alfred Kolliker, se internaron en la cordillera recorriendo la parte alta del CHS, donde se encuentra el plateau o altiplanicie de nieve desde donde nacen varios de sus glaciares. En la primera mitad del siglo XX se realizaron numerosas expediciones deportivas y de exploración en la zona, destacándose los trabajos y fotografías de excelente calidad obtenidas por Alberto de Agostini durante sus travesías a los glaciares de la Patagonia.

Luego, en el año 1944/45, la Fuerza Aérea de EE.UU. realizó un primer vuelo aerofotogramétrico denominado Trimetrogon, obteniéndose fotos aéreas del CHS con tres cámaras montadas en un mismo eje o plano vertical, perpendicular a la línea de vuelo,



Campaña de mediciones y monitoreos en el lago O'Higgins, en la Patagonia chilena. Es el lago más profundo de América Latina, con 836 m.

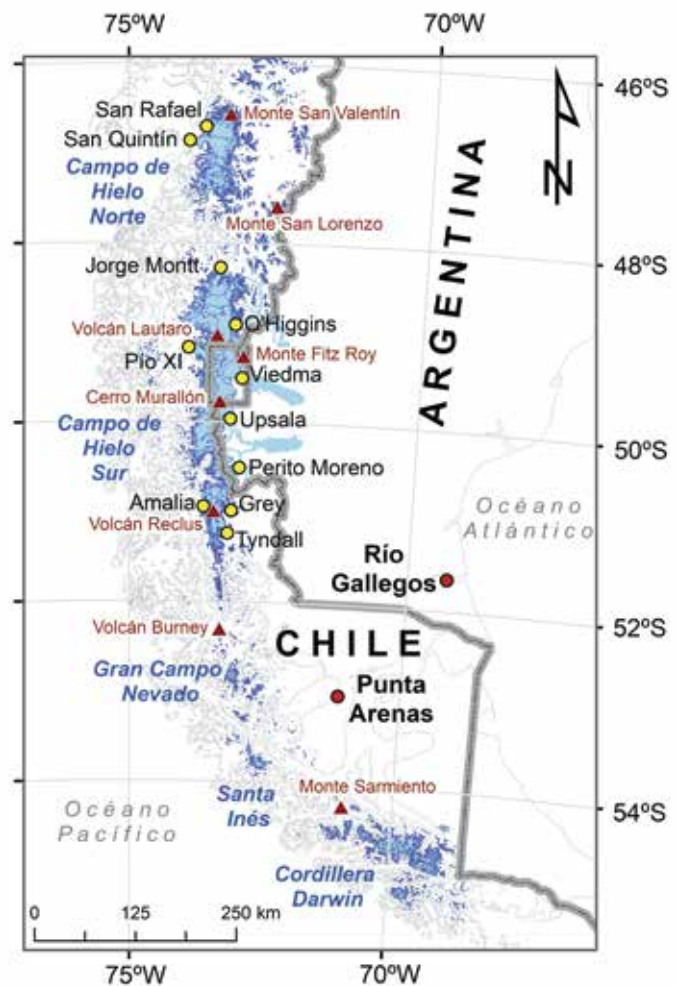
tomando una foto vertical y otras dos fotos oblicuas, a la derecha e izquierda respectivamente. Estas fotos fueron usadas por los norteamericanos para preparar una carta topográfica escala 1:250.000 traducida al castellano por el Instituto Geográfico Militar (IGM) como *Carta preliminar*.

Estas fotos fueron facilitadas a Louis Lliboutry (1956) durante su estadía en Chile, quien pudo estudiarlas en detalle y realizar las primeras observaciones glaciológicas de la zona, comenzando así nuestro conocimiento científico del CHS y de la mayoría de los glaciares patagónicos. Según sus propias palabras, la *Carta preliminar* del IGM representó «un progreso fantástico, sobre todo para el dibujo de las costas», no así para el mapeo de la zona cordillerana donde se ubican los glaciares del CHS que fueron «muy mal representados» debido a las características del levantamiento.

Las fotos eran de buena calidad como para fijar posiciones frontales de glaciares, determinar zonas de grietas, afloramientos rocosos y características superficiales del hielo, entre muchos otros elementos de interés. Lliboutry usó extensamente estas fotos para caracterizar las principales cuencas glaciares y determinar sus variaciones al compararlas con los registros históricos disponibles a la fecha.

Gracias a este análisis detectó que en general las lenguas principales estaban retrocediendo (e.g. glaciares Grey y Dickson), aunque en otros se habían observado algunas oscilaciones con avances y retrocesos (e.g. Pío XI), y en otros, como el Perito Moreno, se habían identificado varios ciclos de avance. El único ciclo de avance más general que detectó fue el que afectó a los glaciares San Rafael y San Quintín (o San Tadeo), del Campo de Hielo Norte, y al Viedma del CHS, que entre la década de 1930 y 1952 avanzaron, cuando pareció que «la deglaciación se había detenido».

Uno de los aspectos más relevantes detectados por Lliboutry en estas fotos Trimetrogon fue la existencia de material detrítico en superficie que constituían «franjas de fusión muy distanciadas» las que acertadamente interpretó como de origen volcánico al haber sido depositadas por erupciones volcánicas antiguas que cubrieron la parte centro-norte del CHS (Pío XI a Jorge Montt). Gracias a estas fotos identificó 3 bandas de cenizas volcánicas provenientes de algún centro volcánico ubicado al oeste de lo que denominó erradamente Volcán Viedma (nunatak Viedma), especulando que podría situarse al noroeste del cerro Lautaro, «que tiene una forma de

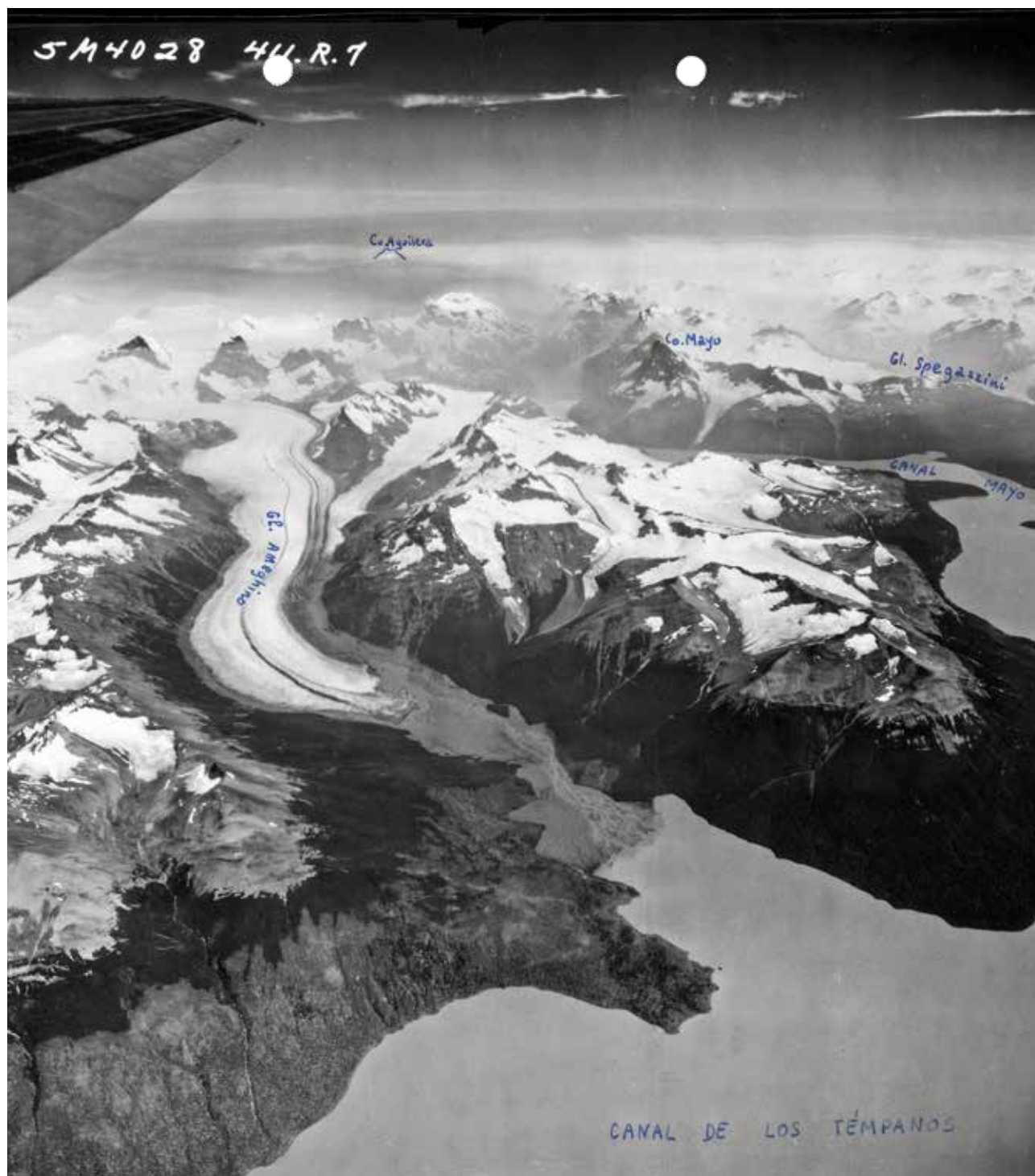


1. Mapa de ubicación con los principales glaciares y Campos de Hielo de la Patagonia en azul. Puntos amarillos indican los glaciares descritos en el texto. Campo de Hielo Sur: Acuerdo de 1998.

un volcán desmantelado» según sus propias palabras. Hoy sabemos que el único centro volcánico activo de la zona es el volcán Lautaro (Figura 1), de 3.606 metros sobre el nivel del mar (msnm) que ha tenido varias erupciones históricas y que manifiesta eventos menores prácticamente todos los años, como por ejemplo derretimiento en altura, avalanchas de derrubios y de nieve, todo asociado a su actividad volcánica.

Al comparar las posiciones actuales de los glaciares que fueron analizados por Lliboutry con las fotos aéreas de 1944/45 se ha comprobado en la mayoría de los casos que ha habido cambios muy significativos (Figura 2), como los experimentados por el glaciar Jorge Montt, que retrocedió casi 15 km hasta el 2018, dejando a su paso un fiordo que tiene profundidades de más de 400 m (Rivera *et al.*, 2012), o el glaciar O'Higgins, que en el





Fotos aéreas oblicuas obtenidas durante el vuelo Trimetrogon realizado en el verano de 1944/45 en todo Chile. Estas fotos son las primeras imágenes del Campo de Hielo Sur y las que fueron usadas por Lliboutry para denominar glaciares (notas a mano sobre las fotos) y estudiar sus cambios recientes.

mismo período retrocedió casi 13 km, dando paso a un fiordo lacustre de más de 800 m de profundidad, o el Upsala, que retrocedió cerca de 11 km en el mismo período, dejando atrás un brazo del lago Argentino con más de 600 metros de profundidad.

Otro glaciar que experimentó, por el contrario, un gran avance es el Pío XI, cuya lengua terminal se dividió en dos frentes que avanzaron hasta 11 km desde 1945, embalsando el valle del río Greve descrito por Lliboutry como un «valle desprovisto de vegetación y que parece ser sede de avenidas de agua». Este anómalo avance del Pío XI formó una morrena frontal en la cabecera del fiordo Eyre (Wilson *et al.*, 2016).

Junto a estos cambios frontales se ha detectado una gran pérdida volumétrica (Rignot *et al.*, 2003; Willis *et al.*, 2012), con algunas contadas excepciones, siendo la más notable la del Pío XI, que ha engrosado, y la del Perito Moreno, que se ha mantenido en una condición de equilibrio con mínimos avances y retrocesos, los que han resultado en numerosas ocasiones en embalsamientos y posteriores rupturas del Brazo Rico del Lago Argentino en los últimos años (Lenzano *et al.*, 2018).

Trimetrogon: la primera cobertura aérea de Chile

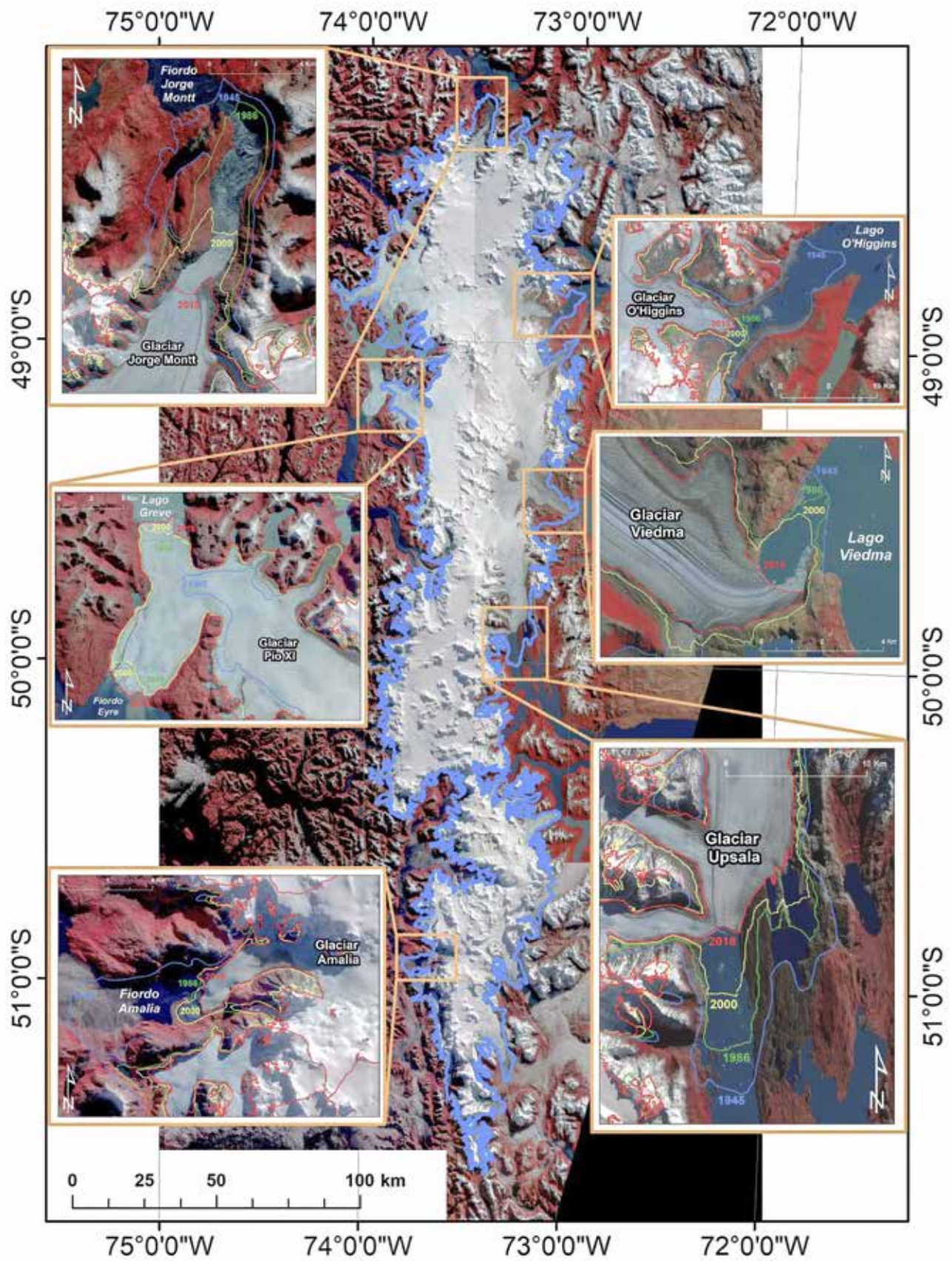
La reinterpretación de la extensión de glaciares a partir de las fotos Trimetrogon y las cartas preliminares del IGM permiten determinar que en 1944/45 había 13,883 km² de hielo, área que se redujo en 1986 a 13,070 km², luego a 12,787 km² en el año 2000 y finalmente a 12,133 km² en 2018. En otras palabras, en los últimos 73 años el CHS perdió 1,750 km² de hielo, que representa un 13% de la superficie original. Con el fin de tener una noción de escala de lo perdido, se puede mencionar que Rivera *et al.* (2016) estimó que en la actualidad hay 1,035 km² de hielo en todo Chile Norte y Centro (18-35°S), lo que representa sólo un 60% de todo lo perdido por el CHS en las últimas 7 décadas.

Con estas pérdidas generalizadas, se han llevado a cabo estudios de modelación del balance de masa superficial del CHS que han obtenido valores positivos entre los años 1975 y 2011 (Schaefer *et al.*, 2015), lo que contrasta con el análisis de modelos digitales de elevación de distintas épocas, que han resultado en balances de masa negativos para el CHS en su conjunto, con resultados, sin embargo, muy distintos, dependiendo del método empleado, destacándose la pérdida entre 2000 y 2016 de 11.84 ± 3.3 Gt/a usando SRTM, versus Tan-

DEM-X (Malz *et al.*, 2018) y pérdidas de 21.29 ± 0.38 Gt/a usando datos CryoSat-2 (Foresta *et al.*, 2018). A dicho retroceso y pérdida volumétrica generalizada se suma en muchos casos un aceleramiento del flujo de hielo (Mouginot & Rignot, 2015), particularmente a partir de la década de los 80. Una posibilidad es que el retroceso y adelgazamiento de largo plazo va a tender a aminorarse con balances de masa más positivos en décadas recientes. Sin embargo, los cambios frontales de los últimos años no reflejan esta desaceleración; de hecho, hay varios glaciares que han tenido pérdidas muy fuertes en años recientes (e.g. Jorge Montt, O'Higgins, Chico, Viedma, Grey y Amalia, entre otros). Esto implica que hay que mejorar los modelos y validarlos con más datos de terreno.

La mayor parte de los glaciares del CHS son desprendentes (producen témpanos), lo que en el largo plazo es la principal fuente de pérdida de masa para ese tipo de glaciares (Aniya *et al.*, 1996). Este proceso puede darse en fiordos sometidos a marea o en lagos, donde un factor importante que controla la dinámica del hielo es la profundidad de los cuerpos de agua donde los glaciares terminan.

Debido a que la batimetría cerca de los glaciares es determinada por la geología e historia glacial de largo plazo, sus profundidades tienen características locales muy disímiles entre glaciares cercanos, implicando que la actividad de producción de témpanos puede generar respuestas no climáticas, del tipo dinámico. En períodos de alta actividad desprendente y balances de masa negativos, el hielo puede retroceder o incluso colapsar en aguas profundas, acelerándose y adelgazando, en un proceso de estiramiento longitudinal. Puede propagar las perturbaciones frontales aguas arriba, incluso hasta las divisorias de hielo, en especial cuando las zonas de acumulación comparten una meseta relativamente plana o plateaux. En períodos de baja actividad de desprendimientos o con un balance de masa positivo, el glaciar puede avanzar, pudiendo traspasar sectores profundos de fiordos y lagos hasta formar morrenas frontales donde puede estabilizarse. Este ciclo de avance/retroceso de glaciares que producen témpanos se conoce en literatura inglesa como el Tidewater Calving Cycle (TWC). En el CHS hay varios glaciares que representan bien todas las fases del TWC, desde aquellos que han experimentado colapsos frontales, como el glaciar Jorge Montt (Rivera *et al.*, 2012), otros



2. Cambios frontales 1945-2018 del CHS y sus glaciares principales. Imagen de fondo, mosaico Sentinel del 2018.

que tuvieron dicho colapso y ahora están en relativo equilibrio, como el O'Higgins (Sakakibara & Sugi 2014), hasta otros como el Pío XI, que está en su fase de avance (Wilson *et al.*, 2016). Se puede concluir por lo tanto que los glaciares del CHS no necesariamente están res-

pondiendo a los cambios climáticos en forma lineal o directa, sino que sus comportamientos son mucho más complejos, con diferencias fuertes entre las cuencas de hielo, dependiendo de sus características dinámicas y topográficas (e.g. espesor y flujo del hielo).



El gran avance en la investigación científica del CHS gracias al uso generalizado de imágenes satelitales de alta resolución permite, entre otros, un monitoreo semipermanente de sus glaciares, el cálculo de velocidades del hielo gracias a técnicas de seguimiento de patrones superficiales (*feature tracking*) y la construcción de modelos digitales de elevación. Muchas de estas limitaciones ya fueron enunciadas hace más de 60 años por Lliboutry. Entre ellas, destaca la falta de datos de terreno para la validación de teorías y modelos que intentan explicar el comportamiento diferencial de sus glaciares. Esta limitación es crítica en especial sobre los componentes del balance de masa (acumulación y ablación), así como en los de flujo del hielo, donde aún no se sabe, por ejemplo, el espesor de hielo y el volumen total del CHS (Gourlet *et al.*, 2016).

Modelos climáticos para la Patagonia

A diferencia de las limitaciones extremas de la época de Lliboutry, hoy existen modelos climáticos que pueden aplicarse en Patagonia (Villaruel *et al.*, 2013), permitiendo simular cambios pasados y determinar proyecciones futuras de balance de masa ante distintos escenarios de cambio climático. El problema es cómo validar estas modelaciones y calibrar algunos de los parámetros que son fundamentales y de los que sabemos poco en el CHS, como por ejemplo acumulación y ablación, que en general se modelan a partir de datos de Re-Analysis y de extrapolaciones desde estaciones continuas ubicadas a gran distancia y a baja altitud. No obstante, en la actualidad existen algunas estaciones meteorológicas que miden cerca de las lenguas de hielo, por ejemplo cerca de los glaciares Tyndall y Grey (Weidemann *et al.*, 2013).

En el CECs se ha enfrentado este problema llevando a cabo varios proyectos de investigación de alta complejidad científica y logística, por ejemplo instalando tres bases glaciológicas en el CHS, las que fueron localizadas en nunataks (cerros isla o afloramientos rocosos rodeados por hielo). Cada base está compuesta por 2 módulos de fibra de vidrio anclados a roca que permiten el alojamiento, alimentación, trabajo y sobrevivencia de 6-8 personas. Cada base tiene además una

estación meteorológica completa con dos niveles de sensores y transmisión de datos en tiempo real. Estas instalaciones fueron financiadas por la Dirección General de Aguas (DGA) y están disponibles para investigadores y montañistas.

Junto a esta infraestructura, el CECs ha instalado varias cámaras fotográficas capturando fotos diarias, lo que ha permitido generar videos (time lapse) que muestran el flujo de hielo de varias lenguas glaciares terminales. También ha llevado a cabo numerosas expediciones aéreas, terrestres y lacustres, donde ha medido espesores de hielo, balance de masa y batimetría de fiordo/lagos. Estos datos han permitido revelar algunos de los secretos mejor guardados por el CHS y que maravillarían a pioneros como Lliboutry, como por ejemplo al detectar con radares las capas de cenizas volcánicas sepultadas bajo cientos de metros de espesor del hielo, cuando el solo pudo visualizarlas en superficie hace 70 años. En su época había espesores máximos del hielo que superaban los 1.300 m y que hoy son ocupados por lagos o fiordos sin hielo y cuyos fondos están a más de 400 metros por debajo del nivel del mar, como por ejemplo cerca del frente actual de los glaciares Jorge Montt, Upsala, Viedma y O'Higgins.

Los trabajos pioneros de Lliboutry siguen siendo fundamentales para un mejor entendimiento de los cambios de largo plazo del CHS. Sus pioneras investigaciones son una inspiración para la exploración e investigación glaciológica moderna, en especial para Chile y Argentina, que comparten el área y para los cuales más que ser un límite fronterizo, el CHS debería ser considerado una zona de permanente y estrecha colaboración científica.



La gran mayoría de los glaciares del CHS han experimentado fuertes pérdidas areales en las últimas décadas, las que en muchos casos parecen estar acelerándose. Esto implica que los glaciares siguen con un importante desequilibrio respecto de las condiciones climáticas actuales, a pesar de modelaciones que indican balances de masa positivos en décadas recientes. Las respuestas dinámicas del hielo, en particular por la alta producción de témpanos en aguas profundas, son el factor principal de la pérdida de masa en la zona, seguida por el fuerte derretimiento en las partes bajas.

◀ Foto vertical del vuelo Trimetrogon de 1944/45 sobre parte de la cordillera Sarmiento y el fiordo de las Montañas, una zona que aunque se encuentra cerca de Puerto Natales, ha sido muy poco explorada hasta el día de hoy.