

## Los glaciares de Chile central, a seis décadas de los trabajos de Louis Lliboutry

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

Hace 62 años que Louis Lliboutry publicó *Nieves y glaciares de Chile. Fundamentos de glaciología*, texto insigne que sigue siendo un tratado imprescindible en habla castellana para todos aquellos interesados en glaciología teórica y la exploración de los Andes. Este texto surgió al alero de la Universidad de Chile, donde Lliboutry trabajó por varios años estudiando glaciares a partir de antecedentes históricos, mapas, fotografías y, según sus propias palabras, «un conocimiento directo de la

Alta Cordillera Central donde hizo unas 10 expediciones ligeras de 5 a 10 días». El fruto de su trabajo tiene plena validez teórica y práctica, conteniendo además un excelente registro del estado de los glaciares de los Andes, en particular de Chile a mediados del siglo XX. Es precisamente el objetivo de este capítulo comparar estos registros históricos con imágenes y datos modernos, con el fin de verificar los cambios acaecidos y valorar la contribución del sabio francés a la glaciología de Chile y el mundo.



Trabajos del CECs en la cuenca alta del río Olivares. Instalación de cámara fotográfica con transmisión en línea apuntando a los glaciares Olivares y Alfa.

A mediados del siglo XX la cordillera de los Andes de Chile central (Figura 1) «era poco conocida fuera de los círculos andinísticos», lo que no ha cambiado sustancialmente en nuestros días. Si bien los glaciares están a pocos kilómetros de Santiago y algunos se pueden ver desde la ciudad, el acceso a los mismos es difícil, y para llegar a los más grandes de la cuenca del Maipo es necesario organizar expediciones similares a las realizadas por Lliboutry hace más de medio siglo.

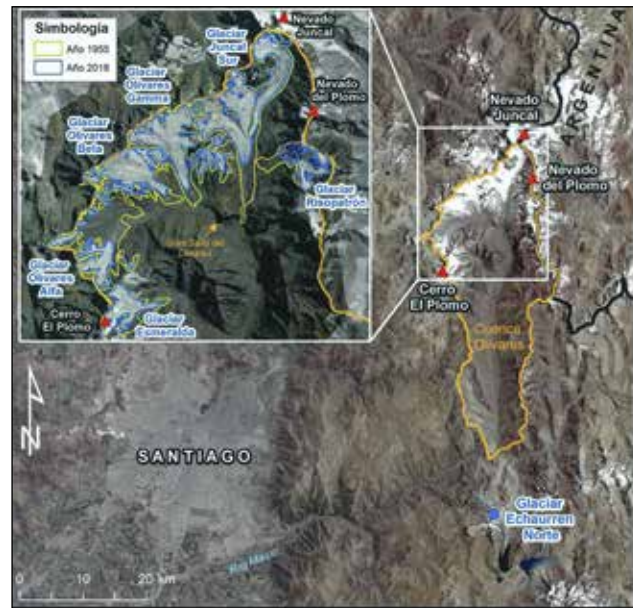
La alternativa moderna es subir en helicópteros que demoran por ejemplo unos 40 minutos hasta el Nevado Juncal, desde donde se desprenden algunos de los mayores glaciares de Chile central. Es precisamente al sur del Nevado Juncal donde está la cuenca alta del río Olivares, una de las zonas englaciadas mejor descritas por Lliboutry y que tiene los dos glaciares más grandes de la cuenca del Maipo: el Juncal Sur, de 20,63 km<sup>2</sup> el año 2018, y el Olivares Gamma, de 11,62 km<sup>2</sup>, también en el año 2018.

### Las exploraciones del Club Alemán Andino

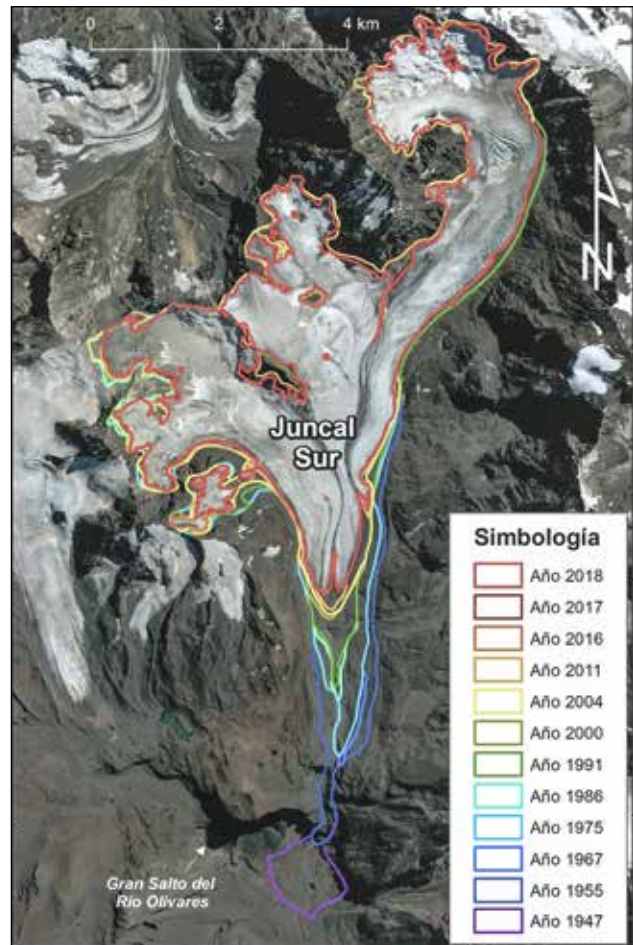
En las primeras décadas del siglo XX la cartografía oficial de la región andina de Santiago era muy básica, no mostraba los glaciares que allí existían y tenía notables errores topográficos. Si bien Klatt y Fickenscher en 1929 habían publicado su carta de Excursionismo de la cordillera central con nuevos antecedentes y muchos detalles, en especial de las cumbres de la región obtenidos durante sus propias expediciones, persistían muchas incógnitas sobre los ríos, cuencas y, particularmente, sobre los glaciares de esta parte de los Andes.

Gracias a la exploración de ellos y otros andinistas de la época, por ejemplo del Club Alemán Andino (DAV, por su sigla en alemán), se obtuvieron excelentes fotos de sus ascensiones, con las que Lliboutry comenzó a interiorizarse en sus glaciares, lo que después coronó con sus propias expediciones, permitiéndole dibujar el primer mapa escala 1:150.000 de la zona, que comparado con la cartográfica previa, significó un avance notable que recopila mucha información topográfica, toponímica y glaciológica inédita.

Este mapa es el primero donde se delinean los polígonos glaciares de todo Chile central, incluyendo ventisqueros con penitentes (glaciares descubiertos), así como glaciares recubiertos, subterráneos o de escombros (glaciares de roca o rocosos como se les llama hoy en Chile), lo que permitió estimar áreas totales, largos,



1. Mapa de ubicación con los principales topónimos mencionados en este capítulo y polígonos glaciares de los años 1955 y 2018 en la cuenca alta del Olivares.



2. Variaciones areales del glaciar Juncal Sur desde 1947 a 2018.

alturas máximas y mínimas de hielo. Es destacable además que lo hizo con fotos de andinistas, información cartográfica limitada y sus propias observaciones, sin contar con fotografías aéreas verticales, que ya eran comunes y de amplio uso en el Hemisferio Norte para fines cartográficos gracias al gran avance experimentado en fotogrametría durante la Segunda Guerra Mundial.

Las primeras fotos de este tipo obtenidas en la cordillera de Chile central son las del vuelo Hycon tomadas en el verano de 1955 y 1956, con las que se hizo el primer inventario de glaciares de la cuenca del Maipo el año 1979 y con las que el Instituto Geográfico Militar de Chile hizo su cartografía regular escala 1:50.000 años después. En otras palabras, el mapa de Lliboutry fue la mejor cartografía de la zona por al menos 25 años. Tampoco contó con imágenes satelitales, que sólo comenzaron a obtenerse en la década de 1960 y que sólo se hicieron comunes a partir de 1970, cuando se inició la serie de satélites Landsat.

### La cuenca alta del Olivares

No obstante el gran avance que representó el mapa de glaciares elaborado por Lliboutry, éste no tuvo un nivel de detalle suficiente como para que se pudiera hacer una comparación precisa con la extensión actual del hielo. Sin embargo, esta comparación puede hacerse gracias a la calidad de sus descripciones, las fotos terrestres que usó y los numerosos detalles que entregó, particularmente en la cuenca alta del Olivares, una de las subcuencas principales del río Maipo, donde los retrocesos glaciares han sido muy destacados.

Se llama cuenca alta del Olivares a la porción de esta cuenca que está ubicada por encima del Gran Salto del Olivares (Figura 1), una pared rocosa de cientos de metros de altura por donde en la actualidad caen en cascada las aguas provenientes del glaciar Juncal Sur y Risopatrón ubicados al norte, y desde el conjunto de glaciares Olivares Alfa, Paloma Norte, Beta y Gamma, entre otros menores ubicados al oeste.

La región superior al Gran Salto del Olivares era prácticamente desconocida antes de Lliboutry, porque superar esos farellones era y sigue siendo una travesía difícil que requiere un gran esfuerzo físico y técnico, por lo que siempre ha constituido una barrera para exploradores. Por ejemplo, Fickenscher (1930) realizó una expedición por el río Olivares en 1915 y 1924, sin poder subir esta barrera, lo que explica que al publicar

su Carta de Excursionismo del año 1929, sólo incluyó el glaciar Juncal Sur y Risopatrón que vio a gran distancia, dibujando hacia el oeste del Gran Salto del Olivares, una cuenca sin hielo y con un río que erróneamente fluía al norte. Sin embargo, en la parte oeste de la cuenca alta del Olivares estaba el Ventisquero Olivares mencionado vagamente por Reichert y Hebling, de la Comisión Argentina de Límites, cuando escalaron el Nevado del Plomo, en 1910, y el Nevado Juncal, en 1912. Este ventisquero era una gran masa de hielo en aquella época, pero sólo fue descrita en detalle por primera vez por Barrera (1937), quien lo exploró en 1935 cuando subió a la cordillera Morada desde el río Blanco. A los pocos años cuando Piderit (1943) hizo una travesía en la zona vio que este gran ventisquero tenía algunas morrenas mediales y que se había separado en dos, a los que llamó Alfa y Beta. En 1951, el Beta se había vuelto a dividir en dos cuerpos de hielo a lo largo de una morrena medial vista el año 1935, los que se denominaron Beta y Gamma. Posteriormente se identificó una nueva división, esta vez entre el Alfa y Alfa prima (Lliboutry, 1954).

En otras palabras, entre 1935 y 1956 el gran ventisquero Olivares se dividió al menos en 4 glaciares, con un retroceso frontal del Beta de 1 km entre 1943 y 1956, y con la formación de una morrena de ablación entre el Alfa y el Beta, donde el hielo experimentó una importante «estagnación» y «desaparición». Estos retrocesos rápidos fueron explicados porque los glaciares eran poco escalonados en altitud, lo que los hacía muy sensibles a toda variación del clima.

### La cascada de hielo del Gran Salto del Olivares

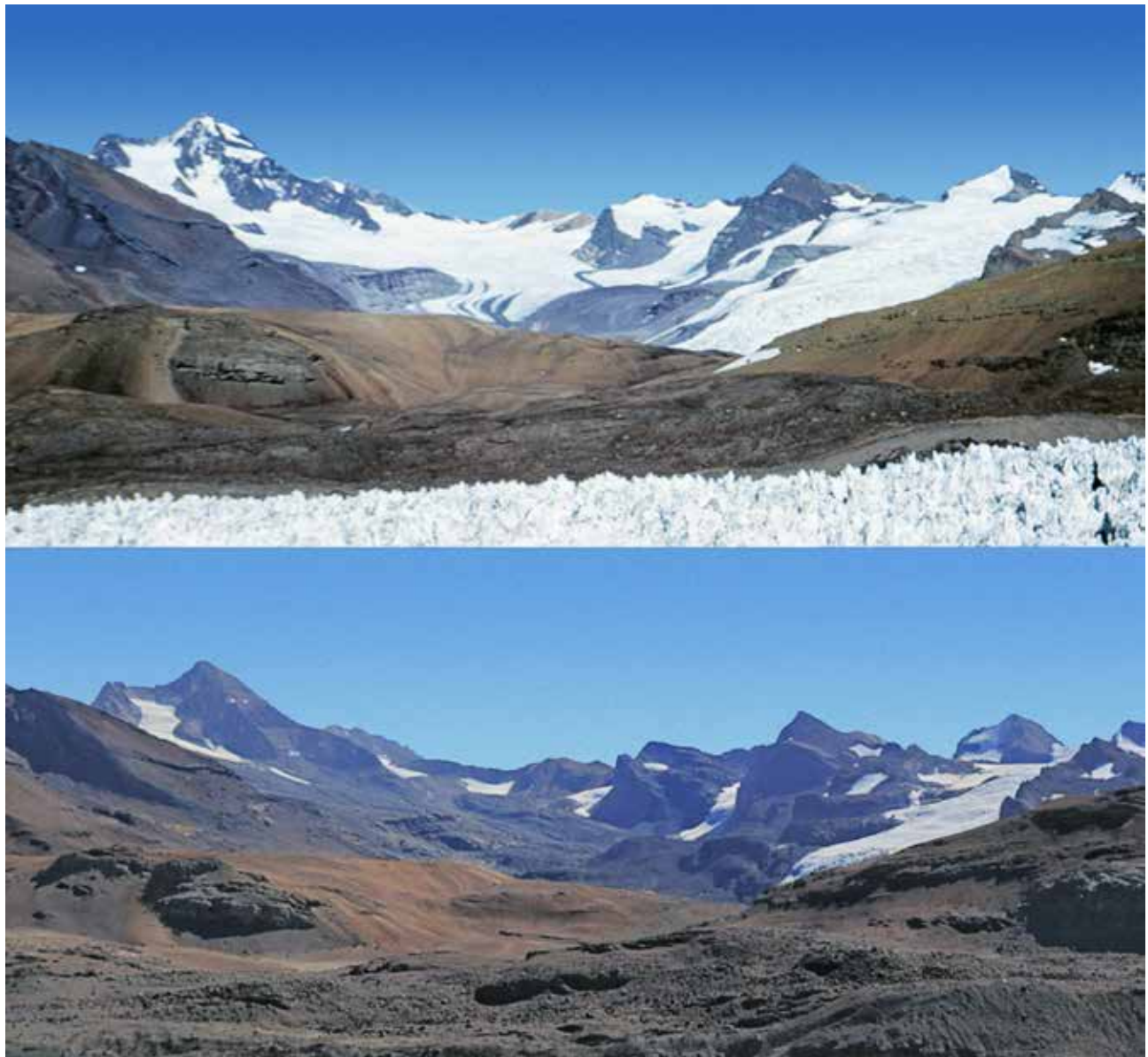
En el sector norte de la cuenca alta del Olivares se ubica el glaciar Juncal Sur, el más grande de Chile central, que en el año 1924 (Fickenscher, 1930) estaba confinado por encima del Gran Salto del Olivares, desde donde estrepitosamente bajaban sus aguas hasta el fondo del valle del río Olivares. En 1935 seguía confinado a las partes altas (Barrera, 1937), pero luego, en el año 1947, según Lliboutry (1956), este glaciar experimentó un fuerte avance que generó una gran cascada de hielo con un caos de seracs que bajó unos 500 m por el Gran Salto del Olivares hasta formar un glaciar pedemontano de cerca de 1 km<sup>2</sup> de superficie ubicado en el fondo del valle, represando el río proveniente del oeste (con aguas desde los glaciares Alfa, Beta y Gamma) y formando una lagunita. En 1954, siempre siguiendo a Lliboutry, esta

lagunita se había vaciado y el hielo prácticamente había desaparecido del fondo del valle. Este repentino avance fue adjudicado por Lliboutry a la serie de años húmedos de 1898-1905 y a la sequedad de los años posteriores que permitieron al hielo aumentar de temperatura.

De acuerdo a estos antecedentes y estudios de Lliboutry a mediados de los 1950's, los glaciares ya evidenciaban una importante reducción areal desde la Pequeña Edad del Hielo, período que se caracterizó por ser la última expansión de glaciares a lo largo de todos los Andes, el cual tuvo varios pulsos, siendo el más

reciente el que terminó aproximadamente a mediados del siglo XIX (Espizúa y Pitte, 2009). Esta expansión de glaciares generó una serie de cordones morrénicos laterales y algunos frontales, los que no pasaron inadvertidos para Lliboutry, quien pudo medir diferencias de altura de 100-150 m entre el hielo en los 1950's y la *trim line* generada por los hielos de la cuenca alta del Olivares en el último avance glacial.

Este proceso de deglaciación ha continuado hasta el presente, con cada vez mayores retrocesos, adelgazamientos y fragmentaciones, lo que ha llevado a que en el



3. Arriba, foto de la parte oeste de la cuenca alta del Olivares tomada en 1950 desde el margen oriental del Juncal Sur por Eberhard Meier, del Club Andino Alemán (DAV). Abajo, foto de Sebastián Cisternas, del CECs, tomada en 2018 desde aproximadamente la misma posición.



4. Midiendo balance de masa glaciar con balizas y GPS a los pies del cerro Fickenschel.

año 2018 el área que cubrían los 4 grandes glaciares mejor descritos por Lliboutry (Alfa, Beta, Gamma y Juncal Sur), hoy esté dividida en más de 20 glaciares de menor tamaño.

La reconstrucción de las variaciones de los glaciares desde la época de Lliboutry se ha facilitado enormemente por la disponibilidad de fotografías aéreas verticales y, más recientemente, por las cada vez más frecuentes imágenes satelitales de alta resolución espacial y espectral. Con estas imágenes es posible delinear en detalle los contornos glaciares de las zonas más inaccesibles y con una precisión que puede llegar a ser submétrica.

Los programas computacionales actuales permiten proyectar, georreferenciar, analizar e interpretar dichas imágenes en forma rápida, precisa y sencilla, por lo que la calidad de los mapas y datos no tiene comparación con los producidos hace más de medio siglo. Por ello, para determinar los cambios de áreas glaciares, en este trabajo se han comparado las fotografías aéreas Hycon de 1955 con todos los datos disponibles desde entonces, confirmando un retroceso frontal significativo (de varios km en algunos casos), una importante reducción de áreas englacadas (-32% de superficie) y una progresiva fragmentación de los cuerpos de hielo principales de la

cuenca alta del Olivares (en 2018 se observa un aumento en el número de glaciares 37% mayor que en 1955).

En la Figura 1 pueden verse las posiciones frontales de 1955 y 2018 para toda la cuenca alta del Olivares y glaciar Esmeralda. En la zona destaca el Juncal Sur, que ha perdido 25% de su superficie desde 1955 (Figura 2), así como el glaciar Olivares Beta, que pasó de 12,8 km<sup>2</sup> en 1955 a tener un área de 8,4 km<sup>2</sup> distribuida en 8 fragmentos en 2018, lo que representa una pérdida de un 34%.

En el caso del Olivares Alfa, el retroceso y pérdida de superficie es aún mayor, puesto que el área de 1955 era de 17,5 km<sup>2</sup> mientras que en el 2018 se ha fragmentado en 9 partes, que totalizan 5,9 km<sup>2</sup>, lo que representa una pérdida del 66% de superficie. En este glaciar, al igual que lo observado por Lliboutry en los 50's, no toda la pérdida de área del Alfa es por retroceso, puesto que parte del hielo ha quedado sepultado por material morrénico debido al adelgazamiento experimentado.

Esto demuestra que este glaciar ha estado en desequilibrio con el clima en niveles mayores que el resto de los glaciares de la cuenca, incluso desde mediados del siglo XX, debido a su escaso desarrollo altitudinal y una orientación predominantemente norte. Este glaciar también es uno de los que tienen más material morrénico cerca de su frente, según lo observado por Lliboutry desde principios del siglo XX.

### El glaciar Echaurren

Estas reducciones de área generalizadas se deben a que los glaciares no están en equilibrio con las condiciones climáticas observadas en las últimas décadas, las que se han caracterizado por mostrar una tendencia de calentamiento atmosférico en altura (Falvey y Garreaud, 2009). Este desequilibrio tiene una expresión concreta en la medición anual de balance de masa glaciar, método que determina la cantidad de masa que entra y sale de un glaciar en un año hidrológico, lo que depende de las condiciones meteorológicas anuales y, en el mediano plazo, de los cambios del clima (Rivera y otros 2016).

Este tipo de mediciones se llevan a cabo desde 1975 por la Dirección General de Aguas (DGA) en el glaciar Echaurren Norte, ubicado en la cuenca del río Maipo (Figura 1), unos 50 km al sur del glaciar Juncal Sur. En la serie de datos del Echaurren Norte entre 1975 y 2017 se puede ver que el balance de masa acumulado fue de -20 m equivalentes de agua, un valor alto comparado

con otros glaciares a nivel mundial, aunque no excepcional, lo que confirma que Chile central está experimentando fuertes pérdidas de masa de hielo.

Esta serie de balances de masa mostró cierta estabilidad entre 1975 y principios de la década de 1990, y entre 1999 y 2009, pero a partir de esa fecha y hasta el presente los valores han sido negativos, en consonancia con la megasequía que ha afectado a esta parte del país en estos años (Garreaud y otros, 2017).

### Comparación de documentos históricos

Una forma gráfica de visualizar los cambios ocurridos en los glaciares de la zona desde los tiempos de Lliboutry es comparar fotografías obtenidas por andinistas de la época con fotos modernas tomadas desde los mismos puntos. Un ejemplo de ello está en la Figura 3, donde se ve la foto tomada por Eberhard Meier, del DAV, durante su ascensión en febrero de 1950 al Nevado del Plomo, que se compara con una foto tomada por Sebastián Cisternas desde aproximadamente el mismo punto el año 2018, durante la realización de tareas de investigación glaciológica del CECs en la zona (Figura 4). En el primer plano de la Figura 3 se ve que la superficie de la lengua del glaciar Juncal Sur se movía de derecha a izquierda (norte-sur) en dirección del Gran Salto del Olivares en 1950. Al fondo de la foto se ve el Olivares Alfa con sus morrenas mediales y a la derecha está el Olivares Gamma cayendo en cascada hacia la izquierda (sur). En la foto del 2018 se ve que la lengua del Juncal Sur ha desaparecido completamente, se ven algunos fragmentos de lo que era el Olivares Alfa y se ve cómo el Olivares Gamma ha adelgazado, reducido su área y retrocedido desde 1950. El retroceso frontal del Olivares Gamma desde el año 1955 al 2018 es de 1,1 km lineal.

Otra forma de evaluar gráficamente los cambios glaciares de las últimas décadas es comparar fotos antiguas con imágenes satelitales modernas de alta resolución, las que deben ser ortorectificadas con modelos digitales de elevación obteniéndose proyecciones tridimensionales, que pueden visualizarse desde aproximadamente el mismo punto desde donde se tomó la foto histórica. En la Figura 5 se ve un ejemplo de este procedimiento, donde hay una foto del Juncal Sur capturada por Eberhard Meier en 1950 comparada con una imagen de satélite del año 2018.

El retroceso medido desde la posición frontal del Juncal Sur en 1950 y el 2018 es de aproximadamente



5. Arriba, foto del glaciar Juncal Sur tomada en 1950 por Eberhard Meier, del Club Andino Alemán (DAV). Abajo, imagen de satélite Digital Globe del 22 de febrero del 2018.

5 km lineales. En términos altimétricos, en 1950 el glaciar bajaba hasta el fondo del Gran Salto del Olivares a una cota aproximada de 2.810 m. En el 2018, el frente del Juncal Sur llega hasta 3.810 m sobre el nivel del mar.

En síntesis, a más de 60 años de los pioneros trabajos glaciológicos de Louis Lliboutry, se puede afirmar con certeza que sus publicaciones siguen siendo referencias fundamentales para entender los glaciares de Chile y evaluar sus cambios.



Revisar los trabajos de Lliboutry provoca nostalgia por una época en que casi todo era desconocido sobre los glaciares de Chile y cuando cada dato se obtenía con un inmenso esfuerzo humano y técnico. Vaya por todo ello nuestra admiración y agradecimiento por su contribución a Chile.