

Senador/a Comisión de Medio Ambiente

Senado de Chile

Presente

Junto con saludar, el propósito del documento que se adjunta a esta misiva es proporcionar una evaluación técnico-científica del estado actual del proyecto de Ley de protección de Glaciares. Esta evaluación ha sido desarrollada por un **Panel Independiente de Investigadores en Ciencias de la Criósfera**. Los miembros de este panel trabajan en distintas universidades y centros de investigación de Chile y el mundo, contando con formación doctoral en prestigiosas universidades de Latinoamérica, Norteamérica y Europa.

Los/as investigadores abajo firmantes, muchos/as de los/as cuales también pertenecen a la Sociedad Chilena de la Criósfera (SOCHICRI), estudian los fenómenos del hielo y la nieve situados en diferentes regiones de Chile y el mundo. Por lo anterior, el Panel Independiente de Investigadores en Ciencias de la Criósfera es capaz de proveer una perspectiva equilibrada de los aspectos técnicos del proyecto de ley, considerando a su vez los diversos ambientes socio-naturales donde la criósfera se emplaza y actúa. Este documento, titulado **“Aportes de la comunidad glaciológica independiente a la discusión del proyecto de Ley de protección de glaciares (Boletines N°s 11.876-12 y 4.205-12, refundidos)”**, presenta contribuciones de base técnica para cada uno de los artículos en la actual discusión.

Es de nuestro mayor interés aportar rigor analítico y científico al proceso de tramitación de esta Ley, la cual es clave para Chile dada la abundancia de los glaciares en el territorio nacional y su importancia para la seguridad hídrica del país. Así, hemos realizado nuestro mejor esfuerzo para señalar problemas y sugerir soluciones para que esta ley sea adecuada en el contexto de cambio climático presente y futuro.

Esperando le sea de utilidad este aporte, lo/a saludan atentamente,

Dr. José Araos, Departamento de Geografía. U. Alberto Hurtado. Soc. Chilena de Geomorfología.

Dr. Sebastián Crespo, Centro de Acción Climática, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, CR2

Dr. Raúl Cordero, Universidad de Santiago

Dr. Alejandro Dussaillant J., Middlesex University, UK, y Universidad de Aysén, Chile

Dra. Inés Dussaillant L., World Glacier Monitoring Service, University of Zurich, Suiza

Dr. David Farías, Dpto. de Geografía, U. de Concepción y U. de Erlangen-Nuremberg, Alemania

Dr. Alfonso Fernández, Dpto. de Geografía, Mountain GeoScience Group, U. de Concepción

Dr. (c) Hans Fernández, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile

Dr. Francisco Fernandoy, Universidad Andrés Bello

Dr. Iñigo Irarrázaval, Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia

Dr. Fabrice Lambert, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile

Dr. Camilo Rada, Centro de Investigación GAlA Antártica, Universidad de Magallanes

Dr. (c) Sebastián Ruiz, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile

Dr. Marius Schaefer, Instituto de Ciencias Física y Matemáticas, Universidad Austral de Chile

Dr. Marcelo Somos-Valenzuela, Centro Butamallín de Invest. en Cambio Global, U. de la Frontera.

Reseñas biográficas de los firmantes

Dr. José Araos

Geógrafo y Doctor en Ciencias con mención en Geología de la Universidad de Chile. Ha participado como investigador en distintos centros de investigación regionales,, involucrándose en proyectos glaciológicos y geofísicos en la Península Antártica, Patagonia y norte del País. Actualmente es académico del Departamento de Geografía de la Universidad Alberto Hurtado (UAH), del Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC), y es Director del Diplomado en Cambio Climático de la UAH.

Dr. Sebastián Andrés Crespo

Dr. Ciencias Aplicadas, UNLu, Bs. As., Arg y Dr. (c) Ciencias Sociales, UNT, Arg. Actualmente se desempeña como profesor asociado y director del Laboratorio de Territorios Hidrosociales y Cambio Climático en el Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV). Es investigador del Centro de Acción Climática (PUCV) y del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [CR]2. Ha trabajado en el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (CONICET) y el Paul Scherrer Institute (Suiza).

Dr. Raúl Cordero Carrasco

Doctor en Ciencias Naturales de la Universidad de Hannover (Alemania). Es académico de la Universidad de Santiago, y líder del grupo de investigación Antártica de la misma universidad. Ha generado casi un centenar de publicaciones y dirigido más de una docena de proyectos de investigación. Es miembro de la Comisión Internacional de Ozono (IO3C), del Comité Directivo de la Red para la Detección de Cambios en la Composición Atmosférica (NDACC) y representante nacional en el consejo consultivo de monitoreo atmosférico de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Dr. Alejandro Dussailant J.

Doctor en Ingeniería Civil y Ambiental (Recursos Hídricos) University of Wisconsin-Madison (EEUU), con más de 25 años de experiencia en hidrología de ecosistemas naturales (y artificiales), entre ellos sistemas fluviales alimentados por glaciares. Investigador principal de Fondecyt, Fondef, FIC y fondos internacionales. Miembro de European Geophysical Union, Sociedades Chilenas de Ingeniería Hidráulica y de Geomorfología, British Society of Geomorphology y British Hydrological Society.

Dra. Inés Dussailant L.

Doctora en Glaciología y Teledetección de la Universidad Paul Sabatier, Toulouse (Francia), especializada en la observación y monitoreo local, regional y global de cambios glaciares y balance de masa, con particular interés en la región Andina. Trabaja como investigadora postdoctoral en el World Glacier Monitoring Service, Universidad de Zurich, Suiza, participando en diversos proyectos financiados por fondos Suizos, internacionales y la Unión Europea (Horizon 2020).

Dr. David Farías

Doctor en Geociencias de la Universidad de Erlangen-Nuremberg (Alemania). Actualmente se desempeña como investigador postdoctoral en el Departamento de Geografía de la Universidad de Concepción y de la Universidad de Erlangen-Nuremberg, Alemania. Miembro fundador de la Sociedad Chilena de la Criósfera (SOCHICRI).

Dr. Alfonso Fernández

Doctor en Geografía de la Ohio State University, USA. Actualmente se desempeña como profesor Asociado de Geografía Física en la Universidad de Concepción. Es y ha sido investigador principal de proyectos financiados

por Fondecyt, FONDEF, y National Geographic. Miembro fundador de la Sociedad Chilena de la Criósfera, además de profesor e investigador afiliado a la Universidad de Texas San Antonio, USA.

Dr. (c) Hans Fernández

Geógrafo, MSc in Governance of Risk and Resources, Dr. (c) en Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Su trabajo está orientado a reconstruir la historia glacial y climática de Chile central. Miembro de la Sociedad Chilena de la Criósfera (SOCHICRI) y del núcleo de investigación DeglaciAndes, del que participan también las universidades suizas de Zúrich y Friburgo.

Dr. Francisco Fernandoy

Geólogo de la Universidad de Concepción y Dr. en Geociencias de la Universidad de Potsdam y el Centro de Investigación Polar y Marina de Alemania (AWI). Actualmente es profesor asociado e investigador de la Universidad Andrés Bello (Viña del Mar), donde además dirige el laboratorio de análisis isotópico de esta casa de estudios. Miembro del directorio de la Sociedad Chilena de la Criósfera. Su investigación glaciológica se centra en los Andes Centrales, Campos de Hielo Patagónicos y Antártica.

Dr. Inigo Irrázaval

Doctor en Ciencias de la Tierra de la Universidad de Lausanne, Suiza. Actualmente se desempeña como investigador postdoctoral en el Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP), Coyhaique, Chile. Su investigación incluye estudios de hidrología glacial y geoestadística. Miembro de la Sociedad Chilena de la Criósfera (SOCHICRI).

Dr. Fabrice Lambert

Doctor en Física del Clima de la Universidad de Berna, Suiza. Actualmente Profesor Asociado en el Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Director alterno del Núcleo Milenio Paleoclima e Investigador Asociado del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. Miembro de la SOCHICRI y de la Sociedad Chilena de Ciencias del Cuaternario (SOCHQUA). Experto en cambio climático.

Dr. Camilo Rada G.

Doctor en Geofísica de la Universidad de British Columbia (Canadá), especializado en procesos subglaciares. Cuenta con 13 años de experiencia en investigación en Glaciares y acumula varios años de estadía en los Campos de Hielo Patagónicos y Antártica. Actualmente se desempeña como investigador asociado del Centro de Investigación GAIA Antártica de la Universidad de Magallanes.

Dr. (c) Sebastián Ruiz

Biocientífico, MSc en Cs. Antárticas, Dr.(c) en Geografía, Pontificia Universidad Católica. Asociado a red de monitoreo Permachile, socio Association of Polar Early Career Scientists (APECS-Chile), y representante en Chile del Permafrost Young Researchers Network (PYRN, International Permafrost Association). Desde 2012 trabaja en la investigación de la criósfera en los Andes Centrales, Patagonia y Antártica.

Dr. Marius Schaefer

Físico de la Universidad de Freiburg (Alemania), Doctor de las Ciencias de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich. Profesor Asistente de la Universidad Austral de Chile y actualmente becario de la fundación Humboldt en la Universidad de Erlangen-Nuremberg (Alemania). Investigador Principal de proyectos FONDECYT, representante nacional de Chile en el World Glacier Monitoring Service, Miembro fundador e integrante de la directiva de la Sociedad Chilena de la Criósfera (SOCHICRI) y editor científico de la revista Journal of Glaciology.

Dr. Marcelo Somos

Doctor en Ingeniería Civil (Recursos Hídricos) University of Austin Texas (EEUU). Más de 10 años de experiencia en la evaluación de los impactos del cambio global en sistemas hidro sociales, con proyectos en glaciares de montaña en Nepal, la meseta Tibetana, Perú, Estados Unidos y Chile, evaluando los riesgos asociados al retroceso de glaciares. Académico de la facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales, y Director del Centro Butamallin de Investigación en Cambio Global de la Universidad de la Frontera, miembro de la SOCHICRI.

Aportes de la comunidad glaciológica independiente a la discusión del proyecto de Ley de protección de glaciares (Boletines N°s 11.876-12 y 4.205-12, refundidos)

Los aquí firmantes, reconocen que el proyecto de ley para la protección de los glaciares (Boletines N°s 11.876-12 y 4.205-12, refundidos) representa en su forma actual un avance significativo. Sin embargo, nos es imperativo señalar cuales son, a nuestro juicio, sus principales limitaciones desde la perspectiva científica. En algunos casos hemos propuesto cambios concretos en el articulado para subsanar dichas limitaciones.

Cada preocupación u observación se lista a continuación **en orden de prioridad**. Cuando presentamos una propuesta de modificación al articulado se presenta una tabla con dos columnas. A la izquierda el texto actual con los cambios propuestos, y a la derecha la argumentación que respalda la propuesta.

1. Exclusión del agua que se encuentra bajo el glaciar como parte constitutiva del mismo (Prioridad Máxima)

Artículo 2, Letra a, inciso segundo	
Se consideran parte constitutiva de un glaciar los cursos y cuerpos de agua en su superficie y en su subsuelo interior. Si un glaciar descarga a un lago, laguna o al océano, se considerará parte constitutiva de este la lengua flotante adosada.	Parte constitutiva del glaciar es la red de conductos que permiten transportar el agua generada o recibida por el glaciar. Estos conductos pueden estar sobre (o en el perímetro), dentro, o bajo el glaciar. En términos técnicos se habla del drenaje supra-, intra- y subglaciar. El articulado erróneamente excluye el drenaje subglaciar de sus partes constitutivas. En particular, las propiedades del drenaje subglaciar regulan la velocidad con que el glaciar se desliza sobre la roca o sedimentos que lo subyacen, y esta velocidad es un factor crucial para mantener el equilibrio de la masa de hielo. El Anexo "Rol e importancia del agua subglaciar en la estabilidad de un glaciar", detalla y explica en términos simples las bases científicas de lo aquí expresado.

2. Afectaciones significativas a los glaciares no cubiertas por la ley (Prioridad Máxima)

En su forma actual, la ley propuesta no protege a los glaciares de algunos efectos significativos, en particular:

a. El cambio de nivel, temperatura o salinidad de los cuerpos de agua que están en contacto con los frentes glaciares.

Los glaciares con frecuencia tienen contacto directo con cuerpos de agua, los que pueden ser marinos (fiordos y canales) o lacustres. Si la construcción de represas, canales, bocatomas u otras infraestructuras alteran el nivel, salinidad o temperatura de estos cuerpos de agua, éstos podrían sufrir un impacto significativo y potencialmente adverso en la preservación del glaciar. Sugerimos crear una nueva categoría para los cuerpos de agua en contacto con glaciares y exigir que las actividades en dichos cuerpos de agua con potencial afectación a los glaciares se sometan al SEIA.

b. La acumulación de material particulado en la superficie glaciar.

Los glaciares blancos o descubiertos sufren naturalmente un derretimiento superficial producto de la radiación solar que reciben. Sin embargo no toda la energía que reciben resulta en derretimiento, ya que la mayor parte de esta energía es reflejada. La fracción de la energía absorbida depende tanto del tipo de hielo o nieve que esté expuesto en superficie, como de su contenido de impurezas, tales como polvo, detritos u hollín en la superficie del glaciar. La ley en su forma actual no es explícita respecto al tratamiento que se dará a fuentes antrópicas de polvo, hollín u otras impurezas que sin estar en los glaciares, el permafrost ni el ambiente periglacial, podrían depositarse sobre los glaciares y generar un impacto significativo en su equilibrio.

3. Exclusión de la capa activa del permafrost como parte constitutiva del mismo (Prioridad Máxima)

Artículo 2, Letra c	
Permafrost: tipo de suelo, sedimento o roca, con o sin hielo y materia orgánica, que permanece por debajo de los 0°C por dos o más años consecutivos. Cuando el permafrost exista sólo en profundidad, para efectos de esta ley se considerará parte	Es muy importante que se reconozca que en la gran mayoría de los casos, la existencia del permafrost depende de la presencia de una capa de suelo superficial denominada "capa activa". Esta capa activa se descongela total o parcialmente cada verano alcanzando

<p>constitutiva de éste la capa de suelo superficial que lo protege de las variaciones estacionales de temperatura, la que se denomina capa activa.</p>	<p>temperaturas por sobre los 0°C. En particular, ésta capa activa es la que protege al permafrost de las altas temperaturas estivales. De este modo, la protección del permafrost requiere incuestionablemente de la protección de la capa activa asociada.</p> <p>Es importante destacar además, que dependiendo de sus características, la capa activa puede cumplir un rol hidrológico importante a escala estacional o de más largo plazo en regiones áridas y semi-áridas.</p>
---	--

4. Inconsistencia entre el grado de protección de los glaciares y el de zonas aledañas que son requisito absoluto para su subsistencia (Prioridad Máxima)

Parte del ambiente periglacial, y con frecuencia una fracción muy significativa del mismo, es absolutamente necesaria para la existencia del glaciar (tal como lo cita el Art 2, inc. b). En ocasiones el **ambiente periglacial puede llegar a constituir la principal área de acumulación de nieve y hielo para el glaciar**, la que es transportada al mismo por medio de avalanchas o viento. Además, el ambiente periglacial **está conectado hidrológicamente al cuerpo de hielo**. Considerando estos antecedentes, corresponde que el ambiente periglacial tenga el mismo nivel de protección que el glaciar, es decir, protección absoluta. A esta prohibición se debieran aplicar excepciones similares a las establecidas para los glaciares en el Artículo 5. Tal vez con la incorporación de actividades tradicionales como pastoreo a pequeña escala e infraestructura de apoyo para actividades sostenibles como turismo, educación e investigación científica.

5. Omisión de las funciones del permafrost (Prioridad Alta)

<p>Artículo 2, Letra c</p>	
<p>Permafrost: tipo de suelo, sedimento o roca, con o sin hielo y materia orgánica, que permanece por debajo de los 0°C por dos o más años consecutivos. La ley reconoce expresamente que el permafrost, en general, provee sustento a la biodiversidad y es</p>	<p>En las letras a y b del Artículo 2, además de describirse los glaciares y el ambiente periglacial, se describen y reconocen sus funciones. Sugerimos usar la misma estructura para el permafrost, agregando al articulado una puntualización de las funciones del permafrost con y</p>

reserva de agua.

sin hielo.

6. Ausencia de instituciones relacionadas con los roles no hidrológicos en la elaboración de reglamentos y fiscalización (Prioridad Alta)

Los Artículos 5 y 8, asignan a la Dirección General de Aguas (DGA) la elaboración de reglamentos y las tareas de fiscalización. Sin embargo la ley a través de su articulado reconoce que la protección de los glaciares no tiene como propósito resguardar sólo su rol hidrológico, sino que también su rol como sustento de biodiversidad, regulación climática, fuente de información científica y turismo sustentable (Artículo 1°). En este contexto, resulta recomendable incorporar a instituciones relacionadas con dichos aspectos de los glaciares en la elaboración de reglamentos y darles también facultades de fiscalización independientes. Para la elaboración de reglamentos, se recomienda formar un comité *ad-hoc* compuesto por representantes de las instituciones relacionadas a cada uno de los roles y servicios de los glaciares señalados en el artículo primero.

7. Idoneidad del término “ambiente periglacial” (Prioridad Media)

El término “Ambiente periglacial” tiene un significado preciso en las ciencias de la criósfera, y su definición no coincide con la que presenta la ley. Ésto genera un conflicto de terminología con la aceptada en el mundo científico. Proponemos que para efectos de esta ley se utilice el término “entorno glaciar” en todas las instancias en que se utiliza “ambiente periglacial” en la versión actual.

8. Requerimiento de persistencia de 10 años en la definición de glaciar (Prioridad Media)

Artículo 2, Letra a, inciso primero

Glaciar: todo volumen de agua en estado sólido, de ocurrencia natural, que haya perdurado al menos diez dos años, con presencia eventual o estacional de neviza y nieve superficial, con o sin presencia de material detrítico rocoso superficial o incorporado en

El requisito de 10 años es cuestionable. En general, la comunidad científica utiliza un mínimo de dos años, los que aseguran abarcar al menos un ciclo hidrológico completo. Recomendamos reducir este requerimiento a dos años. De mantenerse este periodo de 10 años,

<p>su interior, y con evidencia de flujo actual o pasado, cualquiera sea su tamaño, forma geométrica y ubicación.</p>	<p>es importante aclarar dos puntos: (1) Que la persistencia requerida es del hielo, no del glaciar. Por ejemplo, cuando un glaciar se fragmenta en dos, uno de los fragmentos puede ser inventariado como un nuevo glaciar que no existía hace 10 años. Sin embargo, el hielo que lo constituye sí existía. (2) De no existir imágenes o datos que demuestren que un glaciar no existía hace menos de 10 años, se debe presumir que sí existía. Esto dado que para algunos glaciares podrían no existir imágenes o datos con 10 años de antigüedad y con la resolución, cobertura de nubes y cobertura de nieve adecuada para determinar la presencia de un glaciar.</p>
---	---

9. Requerimiento de flujo de la definición de glaciar (Prioridad Media)

<p>Artículo 2, Letra a, inciso primero</p>	
<p>Glaciar: todo volumen de agua en estado sólido, de ocurrencia natural, que haya perdurado al menos diez años, con presencia eventual o estacional de neviza y nieve superficial, con o sin presencia de material detrítico rocoso superficial o incorporado en su interior, y con evidencia de flujo actual o pasado, cualquiera sea su tamaño, forma geométrica y ubicación.</p>	<p>La evidencia de flujo puede ser extremadamente difícil de medir en glaciares tan pequeños como los que incorporará el inventario nacional de glaciares. En particular, en glaciares de base fría o glaciares de roca. Adicionalmente, dicho flujo podría no existir en glaciares confinados a depresiones. Se sugiere eliminar este requerimiento.</p>

Anexo

Rol e importancia del agua subglaciar en la estabilidad de un glaciar

Por el Dr. Camilo Rada G., especialista en procesos subglaciares
con la colaboración de los firmantes.

Resumen

La gran mayoría de los glaciares de Chile son de base templada, lo que significa que tienen agua líquida en su base, la que fluye a través de un conjunto de conductos conocidos como el drenaje subglaciar y que se emplazan en el hielo, la roca subyacente y el espacio entre el hielo y la roca. A diferencia de un río, el drenaje subglaciar se encuentra presurizado, esto significa que la presión del agua es mayor a la presión atmosférica, y de manera similar al sistema de tuberías de una casa, el agua puede subir en contra de la fuerza de gravedad, y una fuga o incorporación de agua puede afectar la presión dentro del sistema. En el caso del drenaje subglaciar, la presión del agua en su interior afecta la velocidad con que se mueve el glaciar. Está demostrado que una alteración de la presión del drenaje subglaciar puede afectar la velocidad del glaciar y con ello su equilibrio, impactando a largo plazo su tamaño y volumen. Una afectación de la estructura y presión del drenaje subglaciar puede darse, por ejemplo, por la captura de agua en cualquiera de los conductos subglaciares y subterráneos conectados a él, o por la creación de conexiones con acuíferos o conductos que no formaban parte del mismo. La captura de agua puede darse por la creación de un túnel que intercepte aguas subterráneas provenientes del drenaje subglaciar. La creación de nuevas conexiones podría producirse por cambios en el estrés de la roca producto de la perforación de un túnel, depositación de material o por tronaduras.

1. Introducción

El estado de conservación de un glaciar y la persistencia de los servicios ambientales que éste entrega, están determinados principalmente por el balance de masa, término técnico que se refiere a cuánto hielo gana o pierde un glaciar cada año. Este balance de masa glaciar está determinado tanto por las condiciones ambientales (por ejemplo temperatura y precipitación), como por la dinámica del glaciar. La dinámica glaciar se refiere al movimiento de hielo dentro del glaciar, en particular, esta incide en la velocidad con que el hielo es transportado desde la parte alta del glaciar hacia su frente. Este movimiento del hielo es demasiado lento para ser percibido por el ojo humano, lo que a veces invisibiliza el hecho de que los glaciares son como ríos de hielo, y que en ellos fluyen grandes cantidades de agua pendiente abajo, tal como fluye en los ríos pero en estado sólido. Notemos que en la parte alta las temperaturas son menores y el hielo se preserva, mientras que en las partes bajas éste se derrite. Por lo tanto, es clave para la estabilidad del glaciar cuánto hielo se acumula en su parte alta, así como la velocidad con que éste hielo es transportado a las zonas bajas y cálidas. Este transporte de hielo tiene dos componentes: deformación interna y deslizamiento basal (Figura 1).

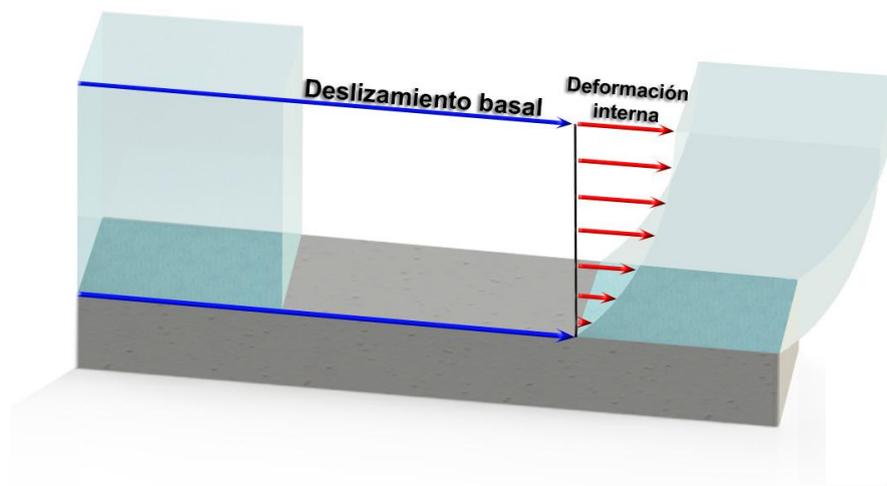


Figura 1: El flujo de hielo en un glaciar tiene dos componentes, la primera determinada por la deformación interna y la segunda por el deslizamiento basal (Fuente: elaboración propia).

El primero corresponde a la deformación del hielo bajo la influencia de su propio peso, como consecuencia del comportamiento viscoelástico del hielo glaciar [Lliboutry, 1958; Weertman, 1957, 1964]. Si bien la descripción técnica del comportamiento viscoelástico escapa de los alcances de este documento, estos combinan propiedades tanto de materiales líquidos como sólidos. Puede ser ilustrativo mencionar otros materiales con un comportamiento similar pero con tasas de deformación perceptibles en condiciones cotidianas, como por ejemplo la miel o la plastilina. En los glaciares, este proceso viscoelástico de deformación interna es particularmente lento, y en el caso de los glaciares de base templada – que contienen la inmensa mayoría del hielo glaciar en Chile – representa una contribución poco significativa al flujo de hielo. Por el contrario, en este tipo de glaciares el deslizamiento basal constituye el componente más importante para el transporte total de hielo [Gerrard et al., 1952, Mathews, 1959, Shreve, 1961, Savage and Paterson, 1963, Vivian, 1980, Boulton and Hindmarsh, 1987, Blake et al., 1994, Harper et al., 1998], y puede presentar variaciones muy significativas producto de cambios en la presión del agua que se encuentra en la base del glaciar [Iken and Bindshadler, 1986, Gordon et al., 1998, Nienow et al., 1998, Mair et al., 2001, Harper et al., 2005]. En términos técnicos, el agua en la base del glaciar se conoce como el drenaje subglaciar, y está constituido por conductos, fisuras y cavidades por las que fluye el agua tanto en el hielo en la parte inferior del glaciar como en la roca que lo soporta.

2. El drenaje subglaciar y su importancia

A diferencia de los ríos, el drenaje subglaciar se encuentra presurizado, y la magnitud de esta presión es el principal control del deslizamiento basal. Cuando la presión es alta, provee un soporte parcial del peso del glaciar, aumentando de este modo la velocidad de deslizamiento basal [Lliboutry, 1958, Hodge, 1979, Iken and Bindshadler, 1986, Fowler, 1987, Schoof, 2005, Gagliardini et al., 2007]. Al igual que una roca resulta más fácil de levantar si está parcial o completamente sumergida en agua, al glaciar le resulta más fácil desplazarse si está parcialmente soportado por agua a alta presión. Por el contrario, una baja presión en el drenaje subglaciar resulta en un acoplamiento muy fuerte entre el hielo y la roca, reduciendo de este modo la velocidad de deslizamiento basal.

La presión del agua en el drenaje subglaciar está naturalmente controlada por la cantidad de agua que ingresa al sistema y la configuración de los conductos que conforman dicho drenaje [Iken et al., 1983, Kamb et al., 1985, Iken and Bindshadler, 1986]. La cantidad de agua que ingresa depende de las tasas de derretimiento del glaciar, de cursos de agua que aporten su escorrentía al glaciar, y de las lluvias.

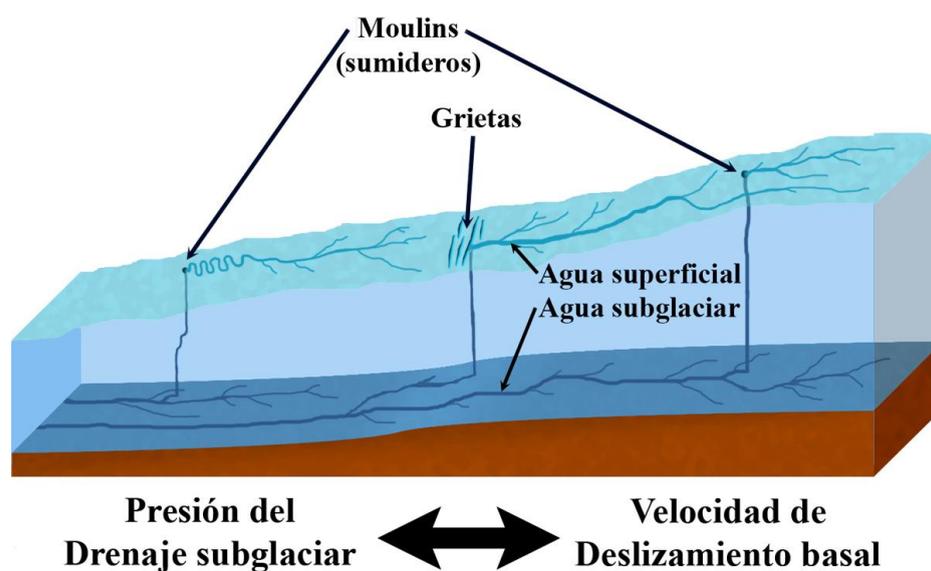


Figura 2: Dibujo esquemático del sistema de drenaje superficial y subglaciar (Fuente: elaboración propia).

Si se considera cualquier configuración fija de los conductos que conforman el drenaje subglaciar, un aumento del suministro de agua aumentaría la presión del sistema. La magnitud de este incremento depende principalmente de dos factores: 1) la permeabilidad de la roca o sedimentos bajo el glaciar, 2) la capacidad de almacenamiento de agua del sistema, la que amortigua los cambios de presión. Sin embargo, la configuración del drenaje subglaciar no está fija, y cambia en función del suministro de agua. Un aumento de la presión resulta en un ensanchamiento de los conductos con paredes de hielo, y una disminución de la misma resulta en el adelgazamiento de dichos conductos producto de la deformación del hielo bajo su propio peso. Cambios en el deslizamiento basal también

generan cambios en el drenaje subglaciar, al promover el crecimiento o reducción de conductos asociados a la roca subyacente [Hoffman and Price, 2014]. De este modo, el sistema de drenaje subglaciar puede cambiar, junto con la manera en que este responde a cambios en el suministro de agua. [Schoof, 2010].

El drenaje subglaciar está compuesto de varios tipos diferentes de conductos por los que fluye el agua, algunos de ellos han sido observados expulsando agua en los bordes del glaciar, dentro de cuevas y grietas naturales [Carol, 1947], o desde túneles artificiales excavados bajo los glaciares [Peterson, 1970, Vivian y Bocquet, 1973, McKenzie y Peterson, 1975, Vivian, 1980].

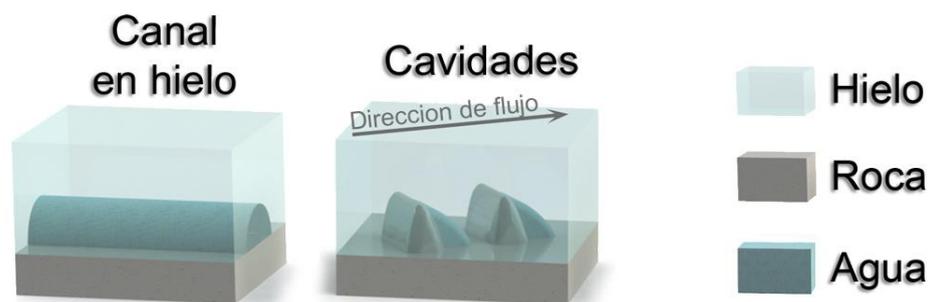


Figura 3: Principales tipos de conductos del drenaje subglaciar. Cuando los canales dominan a mayor suministro de agua, disminuye la presión del sistema, mientras que cuando las cavidades dominan, la presión aumenta (Fuente: elaboración propia).

A pesar de que los conductos observados varían considerablemente en forma, tamaño y ubicación, éstos pueden ser agrupados en dos tipos principales dependiendo de los mecanismos que les permiten formarse, crecer y cerrarse. Puesto que el hielo es un material viscoelástico, cualquier cavidad en él tenderá a cerrarse.

Por lo que para la existencia de un conducto subglaciar, es necesario que exista un proceso activo que lo mantiene abierto. El drenaje subglaciar se suele conceptualizar actualmente como compuesto de dos tipos principales de conductos: Canales R (de Röthlisberger) [Röthlisberger, 1972] y cavidades [Lliboutry, 1968, Walder, 1986] (ver Figura 3). Sin embargo, otros tipos de conductos han sido propuestos [Alley et al., 1986, Walder, 1982, Walder and Fowler, 1994, Ng, 2000, Boulton et al., 2007, van der Wel et al., 2013]. Cuando el drenaje subglaciar está dominado por unos pocos canales R de gran tamaño decimos que es un sistema canalizado, y cuando está conformado por una gran cantidad de cavidades interconectadas decimos que es un sistema distribuido.

Las cavidades se forman pendiente abajo de protuberancias de la roca bajo el glaciar. Al moverse el glaciar sobre estas protuberancias se produce pendiente abajo un espacio que el hielo no logra cerrar y se llena con agua creando una cavidad (ver Figura 3). Cuando múltiples cavidades se conectan, el agua puede comenzar a fluir entre ellas formando un sistema de drenaje distribuido. En estos sistemas, mientras más agua ingrese, mayor será la

presión de agua en su interior y con ello el glaciar acelerará. Sin embargo, un suministro sostenido de grandes cantidades de agua promueve la transformación gradual del sistema distribuido en uno canalizado.

En contraste, los canales R crecen debido a la disipación de energía (calor) derivada del flujo turbulento de agua en su interior. Esta energía derrite las paredes de hielo y el canal R crece. Esto resulta en que mientras más agua transporte un canal R, más grande crecerá, y el punto de equilibrio entre derretimiento de las paredes y cierre producto de la deformación del hielo será a menor presión. Esto genera un comportamiento contraintuitivo, donde a mayor suministro de agua la presión en el drenaje subglaciar disminuye y el glaciar desacelera [Nye, 1976, Spring and Hutter, 1982, Schoof, 2010].

Resumiendo, sabemos que la velocidad de un glaciar de base templada depende fuertemente de la presión de agua en dicha base. Donde mayor presión de agua conlleva un aumento de velocidad y viceversa. Por otro lado, un aumento en el suministro de agua al drenaje subglaciar puede tanto acelerar el glaciar, como desacelerarlo, dependiendo del tipo de drenaje subglaciar que esté presente. Pero este drenaje subglaciar no es estático y sufre transiciones de un tipo canalizado a uno distribuido y viceversa. El drenaje subglaciar suele evolucionar de un drenaje distribuido en el invierno a uno canalizado en el verano, pero no todos los glaciares logran formar un drenaje canalizado todos los veranos. Análogamente, no todos los glaciares logran restablecer un drenaje distribuido todos los inviernos.

3. Intervenciones al drenaje subglaciar

La compleja interacción mutua descrita entre el suministro de agua, la velocidad del glaciar, la presión del drenaje subglaciar y la estructura del mismo, conforman un sistema en el que resulta imposible predecir a priori qué magnitud o dirección tendrá el efecto de una intervención al drenaje subglaciar. Agregar o sacar agua del drenaje subglaciar puede tanto acelerar al glaciar como desacelerarlo. Lo mismo sucede si se altera en cualquier sentido la presión del drenaje subglaciar. Tanto la aceleración del flujo del glaciar como la desaceleración, pueden tener un impacto en el balance del glaciar. Este tipo de impacto puede ser gatillado por cualquier intervención que cambie la cantidad de agua en el drenaje subglaciar o su presión. La cantidad de agua puede ser alterada mediante el vertimiento de aguas en el glaciar, la generación de alteraciones que cambien su derretimiento, o mediante la captura de agua del drenaje subglaciar. Dicha captura puede producirse, por ejemplo, mediante la construcción de un túnel o ducto que intersecte algún conducto del drenaje subglaciar o conectado al mismo. Si el glaciar es soportado por roca fracturada o sedimentos, pueden existir conductos subterráneos conectados al drenaje subglaciar incluso a distancias considerables del mismo. Otra forma de alterar la cantidad de agua en el drenaje subglaciar y su presión, es creando o eliminando conductos en la roca que comuniquen el drenaje subglaciar con acuíferos bajo o cercanos al glaciar. Estos conductos podrían ser fracturas en la roca creadas por cambios en el estrés de la roca producto de la construcción de un túnel, depositación de material o tronaduras.

Referencias

- R.B. Alley, D.D. Blankenship, C.R. Bentley, and S.T. Rooney. Deformation of till beneath ice stream b, west antarctica. *Nature*, 322:57–59, 1986.
- E.W. Blake, U.H. Fischer, and G.K.C. Clarke. Direct measurement of sliding at the glacier bed. *journal of Glaciology*, 40(136):559–599, 1994.
- G.S. Boulton and R.C.A. Hindmarsh. Sediment deformation beneath glaciers: rheology and geological consequences. *journal of Geophysical Research*, 92(B9):9059–9082, 1987.
- G.S. Boulton, R. Lunn, P. Vidstrand, and S. Zatsepin. Subglacial drainage by groundwater–channel coupling, and the origin of esker systems: Part ii – theory and simulation of a modern system. *Quat. Sci. Rev.*, 26 (7-8):1091–1105, 2007.
- H. Carol. The formation of roches moutonnees. *journal of Glaciology*, 1:57–59, 1947.
- A.C. Fowler. Sliding with cavity formation. *journal of Glaciology*, 33(115):131–141, 1987.
- O. Gagliardini, D. Cohen, P. Råback, and T. Zwinger. Finite-element modeling of subglacial cavities and related friction law. *J. Geophys. Res.*, 112(F2), 2007. doi:10.1029/2006JF000576.
- J.A.F. Gerrard, M.F. Perutz, and A. Roch. Measurement of the velocity distribution along a vertical line through a glacier. *Proc. R. Soc. London*, 213(1115):546–558, 1952.
- S. Gordon, M. Sharp, B. Hubbard, C. Smart, B. Ketterling, and I. Willis. Seasonal reorganization of subglacial drainage inferred from measurements in boreholes. *Hydro. Process.*, 12(1):105–133, 1998.
- Joel T. Harper, Neil F. Humphrey, and W. Tad Pfeffer. Three-dimensional deformation measured in an alaskan glacier. *Science*, 281(5381):1340–1342, 1998.
- J.T. Harper, N.F. Humphrey, W.T. Pfeffer, T. Fudge, and S. O’Neel. Evolution of subglacial water pressure along a glacier’s length. *Annals of Glaciology*, 40(1):31–36, 2005.
- Steven M. Hodge. Direct measurement of basal water pressures: Progress and problems. *journal of Glaciology*, 23(89):309–319, 1979. doi: 10.1017/S0022143000029920.
- Matthew Hoffman and Stephen Price. Feedbacks between coupled subglacial hydrology and glacier dynamics. *journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(3):414–436, 3 2014. ISSN 2169-9011. doi: 10.1002/2013JF002943.
- A. Iken and R.A. Bindschadler. Combined measurements of subglacial water pressure and surface velocity of findelengletscher, switzerland: conclusions about drainage system and sliding mechanism. *Journal of Glaciology*, 32(110):101–119, 1986.
- A. Iken, H. Röthlisberger, A. Flotron, and W. Haeberli. The uplift of unteraargletscher at the beginning of the melt season - a consequence of water storage at the bed? *journal of Glaciology*, 29(101):28–47, 1983.
- B. Kamb, C.F. Raymond, W.D. Harrison, H. Engelhardt, K.A. Echelmeyer, N. Humphrey, M.M. Brugman, and T. Pfeffer. Glacier surge mechanism: 1982-1983 surge of variegated glacier, alaska. *Science*, 227(4686):469–479, 1985.
- L. Liboutry. Contribution à la théorie du frottement du glacier sur son lit. *C. R. Hebd. Séances Acad. Sci.*, 247(3):318–320, 1958.

- L.A. Lliboutry. General theory of subglacial cavitation and sliding of temperate glaciers. *Journal of Glaciology*, 7(49):21–58, 1968.
- D. Mair, P. Nienow, I. Willis, and M. Sharp. Spatial patterns of glacier motion during a high-velocity event: Haut glacier d'arolla, Switzerland. *Journal of Glaciology*, 47(156):9–20, 2001.
- W.H. Mathews. Vertical distribution of velocity in salmon glacier, British Columbia. *Journal of Glaciology*, 3(26):448–454, 1959.
- G.D. McKenzie and D.N. Peterson. Correspondence. Subglacial cavitation phenomena: comments on the paper by R. Vivian and G. Bocquet. *Journal of Glaciology*, 14(71):339–340, 1975.
- F.S.L. Ng. Canals under sediment-based ice sheets. *Ann. Glaciol.*, 30:146–152, 2000.
- P. Nienow, M. Sharp, and I. Willis. Seasonal changes in the morphology of the subglacial drainage system, Haut glacier d'arolla, Switzerland. *Earth Surf. Process. Landforms*, 23(9):825–843, 1998.
- J.F. Nye. Water flow in glaciers: jökulhlaups, tunnels and veins. *Journal of Glaciology*, 17(76):181–207, 1976.
- D.N. Peterson. Glaciological investigations on the Casement glacier, Southeast Alaska. Technical report, Ohio State University, Institute of Polar Studies, 1970.
- H. Röthlisberger. Water pressure in intra- and subglacial channels. *Journal of Glaciology*, 11(62):177–203, 1972.
- J.C. Savage and W.S.B. Paterson. Borehole measurements in the Athabasca glacier. *Journal of Geophysical Research*, 68(15):4521–4536, 1963.
- C. Schoof. Ice sheet acceleration driven by melt supply variability. *Nature*, 468(7325):803–806, 2010.
- Christian Schoof. The effect of cavitation on glacier sliding. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 461(2055):609–627, 2005. ISSN 1364-5021. doi: 10.1098/rspa.2004.1350.
- R.L. Shreve. Short-term variations in glacier flow controlled by subglacial water pressure at Lauteraar-gletscher, Bernese Alps, Switzerland. *Union Géodésique et Géophysique Internationale. Association Internationale d'Hydrologie Scientifique. Assemblée générale de Helsinki, 25-7 - 6-8 1960, Commission des Neiges et Glaces*, pages 530–531, 1961.
- U. Spring and K. Hutter. Conduit flow of a fluid through its solid phase and its application to intraglacial channel flow. *Int. J. Eng. Sci.*, 20(2):327–363, 1982.
- N. van der Wel, P. Christoffersen, and M. Bougamont. The influence of subglacial hydrology on the flow of Kamb ice stream, West Antarctica. *J. Geophys. Res.*, 118:97–110, 2013.
- R. Vivian. The nature of the ice-rock interface: the results of investigation on 20 000 m² of the rock bed of temperate glaciers. *Journal of Glaciology*, 25:267–277, 1980.
- R. Vivian and G. Bocquet. Subglacial cavitation phenomena under the glacier d'Argentière, Mont Blanc, France. *Journal of Glaciology*, 12(66):439–451, 1973.
- J.S. Walder. Stability of sheet flow of water beneath temperate glaciers and implications for glacier surging. *Journal of Glaciology*, 28(99):273–293, 1982.

- J.S. Walder. Hydraulics of subglacial cavities. *journal of Glaciology*, 32(112):439–445, 1986.
- J.S. Walder and A. Fowler. Channelized subglacial drainage over a deformable bed. *journal of Glaciology*, 40(134):3–15, 1994.
- J. Weertman. On the sliding of glaciers. *journal of Glaciology*, 3(21):33–38, 1957.
- J. Weertman. The theory of glacier sliding. *Journal of Glaciology*, 5(39):287–303, 1964. doi: 10.3189/S0022143000029038.