

**REPÚBLICA DE CHILE  
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS  
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**

# **GENERACIÓN DE NUEVOS GLACIARES**

**VOLUMEN N°3  
INFORME FINAL**

**REALIZADO POR:  
GEOESTUDIOS LTDA.**

**S.I.T. N° 167  
Santiago, Diciembre 2008**

## **MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

Ministro de Obras Públicas, Transportes y Telecomunicaciones  
Ingeniero Civil Industrial Sr. Sergio Bitar C.

Director General de Aguas  
Abogado Sr. Rodrigo Weisner L.

Jefe Unidad de Glaciología y Nieves  
Geógrafo Sr. Gonzalo Barcaza S.

Profesional a Cargo  
Ingeniero Civil Sr. Fernando Escobar

### GEOESTUDIOS LTDA.

Jefe de Proyecto  
Geólogo Cedomir Marangunic D.

Profesionales  
Ingeniero Paula Marangunic V.  
Ingeniero M. Pilar González G.

**I. INDICE.**

	<b>Página</b>
I. INDICE.....	i
II. RESUMEN EJECUTIVO.....	1
III. INFORME.....	1-1
1. INTRODUCCION.....	1-1
1.1 OBJETIVO.....	1-1
1.2 CRITERIOS DE DISEÑO.....	1-2
1.3 ORGANIZACIÓN DEL PLAN DE TRABAJOS.....	1-5
2. GLACIARES Y AVALANCHAS, ASPECTOS GENERALES.....	2-1
2.1 GLACIARES.....	2-1
2.1.1 Definición de glaciar.....	2-1
2.1.2 Tipos y clasificación de glaciares.....	2-9
2.1.2.1 Aspectos generales.....	2-9
2.1.2.2 Clasificación primaria de glaciares.....	2-10
2.1.2.3 Clasificación según la temperatura de la masa de hielo.....	2-11
2.1.2.4 Clasificación según el contenido de impurezas.....	2-13
2.2 AVALANCHAS.....	2-21
2.2.1 Tipos de avalanchas y espesores mínimos de nieve para iniciarlas.....	2-21
2.2.2 Pendiente de la zona de inicio.....	2-25
2.2.3 Identificación de sendas de avalanchas.....	2-27
2.2.4 El flujo de las avalanchas.....	2-28
2.2.5 Distancia de corrida de las avalanchas.....	2-31
2.2.6 El manto de nieve.....	2-32
3. METODOLOGÍA DE ESTUDIOS BÁSICOS PARA LA GENERACIÓN DE UN NUEVO GLACIAR.....	3-1
3.1 TECNICAS DE ALIMENTACIÓN DE NIEVE Y ENCAUZAMIENTO DE AVALANCHAS.....	3-1
3.1.1 Mejorar la alimentación de un glaciar.....	3-1
3.1.1.1 La técnica.....	3-1
3.1.1.2 Las pruebas.....	3-5
3.1.2 Encauzamiento de avalanchas.....	3-6
3.1.2.1 La técnica.....	3-6
3.1.2.2 La prueba.....	3-11
3.2 GENERACIÓN DE UN NUEVO GLACIAR.....	3-11
3.2.1 El plan general de trabajo.....	3-11
3.2.2 Estudios y trabajos del primer año.....	3-13
3.2.2.1 Definir la cuenca, subcuenca y cajones cordilleranos.....	3-13
3.2.2.2 Recopilación de antecedentes, planos y fotos aéreas, y sobrevuelo del área.....	3-14
3.2.2.3 Estudio de avalanchas en cajones cordilleranos seleccionados e identificación de glaciares.....	3-15



---

3.2.2.3.1	Los estudios.....	3-15
3.2.2.3.2	Criterios de cálculo de avalanchas.....	3-16
3.2.2.4	Selección de dos alternativas de sitio para generar glaciares.....	3-19
3.2.3	Estudios y trabajos del segundo año.....	3-20
3.2.3.1	Instalación de estaciones meteorológicas, de rutas de nieve y postes de alturas de nieve.....	3-20
3.2.3.2	Planos geotécnicos.....	3-21
3.2.3.3	Control de las rutas de nieve y postes en laderas, y observaciones de avalanchas, durante la temporada de nieve invernal.....	3-22
3.2.3.4	Informe final de la actividad anual, con prediseño de obras de manejo de avalanchas.....	3-22
3.2.4	Estudios y trabajos del tercer año.....	3-23
3.2.5	Años subsiguientes.....	3-24



## **II. RESUMEN EJECUTIVO.**

Es opinión de Geoestudios que es posible generar un nuevo glaciar auto-sustentable en la región montañosa de la cordillera del centro del país mediante la producción de altas acumulaciones de nieve invernal, utilizando para ello técnicas probadas de encauzamiento de avalanchas y de acumulaciones artificiosas de nieve empleando vallas para nieve y otras estructuras similares. De hecho, esto que fuera analizado por especialistas años atrás en otros países pero nunca aplicado por falta de oportunidades, está siendo ya probado por una empresa minera chilena como mecanismo de mitigación de impactos ambientales causados por la intervención de glaciares.

Se presenta un plan de trabajo que, en resumen, comprende lo siguiente:

- a) Año 1, estudio de avalanchas en varios cajones cordilleranos elegidos, y selección de dos sitios de prueba de generación de glaciar.
- b) Año 2, en los sitios seleccionados, instalación de instrumentos para medir acumulaciones de nieve (estación nivo-meteorológica, rutas de nieve, postes de nieve en laderas) y control de estos durante la temporada invernal. Al término, proposición de obras preliminares para acumulaciones de nieve y encauzamiento de avalanchas. Construcción de camino de acceso.
- c) Año 3, construcción de obras preliminares, mantención de instrumentos y controles invernales. Estudio de biodiversidad en el valle. Estación limnigráfica.
- d) Año 4, revisión y mejoramiento y ampliación de obras, controles de nieve y del glaciar generado. En adelante, monitoreos del glaciar generado.

Los costos, muy aproximados, de un programa como el descrito, pueden estimarse en moneda de US\$ del día de hoy como sigue:

Año 1 = US\$ 200.000.-

Año 2 = US\$ 700.000.-

Año 3 = US\$ 1.200.000.-

Año 4 y subsiguientes, como programas de investigación en el glaciar generado, US\$ 400.000.



El costo del 4º año y años subsiguientes solo refleja el mantenimiento de un programa de investigación glaciológica, nivología y de biodiversidad entorno a un glaciar generado. En teoría podría reducirse a cero sin que por ello las condiciones de generación del glaciar se extingan, pues las obras de encauzamiento de avalanchas, construidas una vez con el adecuado diseño, son de larga vida útil y sus efectos como acumuladores de nieve perdura en el tiempo sin necesidad de mantenimiento.

De resultar exitoso, como se espera, podría estimarse que la generación de un nuevo glaciar, de dimensiones inicialmente reducidas, tendría un costo de aproximadamente US\$ dos millones en moneda de Diciembre de 2008. Esto se compara favorablemente con los beneficios de contar con un nuevo glaciar, como recurso de agua, regulador de caudales en su cuenca, además del aspecto paisajístico. Lo anterior sin considerar el significativo desarrollo tecnológico que la creación de un nuevo glaciar implica, además de ser una acción que podría repetirse en diversos lugares de la Cordillera de los Andes.

Fin Resumen Ejecutivo.

Por Geoestudios Ltda.

Cedomir Marangunic

10 de Diciembre de 2008.



### **III. INFORME.**

#### **1. INTRODUCCION.**

##### **1.1 OBJETIVO.**

La gran mayoría de los glaciares en Chile, y en el mundo, se encuentran en un proceso de retroceso con reducción de su tamaño y volumen, lo que se denomina como un “balance de masa negativo”. Esta disminución de masa se está produciendo, de manera intermitente, desde el ápice de la última glaciación, aproximadamente 21.000 a 18.000 años atrás, como respuesta a cambios climáticos globales que ocurren por causas naturales y que parecen acelerarse desde mediados del siglo XIX y, en particular, desde el término de la Segunda Guerra Mundial, probablemente por efectos antrópicos relacionados con la era industrial.

Los glaciares son importantes reservas de recursos hídricos, además de servir como reguladores de caudales entregando recursos hídricos en épocas secas o en años de sequía. Sin embargo, las reservas no son eternas; ellas disminuyen, hasta su eventual extinción, en la misma medida que los glaciares pierden masa y se extinguen. Junto con las reservas, también se pierde el efecto regulador. Durante todo el proceso de reducción de tamaño los glaciares entregan esta misma masa como recursos hídricos a la cuenca, por sobre aquellos que aporta la precipitación.

Por todo lo anterior, el poder generar nuevos glaciares en la alta montaña significa reponer reservas hídricas actualmente en disminución, y restituir la capacidad perdida de regulación de caudales. El objetivo del plan aquí propuesto es ese, el poder generar un nuevo glaciar desarrollando la tecnología para ello.

La generación de nuevos glaciares es algo que jamás se ha intentado en el mundo, pero no por ello imposible. De hecho, ha sido un tema discutido entre especialistas desde mediados del siglo XX, destacándose las favorables condiciones en las extensas montañas de la cordillera del centro de Chile para que un estudio de este tipo concluya exitosamente. Pero, y simplemente, no ha existido la motivación para dedicar recursos a esos fines. El tener que remover glaciares para extraer recursos naturales mineros importantes desde áreas cubiertas por glaciares ha sido la

motivación para que empresas mineras se interesen en el team e incluso, una de ellas, inicie los estudios para lograrlo.

Desde ya, y en relación con proyectos mineros, se ha desarrollado en Chile toda una tecnología, en varios aspectos única en el mundo, para el control y manejo de glaciares, conservando el mayor plazo de tiempo las masas de hielo excavadas e intentando preservar tanto como es posible los glaciares que subsisten.

En Geoestudios creemos que más de 20 años de trabajo en glaciología aplicada (control de glaciares, monitoreos, sondajes, análisis de estabilidad, remociones y excavaciones, desarrollo de software, etc.), además de otros 15 años de experiencia en control artificial de fusión de nieve, balances combinados de hielo, calórico y agua, avalanchas, variaciones glaciares, geotecnia de mina, y otros de nuestros profesionales permiten un alto grado de confiabilidad en el éxito del emprendimiento.

## **1.2 CRITERIOS DE DISEÑO.**

El generar un glaciar, y el que este sea auto-sustentable en el tiempo implica, en lo fundamental, generar condiciones para que en un sitio se produzcan acumulaciones de nieve o hielo de tal magnitud que a lo menos parte de estas acumulaciones logren subsistir a las adversas condiciones climáticas de la temporada de verano.

A su vez, el lograr la auto-sustentabilidad significa que originar las condiciones para generar un glaciar debe ser un proceso a realizar una vez y, a su conclusión, el glaciar debe formarse y autosustentarse sin necesidad de nuevas intervenciones, excepto para ocasionales revisiones o reparaciones del sistema.

Acumulaciones naturales de nieve o hielo se producen por:

- a) Precipitación sólida, directa sobre el terreno.
- b) Redistribución por el viento (con transporte y redepositación) de parte de la nieve precipitada.



- c) Depósitos de nieve de avalanchas.
- d) Congelamiento de la superficie de lagos o mares.
- e) Hielo ancla, adherido a las rocas en el lecho de un río, por sobre-enfriamiento

Acumulaciones antrópicas de nieve o hielo se producen por:

- f) Empleo de máquinas para fabricar nieve, por ejemplo como las utilizadas en canchas de ski.
- g) Sistemas para aumentar la precipitación sólida, como sembrando núcleos de condensación en las nubes.
- h) Congelamiento de agua, como en las canchas de patinaje.
- i) Empleo de estructuras, como las vallas de nieve, para producir acumulaciones temporales en sitios específicos (empleadas en control de avalanchas).
- j) Empleo de estructuras para estabilizar el manto de nieve en laderas, tales como cercas, redes, bancos y otras, ampliamente utilizadas en los sistemas de protección de avalanchas.
- k) Construcción de muros y zanjas para encauzar avalanchas y proteger estructuras.
- l) Montículos, pilotes, trípodes y otros, para frenar avalanchas y producir depósitos fuera de zonas que se desean proteger.
- m) Sistemas que inducen avalanchas de nieve, tales como los cañones de propulsión a gas de una, carga explosiva, los sistemas Gases, o Catex, o Torre de Avalanchas para producir explosiones sobre el manto de nieve que lo desestabilizan y generan avalanchas que se depositan en algún lugar de la senda de avalanchas según las características del manto de nieve que se desliza.

Evidentemente, si no existe un glaciar en un sitio, es porque las acumulaciones naturales de nieve o hielo son de magnitud insuficiente para que persistan de un invierno a otro. Por otra parte, el congelamiento natural de una superficie lacustre o marina no genera glaciares, solo una cubierta temporal de hielo.

El empleo de máquinas para fabricar nieve o hielo no es una forma auto-sustentable de generar un glaciar, pues la tarea debe repetirse todos los años para alimentar el glaciar de nieve o hielo,

con un significativo empleo de energía en cada oportunidad, además de la necesidad de disponer de agua a ser tratada. Tampoco son formas permanentes de alimentación de nieve de un glaciar aquellas que estabilizan el manto de nieve en laderas, o que frenan avalanchas, puesto que una vez cubiertas de nieve (o por el hielo de un glaciar así generado) dejan de prestar la utilidad para la que fueron construidas.

Las vallas para nieve producen pequeñas acumulaciones de nieve delante de ellas (con respecto a la dirección del viento), e importantes acumulaciones detrás, las que pueden alcanzar un espesor equivalente a la altura de la valla. Así, con una valla de, por ejemplo, 10 m de altura podría originarse una acumulación de nieve detrás de la valla de también de 10 m de profundidad. Para originar un glaciar se requieren vallas de dos o más decenas de metros de altura, algo no imposible pero costoso en su construcción y mantención.

Encauzar avalanchas con sistemas de zanja-muro, para forzar el frenado y depositación de estas en sitios pre-establecidos, es una forma de protección de avalanchas de común empleo, que tan solo requiere un detallado conocimiento de las características del manto de nieve, del flujo de las avalanchas, y de los detalles técnicos respecto a las características y requisitos que el sistema a construir debe poseer. Podrían lograrse acumulaciones significativas de nieve si es posible dirigir varias sendas de avalanchas hacia un punto común de depositación. Estos sistemas se construyen en la senda de avalanchas básicamente como muros de tierra que desvían el flujo de las avalanchas, y no requieren mantenimiento sistemático

La inducción de avalanchas, utilizado en conjunto con sistemas de zanja-muro, podría incrementar la acumulación natural de nieve en una senda de avalancha

Así, parece que las herramientas a utilizar en la generación de un glaciar son esencialmente de dos tipos, zanja-muros para desviar y encauzar avalanchas hacia un sitio de depósito común, y vallas de altura moderada para ayudar en la alimentación con nieve del glaciar generado. Eventualmente, y sobre todo inicialmente, se puede emplear un método de inducción de avalanchas para acelerar la acumulación anual de nieve.



### **1.3 ORGANIZACIÓN DEL PLAN DE TRABAJOS.**

Debido a lo especializado del tema de glaciares, se incluye en el presente plan de trabajo, como Capítulo 2, una descripción general de los glaciares, de manera de explicitar la terminología que se emplea más adelante.

La metodología y plan de los trabajos se describe en el Capítulo 3.



## **2. GLACIARES Y AVALANCHAS, ASPECTOS GENERALES.**

### **2.1 GLACIARES.**

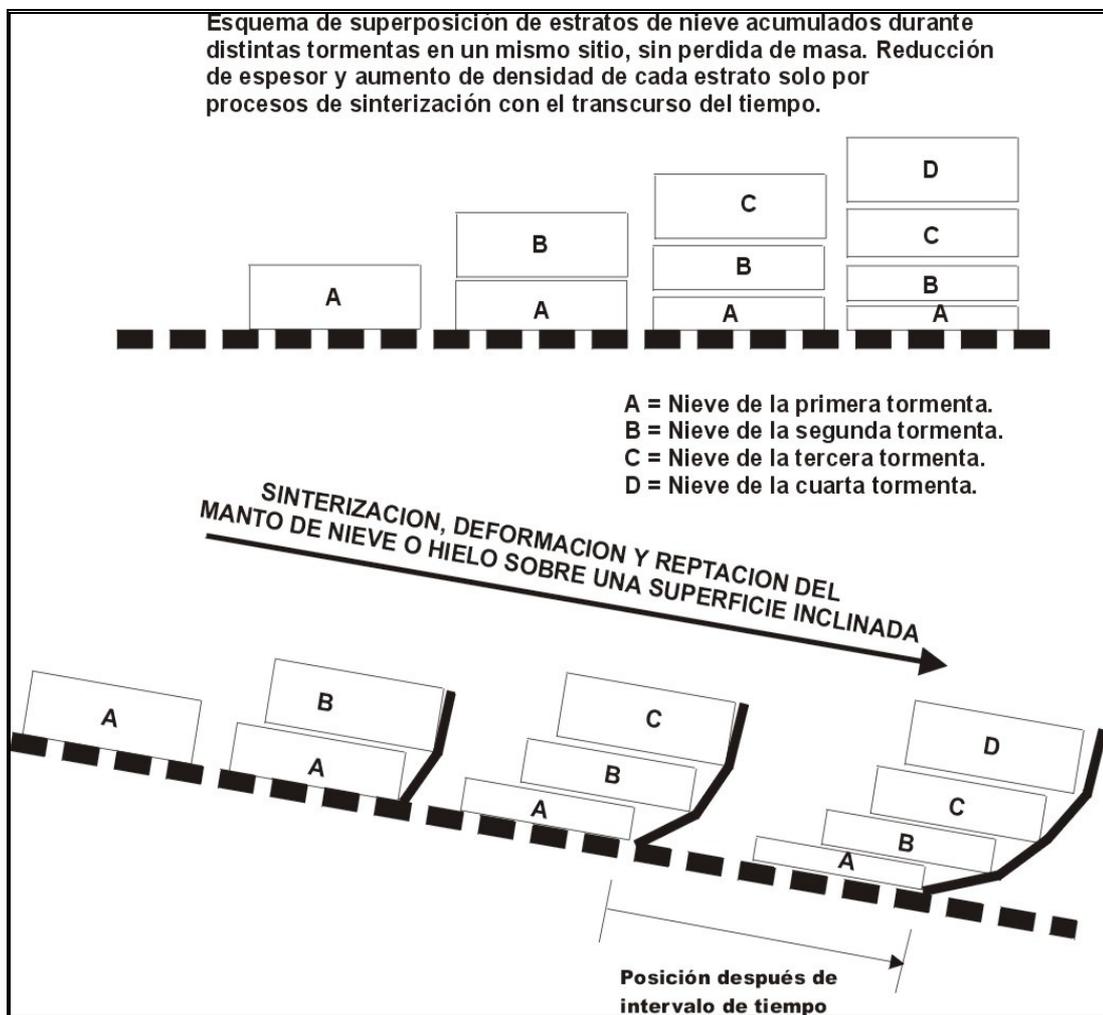
#### **2.1.1 Definición de glaciar.**

Los glaciares son grandes masas de hielo, con o sin agua intersticial, de límites bien establecidos, originados sobre la tierra por metamorfismo a hielo de acumulaciones de nieve (un proceso denominado sinterización de la nieve), y que fluyen lentamente. Los glaciares fluyen porque el hielo que contienen se deforma por su propio peso bajo el influjo de la gravedad, según la ley de flujo del hielo, y porque en superficies inclinadas el hielo se desliza lentamente sobre el lecho basal (ver Fig. 2.1.1-A) si el hielo está a 0°C (glaciares “temperados”, el caso de la gran mayoría de glaciares en la Cordillera de los Andes). Si el hielo en la base del glaciar se encuentra a temperaturas negativas (glaciares “fríos”), no se desliza sino que se adhiere al material subglacial y el glaciar fluye solamente por deformación de la masa de hielo.

En las masas de hielo de los glaciares existe una variada cantidad de impurezas, compuestas principalmente de material detrítico. El material detrítico contenido en las masas de hielo glaciar es principalmente de origen rocoso, en tamaño desde grandes bloques a finas partículas de arcillas, que caen desde las laderas sobre el glaciar, o son llevadas por el viento, y se incorporan a las masas de nieve y hielo, y también fragmentos erosionados en la base del glaciar e incorporados al hielo de su base. Una parte muy menor y de difícil detección macroscópica del detrito en los glaciares puede ser orgánico (fragmentos o especímenes enteros) y proviene principalmente del arrastre eólico hasta la superficie del glaciar, donde este detrito se incorpora a la masa de hielo. Acumulaciones de nieve con altos inusualmente altos contenidos (1% o más en volumen) de detritos rocosos son los depósitos originados por avalanchas

Glaciares con cantidades virtualmente imperceptibles de impurezas y que, por lo tanto, se aprecian esencialmente blancos, se denominan aquí “glaciares blancos” (ver Fig. 2.1.1-B) y a ellos se asocia generalmente un valor paisajístico además de aquel como recurso hídrico y regulador de caudales. Glaciares que contienen un porcentaje de detrito tal que este cubre toda la

superficie de su Zona de Ablación (el área del glaciar a menor cota) y parte importante de su Zona de Acumulación (el área del glaciar a mayor cota) se denominan “glaciares de roca” (ver Fig. 2.1.1-B). En estos últimos, el contenido de detritos puede alcanzar más del 20% del volumen total del glaciar. Entre los glaciares blancos y los glaciares de roca existe una amplia gama de glaciares con cubiertas detríticas que se extienden en solo parte de sus zonas de ablación, y a los cuales llamaremos glaciares grises. Existen también glaciares que tras años (o secuencias de años) de altas precipitaciones tienen la apariencia de glaciares grises, pero tras algunos años secos se presentan como glaciares de roca; a estos los denominamos glaciares en transición.



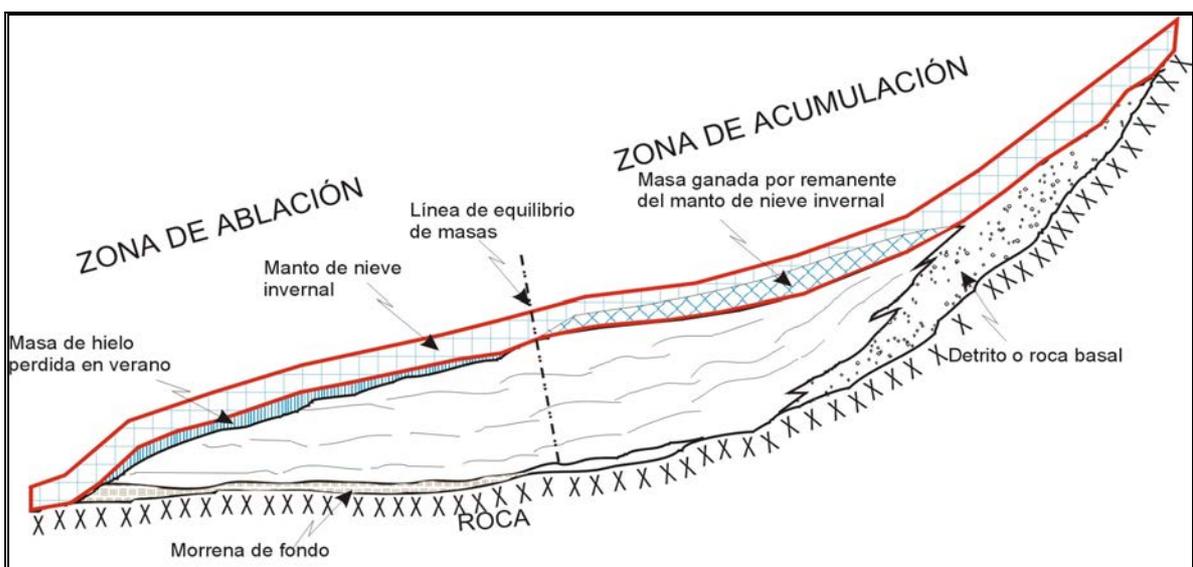
**Fig. 2.1.1-A. Esquema de sinterización del manto de nieve y de deformación y reptación del manto de nieve o de un glaciar.**



**Fig. 2.1.1-B. A la izquierda glaciar blanco con escasa cubierta de detritos en su Zona de Ablación (bandas de detritos oscuros en las morrenas centrales y marginales), y glaciar de roca a la derecha con cordones (bandas de compresión) arqueados hacia el frente (hacia la izquierda abajo) en la dirección del flujo del glaciar.**

La cubierta de detritos en un glaciar de roca resulta de la paulatina fusión de la nieve y el hielo, proceso mediante el cual el material detrítico que contienen queda expuesto en superficie. Así, una inicialmente tenue capa de detritos, de escasos centímetros de espesor, cubre la superficie del glaciar en sus mayores cotas, y ella se va haciendo más potente y de mayor espesor con el transcurso de los años. Con el paso del tiempo y el movimiento pendiente abajo de la masa de hielo, cerca del frente del glaciar de roca se encuentra el mayor espesor de la cubierta de detritos, la cual puede alcanzar varios metros.

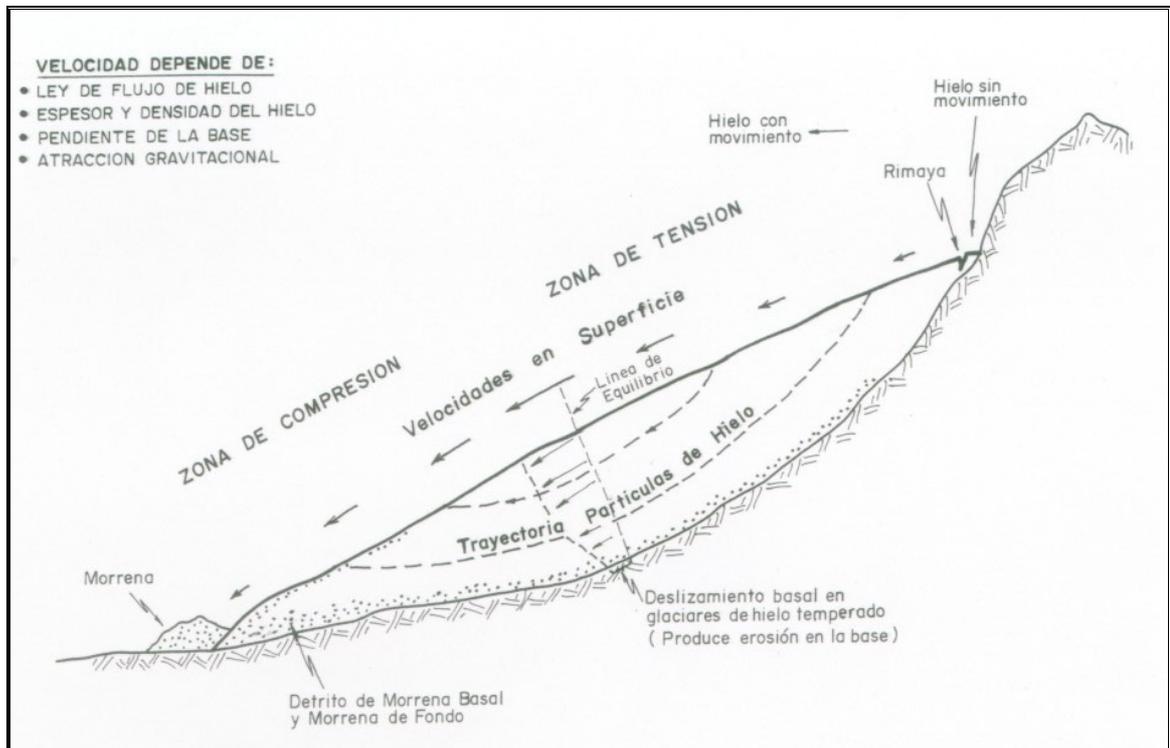
Los glaciares poseen una Zona de Alimentación y una Zona de Ablación, separadas por una imaginaria Línea de Equilibrio de masas (ver Fig. 2.1.1-C). En la Zona de Alimentación el glaciar gana masa en un balance anual, mayoritariamente la nieve proveniente de la precipitación nival y de avalanchas más el detrito que estas últimas suelen incorporar, y que logra subsistir al término de la temporada veraniega. En la Zona de Ablación el glaciar pierde masa, por los diversos fenómenos de ablación (fusión, sublimación, erosión eólica, etc.). El frente del glaciar es estable cuando el balance anual de masas es igual a cero, vale decir cuando gana tanta masa de nieve en la Zona de Acumulación, como la masa perdida de hielo en la Zona de Ablación; en caso contrario el frente avanza (balance positivo, ganancia neta anual de masa) o retrocede (balance negativo, pérdida neta anual de masa) y se modifica el perfil de la superficie del glaciar.



**Fig. 2.1.1-C. Perfil vertical esquemático por el eje de un glaciar, mostrando la disposición de las zonas de acumulación y de ablación.**

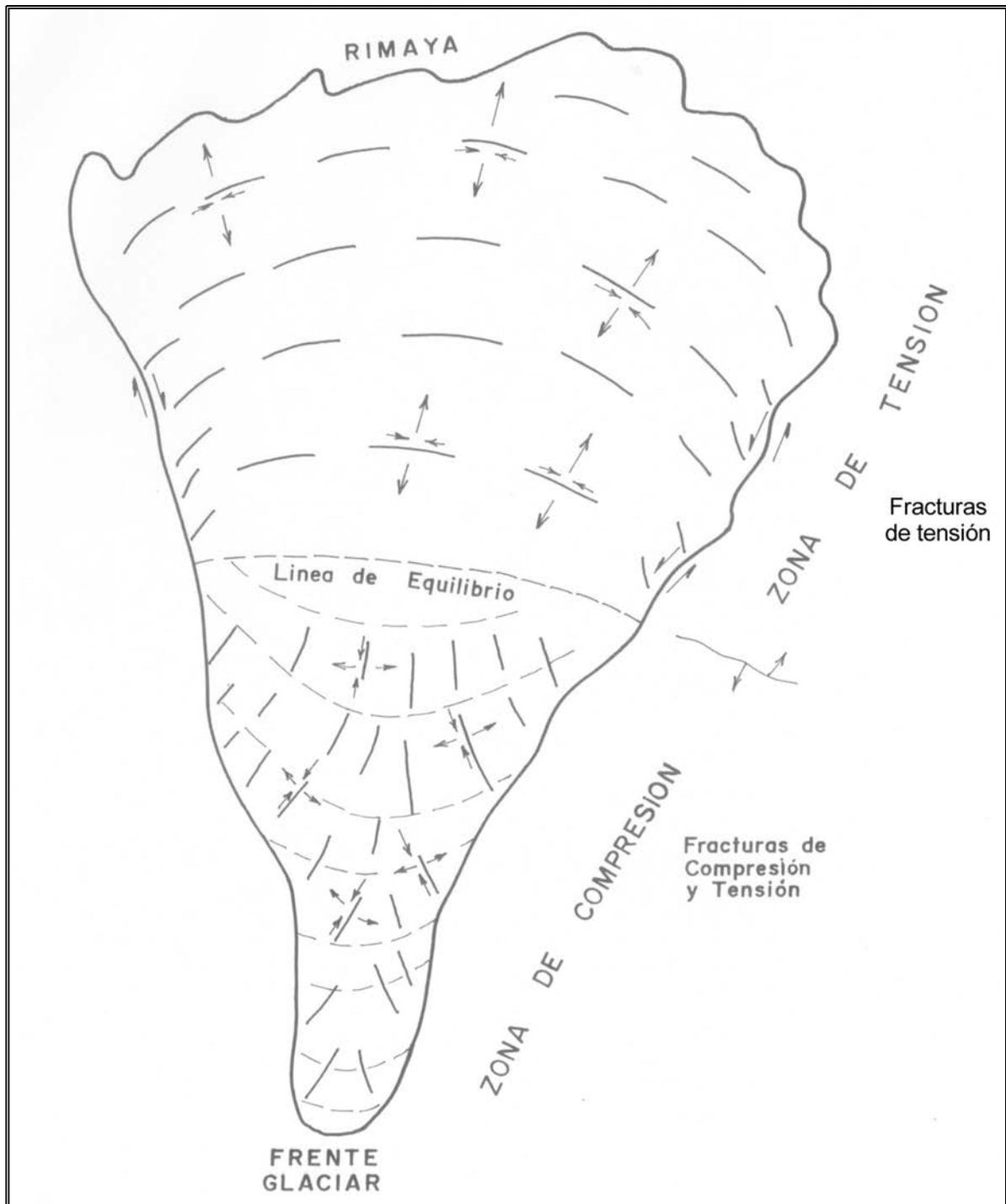
En la Línea de Equilibrio, por las mismas condiciones de intercambio de masas entre las zonas de acumulación y ablación, los espesores de hielo son mayores y por ello las velocidades de desplazamiento del glaciar son también las mayores (ver Fig. 2.1.1-D). Por lo mismo, la Zona de Acumulación es una en la cual las masas de hielo se encuentran en tensión y formación de grietas transversales (ver Fig. 2.1.1-E), mientras que la Zona de Ablación es un campo en compresión, con formación de grietas longitudinales y cordones de compresión; esta disposición general del

campo de esfuerzos puede alterarse por grandes ondulaciones en la base del glaciar. La disposición general de las grietas en la superficie de un glaciar se muestra también en la Fig. 2.1.1-F.

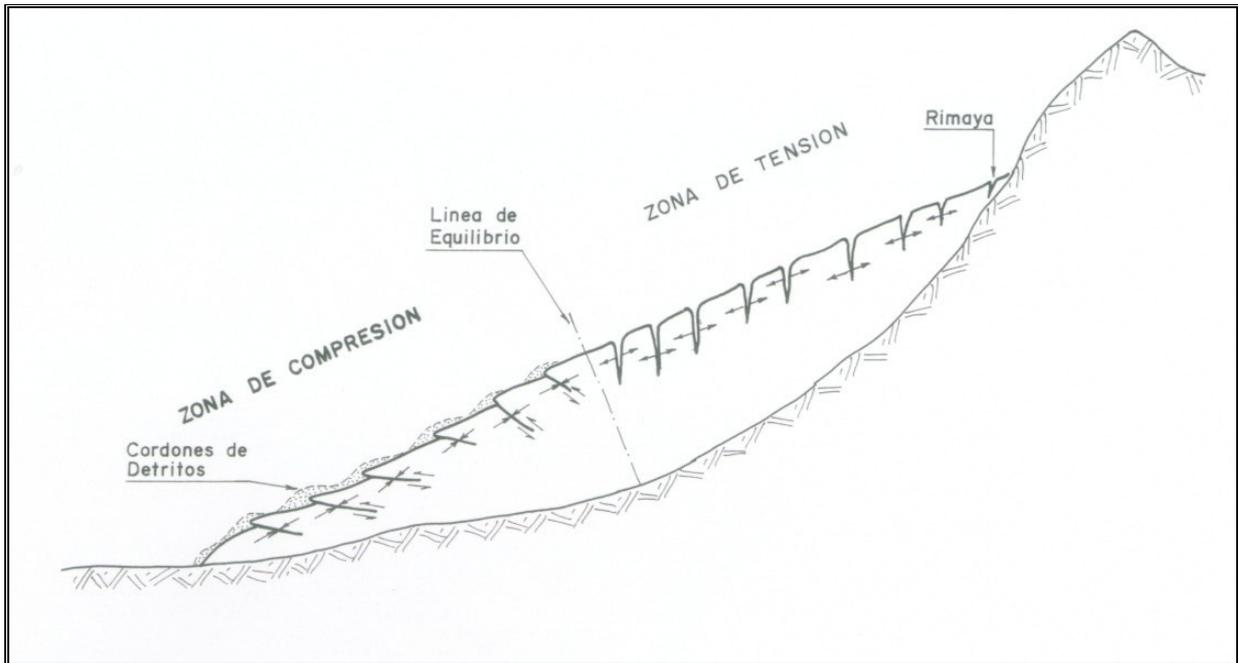


**Fig. 2.1.1-D. Esquema de movimiento de un glaciar, en un perfil vertical por el eje longitudinal del glaciar.**

Las velocidades en superficie de desplazamiento de los glaciares dependen del espesor del hielo y de la deformación de este según la ley de flujo del hielo, de la carga que representa el detrito incorporado con sus respectivas densidades, de la pendiente de la base y de la velocidad basal. La pendiente en la superficie de los glaciares es función del intercambio de masas entre las zonas de acumulación y de ablación y de las velocidades por ello originadas, y de la pendiente en la base del glaciar. La velocidad basal depende del esfuerzo de corte en la base del glaciar, el que, a su vez, depende del espesor del glaciar y su densidad media, la pendiente de la superficie del glaciar y el efecto de "pistón hidráulico" por la presión de agua en la base (el que a su vez tiene que ver con las inclinaciones de las rugosidades basales). La velocidad basal también depende de la rugosidad del terreno sobre el cual el glaciar desliza.



**Fig. 2.1.1-E. Esquema en planta del campo teórico de esfuerzos en un glaciar y de la disposición de los sistemas de fracturas en la masa de hielo.**



**Fig. 2.1.1-F. Esquema de disposición teórico de fracturas en un perfil vertical por el eje longitudinal de un glaciar**

La ablación en la superficie de un glaciar depende del intercambio calórico, cuyos componentes principales son:

- ❖ radiación incidente, en onda larga y corta,
- ❖ radiación en onda larga emitida desde la superficie del glaciar,
- ❖ temperatura del aire y su gradiente vertical,
- ❖ humedad relativa y su gradiente vertical,
- ❖ velocidad del viento y su gradiente vertical,
- ❖ presión barométrica,
- ❖ albedo de la nieve o el detrito rocoso,
- ❖ temperatura de la superficie de nieve o detrito,
- ❖ conductividad térmica del detrito rocoso que puede cubrir la superficie, o nieve/hielo,
- ❖ gradiente de temperatura en la eventual cubierta detrítica superficial (o nieve/hielo).



En un año promedio, la ablación en la superficie del glaciar destruye toda la nieve acumulada durante el invierno en la Zona de Ablación, e incluso parte del hielo preexistente. En la Zona de Alimentación la ablación superficial no alcanza a destruir toda la nieve acumulada durante el invierno, de manera que se produce un excedente de masa el cual compensa (en un glaciar en equilibrio) aquella preexistente (el hielo) perdida en la Zona de Ablación. Para mantener la forma de la superficie de un glaciar en equilibrio de masas, el flujo del glaciar produce un intercambio anual de masa entre las zonas de acumulación y de ablación, de manera tal que el volumen de hielo que pasa anualmente por la sección de la Línea de Equilibrio es la ganancia de masa de la Zona de Alimentación, la que compensa la masa perdida en la Zona de Ablación.

En toda la base de un glaciar existe pérdida de masa debido a:

- ❖ fusión del hielo por efecto del calor geotérmico y
- ❖ fusión de hielo atribuida al calor de fricción que causa el desplazamiento del glaciar (espesor de hielo y sus densidades, velocidad basal, esfuerzo de corte) sobre su lecho.

En la base del glaciar existe una banda de hielo con abundante material detrítico (hasta aproximadamente un 50% en volumen), el que es capturado por el glaciar desde su lecho (rocoso o detrítico) e incorporado a la masa de hielo del glaciar. Esta banda se denomina morrena basal y su límite inferior es el límite inferior del glaciar. En glaciares relativamente pequeños, la morrena basal suele tener espesores que van desde pocas decenas de centímetros hasta pocos metros. La característica geotécnica del material de hielo y detrítico rocoso de la morrena basal es de cohesión aproximadamente  $100 \text{ kg/cm}^2$ , y ángulo de fricción interna aproximadamente  $38^\circ$ .

La morrena basal debe distinguirse de la morrena de fondo (también denominada till) dispuesta bajo la morrena basal, y otros tipos de morrenas (marginales, laterales, etc.), que son masas constituidas exclusivamente por material detrítico, sin hielo, y que no forman parte del glaciar. La morrena de fondo es un suelo con abundantes finos, transportado y depositado por el glaciar en su base, saturado, y que bajo glaciares activos es un material virtualmente sin cohesión y de muy bajo ángulo de fricción interna; esta morrena de fondo suele ser prominente aguas abajo de la Línea de Equilibrio y poco significativa, o inexistente, aguas arriba de ella.

La morrena de fondo no es parte del glaciar y no contiene hielo. Es un material detrítico con abundantes finos (entre 15% y más de 20% normalmente), depositado y permanentemente trabajado por la base del glaciar. Cargada por el hielo en continua reptación y siempre saturado de agua, la morrena de fondo se comporta como un material de muy baja cohesión ( $0,1 \text{ kg/cm}^2$ ), relativamente bajo ángulo de fricción interna ( $11^\circ$ ) y activo en cuanto a que se encuentra en permanente deformación.

## **2.1.2 Tipos y clasificación de glaciares.**

### **2.1.2.1 Aspectos generales.**

La clasificación de glaciares más aceptada es aquella de UNESCO, complementada con los agregados que a esta clasificación de UNESCO se realizaron con motivo de la ejecución del inventario de glaciares en Canadá y luego por la iniciativa GLIMS. En los aspectos más relevantes, la clasificación UNESCO de glaciares lo hace según los siguientes criterios:

1. Clasificación primaria, según el tipo y aspecto general del glaciar.
2. Clasificación según la forma del glaciar.
3. Clasificación según las características del frente del glaciar.
4. Clasificación según el perfil longitudinal del glaciar.

Una clasificación relativa a las propiedades físicas de los glaciares, se refiere a la temperatura en el núcleo de hielo y base del glaciar (por debajo de las variaciones estacionales de temperatura que ocurren en el hielo más superficial de un glaciar). Esta clasificación es utilizada en todos los estudios glaciológicos.

Otra clasificación se refiere a como se unen (o coalescen) dos o más lenguas glaciares.

El término “glaciar”, a secas, incluye una amplia gama de tipos y formas glaciares y, comúnmente, suele ser utilizado indiscriminadamente para referirse a glaciares tan diferentes



como las enormes masas de hielo de los glaciares en la Antártica y los pequeños glaciares de montaña, o bien tanto para los glaciares blancos como para los glaciares de roca. Esto produce visualizaciones erradas en zonas donde coexisten glaciares de aspectos tan diferentes como los glaciares de superficie blanca y los glaciares de roca, como ocurre en la cordillera del centro de Chile. Los trabajos de este consultor en regiones donde coexisten glaciares de roca y otros glaciares de montaña, ha evidenciado la necesidad de introducir una nueva clasificación de glaciares, no existente en la literatura científica al respecto, y basada en el contenido de impurezas presentes en las masas de hielo. Esta clasificación que, esencialmente diferencia entre glaciares “blancos” y glaciares de roca, fue discutida y acordada con el consultor y glaciólogo Dr. Colin Bull durante su estadía en Chile en Noviembre de 2005; sin embargo. Su empleo en el presente estudio es de exclusiva responsabilidad de los autores.

#### **2.1.2.2 Clasificación primaria de glaciares.**

Según la clasificación primaria de los glaciares estos se describen y señalan con dígitos, como:

0. Incierto o misceláneo.
1. Sabana de hielo continental. Ejemplos: Antártica y Groenlandia.
2. Campo de hielo. Ejemplo: campos de hielo Patagónico Norte y Patagónico Sur.
3. Casquete de hielo. Ejemplo: casquete en Península Muñoz Gamero, XII Región.
4. Glaciar de desagüe. Ejemplo: glaciar Pio XI que surge del Campo de Hielo Patagónico Sur.
5. Glaciar de valle. Ejemplo: glaciar Juncal Sur, en la cabecera del cajón del Río Olivares, Región Metropolitana.
6. Glaciar de montaña. Ejemplos: los glaciares Barroso, en la cuenca alta del Río Blanco, V Región.
7. Glaciarete. Ejemplo: los pequeños glaciares en el proyecto minero Pascua-Lama, III Región.
8. Plataforma de hielo. Ejemplo: en partes de la periferia del continente Antártico.
9. Glaciar de roca. Ejemplo: aquellos en la cuenca alta del Río Blanco, afluente del río Aconcagua.

En las **sabanas de hielo** los glaciares tienen mayor altura que las cumbres rocosas de la región y las cubren virtualmente totalmente, como en sectores de la Antártica y Groenlandia; en estos casos los glaciares fluyen en todas direcciones desde un centro de elevada cota. En los **campos de hielo** los glaciares inundan una región montañosa, pero no la cubren, y fluyen por los valles y pasos en diversas direcciones. La **plataforma de hielo** consiste de hielo originado sobre una masa terrestre (continental), que se extiende sobre el mar, y flota. El glaciar tipo **casquete** cubre totalmente una alta cumbre o zona, y desde esta fluye en diversas direcciones. En el resto de los casos, los glaciares se encuentran en una región montañosa, donde dominan las cumbres rocosas, y fluyen en una dirección determinada por la topografía.

### **2.1.2.3 Clasificación según la temperatura de la masa de hielo.**

Le temperatura que importa para la clasificación del glaciar según su temperatura, es aquella que se encuentra en el núcleo del glaciar por debajo del nivel de variación estacional de la temperatura, vale decir, por debajo del nivel de penetración de la onda de frío invernal. El punto de fusión del hielo varía solo muy levemente con la presión, de manera que en los glaciares se encuentran temperaturas de esencialmente 0°C (glaciares temperados), o bien temperaturas inferiores a 0°C (desde pocos grados a decenas de grados bajo cero) y que conforman los glaciares fríos.

En regiones donde las temperaturas medias mensuales veraniegas alcanzan por sobre 0°C, el hielo del núcleo de los glaciares se encuentra a 0° C y a estos glaciares se los denomina temperados; este es el caso de la mayoría de los glaciares de montaña en la cordillera de Chile, excepto en zonas de cotas muy altas y de temperaturas permanentemente bajo 0° C. En regiones donde la temperatura media mensual de verano es de varios grados bajo 0° C, el hielo glaciar se encuentra también bajo 0° C y los glaciares se denominan fríos. La temperatura del hielo no es la media del aire, pues depende de los procesos de recongelamiento del agua de fusión en el glaciar. En la cordillera de Santiago se ha medido 0°C en el núcleo de glaciares a aprox. 4.700 m.s.n.m., y se ha observado la presencia de agua en grietas a cotas cercanas a 5.000 m.s.n.m.



Los glaciares fríos no aportan agua por fusión del hielo en la base del glaciar (no se produce fusión en la base) y solo muy escasa agua por fusión en superficie en sus márgenes (porque principalmente subliman). Algunos glaciares tenues, ubicados en cotas altas, pueden ser completamente fríos solo en invierno y temperados en verano, siendo este un caso de glaciar politérmico.

Los glaciares fríos se constituyen porque el escaso calor de verano no logra disipar la onda de frío invernal que se mete en profundidad en la masa de hielo, aunque puede lograra temperizar a 0° C un espesor poco profundo (centímetros o metros) de la parte más superficial de la masa de hielo que normalmente es fría. En los glaciares temperados simplemente no existe suficiente frío para bajar la temperatura de toda la masa de hielo por debajo de 0° C, pero tampoco existe suficiente calor para fundir todo el hielo. Los glaciares fríos no producen agua, o producen muy poco (la fusión superficial es escasa y solo en algunos días en verano). Los glaciares fríos están adheridos (“pegados”) a la base rocosa y su deslizamiento es virtualmente nulo (se desplazan solo por deformación del hielo), mientras que el movimiento de los glaciares temperados es debido a la deformación del hielo y también a un deslizamiento sobre su lecho.

En los glaciares temperados, con el núcleo de hielo a 0°C, no hay frío suficiente (ni en verano ni en invierno) como para congelar el agua de fusión del hielo; en el verano se observa, comúnmente, agua en grietas del glaciar y en lagunas en el glaciar, el agua de fusión en superficie se infiltra hasta la base y escurre, dando origen a esteros o ríos que emergen del frente del glaciar. Los glaciares temperados deslizan en la base; más rápido en verano por mayor presencia de agua. Por todo esto los glaciares temperados actúan como reguladores de los caudales en la cuenca, aportando recursos en años o estaciones secas; los glaciares temperados entregan agua todo el año (por la fusión en la base en invierno), y mucho más en verano que en invierno.



#### **2.1.2.4 Clasificación según el contenido de impurezas.**

Según el contenido de impurezas del hielo, los glaciares se dividen en glaciares aquí llamados “blancos” y glaciares de roca (ver Fig. 2.1.1-B), y transiciones entre estos extremos, lo que se describe con mayor detalle en el párrafo a continuación.

Todas las masas de hielo de los glaciares contienen impurezas, principalmente partículas o fragmentos detríticos, desprendidos desde las laderas rocosas sobre el glaciar, por simple meteorización, arrastradas por avalanchas de nieve, llevadas por el viento, o erosionadas en las márgenes del glaciar y atrapadas por el hielo, y aquellas de los núcleos de condensación de los cristales de nieve originales. Adicionalmente, en las zonas de ablación se encuentran partículas arrastradas a la superficie a lo largo de planos de cizalle de las masas de hielo en compresión. Las partículas y fragmentos que se depositan en la Zona de Acumulación se mezclan con la masa de nieve invernal, son cubiertas por nuevos mantos de nieve, y pasan a constituir parte de la masa del glaciar como partículas atrapadas en el hielo. En la medida que el glaciar avanza, lleva los estratos de hielo con sus partículas constituyentes a cotas inferiores, donde el hielo se funde en la Zona de Ablación y las partículas que envuelve son “abandonadas” en la superficie del glaciar. Si las partículas y fragmentos son muchos, comienzan a formar un manto detrítico que es cada vez más potente en la medida que mayor cantidad de hielo con impurezas se funde.

Cuando las impurezas son escasas, solo algunas pocas afloran en la superficie del manto de nieve invernal que subsiste en la Zona de Alimentación del glaciar al fin del verano, de manera que la superficie de nieve en esta zona mantiene su color blanco prístino o levemente grisáceo. Las impurezas comienzan a aflorar y permanecen en la superficie del glaciar en la Zona de Ablación, pero cuando son muy escasas no modifican significativamente el aspecto blanco del hielo en la superficie del glaciar, excepto en las morrenas marginales (laterales y frontales) y mediales cuando estas existen.

Cuando las impurezas son más abundantes en el hielo del glaciar, el aspecto de la neviza (nieve vieja) en la Zona de Alimentación al final del verano puede ser menos prístino (de color grisáceo) por la presencia de numerosas partículas detríticas que han sido dejadas en superficie por la fusión de parte del manto de nieve que las contenía. En la Zona de Ablación de estos glaciares el



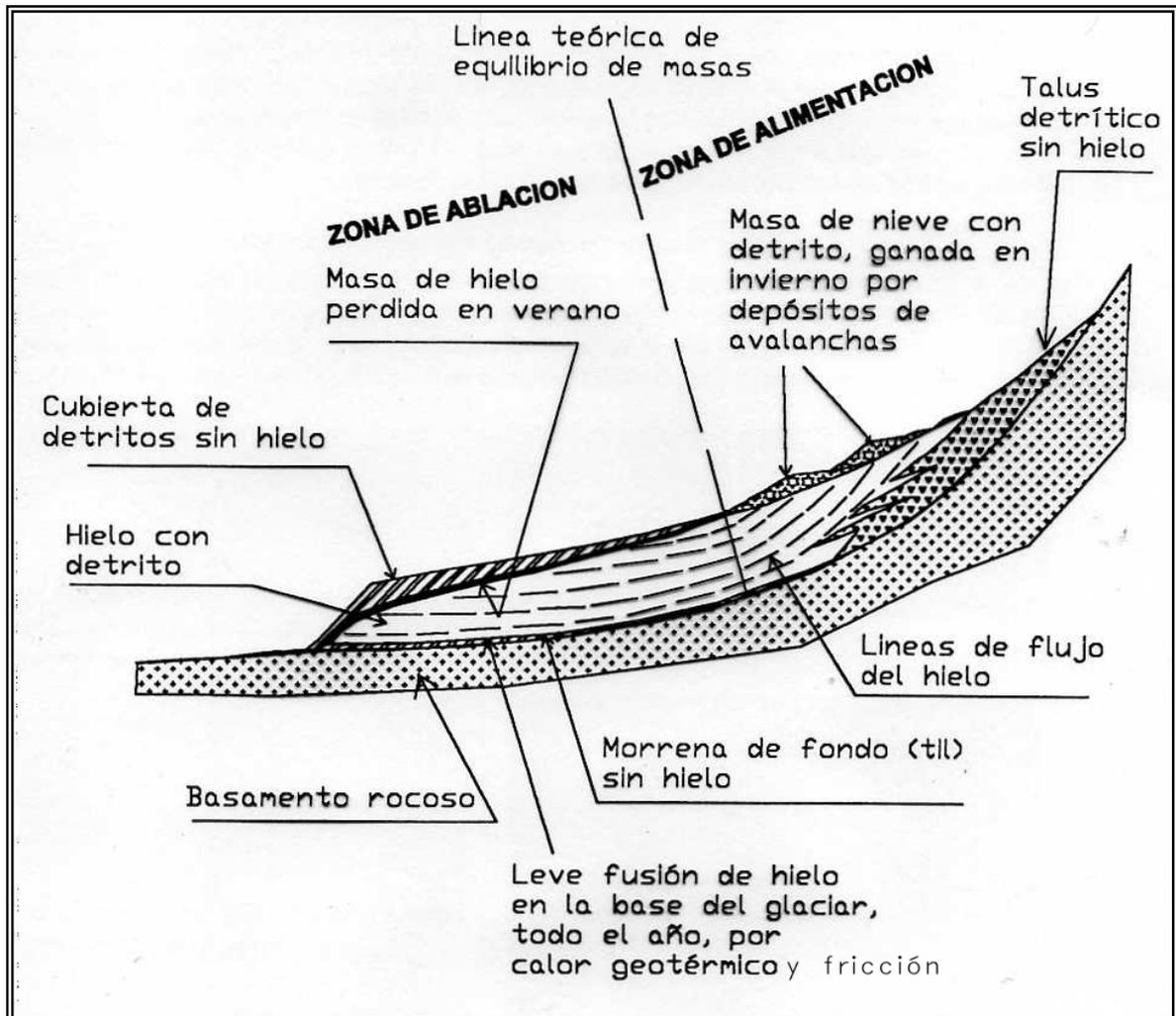
aspecto de la superficie es definitivamente de color grisáceo y puede llegar a gris oscuro (incluso conformar una tenue cubierta detrítica) en el frente del glaciar donde la fusión del hielo acumula partículas depositadas durante muchos años en las capas de hielo. El tenue material detrítico expuesto en superficie absorbe radiación solar y calor y ayuda a la fusión de la nieve o el hielo infrayacente.

Cuando las impurezas en los depósitos de nieve en la Zona de Acumulación son altas (del orden de 2 % o más del volumen de nieve acumulada durante el invierno), la fusión de parte del manto de nieve invernal durante el verano deja expuesta una cantidad tal de material detrítico que este forma una cubierta aislante que protege efectivamente de la destrucción a la nieve subyacente remanente (ver Fig. 2.1.2.4-A y B). La cubierta detrítica es muy porosa y permeable, constituida principalmente por fragmentos gruesos (del tamaño gravas y gravillas) y angulosos, lo cual la hace una mala conductora del calor. Los espesores mínimos de la cubierta de material detrítico necesarios para constituir una carpeta protectora, que efectivamente reduzca la fusión del hielo o nieve infrayacentes, son del orden de 25 cm; con el transcurso del tiempo, y en la medida que el hielo infrayacente se funde lentamente por el escaso calor transmitido a través de la cubierta detrítica, esta aumenta su espesor, en consecuencia aumenta su efecto protector, y permite una mayor persistencia del hielo infrayacente.



**Fig. 2.1.2.4-A. Corte en un glaciar de roca del sector Rinconada, cuenca alta del Río Blanco. Cubierta detrítica protectora y la presencia de impurezas (clastos) embebidos en la masa de hielo.**

A modo de ejemplo, una acumulación de nieve de 10 m de espesor con 2% en volumen de detrito, si se funde totalmente deja un espesor de 20 cm de material detrítico. Otro ejemplo, 10 m de espesor de nieve con 3 % de detritos al fundirse deja 30 cm de espesor de cobertura detrítica. Un depósito de avalancha de 15 m de espesor (espesor común en grandes avalanchas) con 2 % de detritos, produce al fin de verano una cubierta de detrito de 25 cm de espesor (fundiéndose 12,5 m de espesor de nieve) que protege un manto de nieve subyacente de 2.5 m de espesor.



**Fig. 2.1.2.4-B. Perfil esquemático por el eje de un glaciar de roca.**

Existen muy diferentes definiciones de glaciares de roca en el mundo, desde aquellas que los consideran acumulaciones detríticas en las cuales se ha infiltrado agua y congelado como una matriz de hielo (en realidad un suelo helado, o “permafrost”), otras que los consideran remanentes de glaciares en extinción y, entre otras, también aquellas que los consideran formas particulares de glaciares.

Tan solo con las grandes intervenciones en los glaciares de roca realizadas en Chile como consecuencia de la minería en la alta montaña desde la década de los '80, se ha tenido, por

primera vez en el mundo, una visión integral de estas masas de hielo. Lo que esta experiencia muestra, con los diversos estudios realizados en los glaciares de roca, es que se trata de glaciares propiamente tales, que se diferencian de otros glaciares solamente en que poseen un mayor contenido de impurezas, lo cual produce una cubierta detrítica que los cubre de manera protectora, totalmente o en gran parte.

Así, los glaciares de roca son, por definición, glaciares cubiertos en la totalidad (o gran parte) de su Zona de Acumulación por material detrítico en espesor suficiente para proteger parte de la acumulación de nieve infrayacente; desde luego, la cubierta de detritos en la Zona de Ablación es total (ver esquema en Fig. 2.1.2.5-B y Fig. 2.1.2.5-C). Por otra parte, en los glaciares propiamente tales, acumulaciones de detritos en superficie se manifiestan solamente en la Zona de Ablación y pueden ir desde inexistente hasta una cubierta de espesor protector cerca del frente, las zonas de acumulación de estos glaciares no muestra acumulación de detritos suficiente para formar constituir una protección, o simplemente no muestra ninguna presencia significativa de detritos.

Considerando todo lo anterior, el requisito básico para la formación de glaciares de roca es que exista una acumulación muy alta de nieve con un contenido significativo de detritos. Esto ocurre normalmente en los depósitos de nieve de avalanchas donde el contenido de detritos suele ser del orden de 2 % en volumen, y en las acumulaciones de nieve al pie de farellones de roca de pobre calidad geotécnica y donde se producen continuamente pequeños desprendimientos de partículas que ruedan por el manto de nieve muy inclinada hasta pendientes más estables, donde forman concentraciones que pueden llegar al 3 % o 4 % del espesor total del manto de nieve. Por lo mismo, es virtualmente imposible que la precipitación nival por si sola logre conformar glaciares de roca; estos se originan y encuentran donde la configuración del terreno permite la depositación de avalanchas, o bien al pie de grandes farellones de roca de pobre calidad geotécnica con importantes acumulaciones de nieve en la base. También es razonable suponer, de acuerdo con lo anterior, que normalmente los glaciares de roca subsisten durante varios años con balances de masas negativos, los cuales se compensan con un fuerte balance positivo que recurre una vez cada varios años o en una secuencia de años.



Por todo lo señalado anteriormente, es evidente que existe toda una gama de características glaciares relacionadas con el grado de impurezas presentes en las masas de hielo, desde los glaciares esencialmente blancos (ver Fig 2.1.2.5-D), sin concentración de detritos en toda su superficie, hasta los glaciares de roca con una virtualmente total cubierta de detritos. También existen glaciares blancos que, debido a variaciones en sus balances de masas hacia términos cada vez más negativos, se encuentran en un proceso de transición desde ser (o haber sido) glaciares blancos, o casi blancos, a glaciares de roca, mediante la formación de una cubierta detrítica en la superficie del glaciar que es cada año más extensa.



**Fig. 2.1.2.5-C. Fotografía aérea pre-rajo Su Sur, con los glaciares de roca del sector Río Blanco. El rajo Sur-Sur ocupa actualmente gran parte de sector centro-izquierda superior de la fotografía.**



**Fig. 2.1.2.5-D. Glaciares blancos (Barroso 4 a 7, B4 a B7) en el sector de Laguna Barroso; en la mitad derecha superior de la fotografía aérea.**

Considerando todo lo anterior es que hemos propuesto clasificar, según su contenido de impurezas, a los glaciares como sigue:

**Glaciar Blanco:** Glaciares con cantidades virtualmente imperceptibles de impurezas y que, por lo tanto, se aprecian esencialmente blancos.



**Glaciar de roca:** Glaciares que contienen un porcentaje de detrito tal que este cubre toda la superficie de su Zona de Ablación y parte importante de su Zona de Acumulación. En estos glaciares, el contenido de detritos puede alcanzar más del 20% del volumen total del glaciar.

**Glaciar gris:** es un glaciar cuya Zona de Ablación muestra de manera visible la presencia de impurezas en superficie, desde levemente perceptibles hasta una cubierta de detritos claramente distinguible, continua o bandeada, y que es más potente en detritos hacia el frente del glaciar. Su Zona de Alimentación no muestra impurezas. De acuerdo a su contenido general de impurezas se encuentra entre los glaciares blancos y los glaciares de roca.

**Glaciar de transición:** Glaciar gris que se está transformando a un glaciar de roca. Características distintivas son: (i) una cubierta de detritos que se extiende sobre casi la totalidad de la Zona de Ablación, y (ii) la ocurrencia de pequeñas extensiones de cubierta de detritos, como parches dentro de la Zona de Acumulación. Tras un año, o secuencia de años, tiene la apariencia de glaciar gris, pero tras una secuencia de años normales o de bajas precipitaciones tiene la apariencia de glaciar de roca.

## **2.2 AVALANCHAS.**

### **2.2.1 Tipos de avalanchas y espesores mínimos de nieve para iniciarlas.**

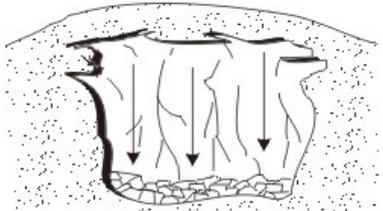
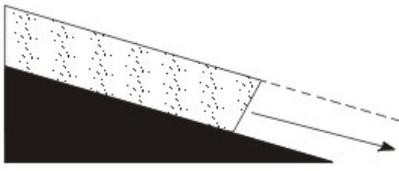
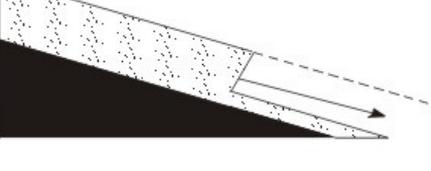
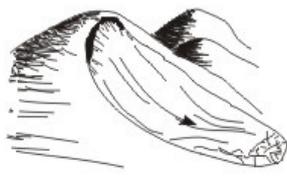
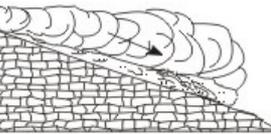
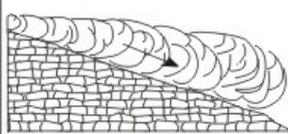
Durante las tormentas todas las pendientes acumularán nieve, pero aquellas que enfrentan a los fuertes vientos lo harán en menor grado. En la cordillera del centro de Chile las direcciones dominantes del viento durante las tormentas es desde el Norte y Noroeste, por ello las pendientes que miran al Sur y al Este acumularán más nieve que otras; esta acumulación provendrá en parte de la precipitación directa, pero también, en parte, de la depositación de nieve transportada por el viento.

Es un hecho bien conocido en la cordillera del centro de Chile, al igual que en otras partes del mundo, que las avalanchas se inician cuando la acumulación de nieve fresca (o de poca antigüedad) excede de 0,5 m cuando esta se deposita directamente sobre el suelo sin nieve, o bien excede de 0,3 m cuando la acumulación de nieve fresca se produce sobre una superficie suave



formada por un manto de nieve pre-existente. En las canaletas rocosas este espesor mínimo suele incrementarse pero, por otra parte, si la precipitación ocurre con viento la acumulación de nieve fresca es mayor que en pendientes abiertas. En la medida que la acumulación de nieve aumenta durante una tormenta, se producen en la zona, inicialmente, pequeñas avalanchas conocidas como “chorreos”, o bien simplemente no se producen avalanchas sino hasta que se haya acumulado una cantidad apreciable de nieve en las laderas y se inician, directamente, avalanchas mayores.

El inicio de avalanchas ocurre debido a dos tipos de procesos. En el primero de ellos, una cantidad relativamente pequeña de nieve suelta, o con poca cohesión, se desplaza de su lugar de reposo debido al viento o por trozos de nieve caída desde rocas o cornisas superiores, y comienza a deslizarse arrastrando en su caída masas adicionales de nieve sin cohesión que encuentra en su camino y generando así una avalancha. Estas avalanchas se inician en un punto, sus sendas tienen forma de una V invertida muy aguda (ver Fig. 2.2.1-A) y se llaman "avalanchas de nieve suelta".

ESQUEMA DE CLASIFICACION GENERAL DE AVALANCHAS.			
CRITERIO	DEFINICION		
TIPO DE MOVIMIENTO INICIAL	 De nieve suelta		 De placa de nieve
SUPERFICIE DE DESLIZAMIENTO	 De fondo, sobre el terreno		 De superficie, sobre parte del manto de nieve
GRADO DE HUMEDAD DE LA NIEVE	Nieve seca	Nieve mixta	Nieve saturada
FORMA DE LA SENDA	 Abierta	 Parcialmente confinada, o restringida	 Confinada
TIPO DE FLUJO PREDOMINANTE	Sobre el terreno	Mixto	Nieve polvo en suspensión
			

**Fig. 2.2.1-A: Criterios de descripción de avalanchas.**

En el segundo tipo de proceso, la avalancha se inicia por el desarrollo de una fractura en nieve cohesiva, iniciándose un deslizamiento y liberándose una placa de nieve de variadas dimensiones. La fractura es de tensión en el coronamiento y de cizalle en la base de la placa. La placa se desliza fracturándose en bloques más pequeños. Estas son las denominadas "avalanchas de placa de nieve" (ver Fig. 2.2.1-A).



Las avalanchas de placa de nieve se inician por diversas causas, pero siempre se requiere que un estrato de nieve relativamente rígido descansa sobre otro estrato más débil, o bien sobre un estrato cuya superficie posee una baja resistencia a los esfuerzos de corte. Independientemente del mecanismo de inicio, esfuerzos de tensión se desarrollan en la placa de nieve inclinada, los esfuerzos de corte en la base de la placa de nieve exceden su resistencia al corte, y se propaga una fractura, la cual se refuerza con la formación de una fractura de tensión en el coronamiento de la placa. Los fenómenos naturales que dan origen a las condiciones de esfuerzos en la base de un manto de nieve, causantes de avalanchas de placas, pueden ser: una precipitación nival muy abundante e intensa, un compactamiento eólico de la nieve fresca, el debilitamiento de la nieve en la base de un estrato debido a procesos de metamorfismo de la nieve (del tipo de gradiente de temperatura), debilitamiento de la base de un estrato debido a deformación lenta (reptación), o debilitamiento debido a procesos de fusión. Una segunda posible causa de avalanchas de placas es debida al desarrollo inicial de una fractura de tensión en el manto de nieve, la cual activa, a su vez, una fractura de cizalle en la base del manto; las fracturas de tensión pueden ocurrir debido a una reducción de la resistencia a los esfuerzos de tensión en el manto de nieve por su temperización (a 0° C), o bien por incremento de los esfuerzos de tensión debido a fenómenos de reptación. Otras causas de inicio de avalanchas de placas de nieve ocurren por combinación de algunas de las causas señaladas, o bien causas excepcionales como contracción termal por enfriamiento del manto. Normalmente, para que ocurran avalanchas de placas de nieve se requieren pendientes de más de 30° y mantos de nieve relativamente rígida.

Debido a que la nieve se densifica con el tiempo, adquiere mayor resistencia mecánica y el manto de nieve se hace más estable, las avalanchas de nieve fría y seca suelen ocurrir principalmente durante las tormentas, cuando la densidad y resistencia mecánica del manto de nieve son relativamente bajas, o hasta dos o tres días después de la nevada, mientras el manto de nieve adquiere estabilidad.

Por lo anterior, más significativo que las precipitaciones totales durante una prolongada tormenta, o que las precipitaciones mensuales o anuales, que son indicadores generales de la cantidad de agua o nieve que puede esperarse en una zona, lo realmente importante en el caso de las

avalanchas es la altura de nieve (o su equivalente en agua), que puede depositarse durante las tormentas en períodos del orden de hasta 72 horas de duración.

En primavera se producen las llamadas "avalanchas de nieve húmeda" (ver Fig. 2.2.1-A). Pueden ocurrir en cualquier momento del día pero principalmente en las horas de mayor calor. Su desarrollo se asocia a una secuencia de días soleados y de alta temperatura con el manto de nieve saturada por el proceso de fusión en marcha, o bien a una abundante precipitación líquida sobre un manto de nieve temperada, todo lo cual, incrementa la densidad del manto de nieve y reduce su cohesión y ángulo de fricción interna.

Como puede verse, las causas naturales básicas que generan avalanchas son: grandes acumulaciones de nieve en pendientes inestables, saturación del manto de nieve por procesos de fusión o lluvia, y cargas dinámicas. Pese a ello, es necesario que las acumulaciones de nieve excedan las irregularidades del terreno, tales como rocas y/o arbustos y luego que acumulaciones adicionales de nieve se depositen sobre la superficie suavizada. En la mayoría de los casos esto implica una acumulación del orden de medio metro a un metro de nieve en las zonas de inicio de las sendas de avalancha.

### **2.2.2 Pendiente de la zona de inicio.**

Avalanchas de nieve húmeda, o saturada, pueden iniciarse en pendientes inferiores a 25°, pero las avalanchas de nieve seca requieren, normalmente, pendientes superiores a 30° (ver Fig. 2.2.2-A). Sin embargo, existen casos de avalanchas de placas de nieve que se han iniciado en pendientes tan bajas como solamente 25°. Considerando las cotas del área del proyecto aquí analizado, se considera poco probable la ocurrencia de avalanchas de nieve húmeda o saturada.

Avalanchas de nieve suelta se producen, principalmente, porque la inclinación de la pendiente excede el ángulo de reposo estable de los cristales de nieve, o bien porque algún agente externo (desprendimientos de rocas, el viento, etc.) induce la inestabilidad. En nieve fresca y fría, formada por fragmentos de cristales de nieve pulverizados por la fragmentación mecánica inducida por fuertes viento, el ángulo de reposo estable puede ser de tan solo 17°. Sin embargo,

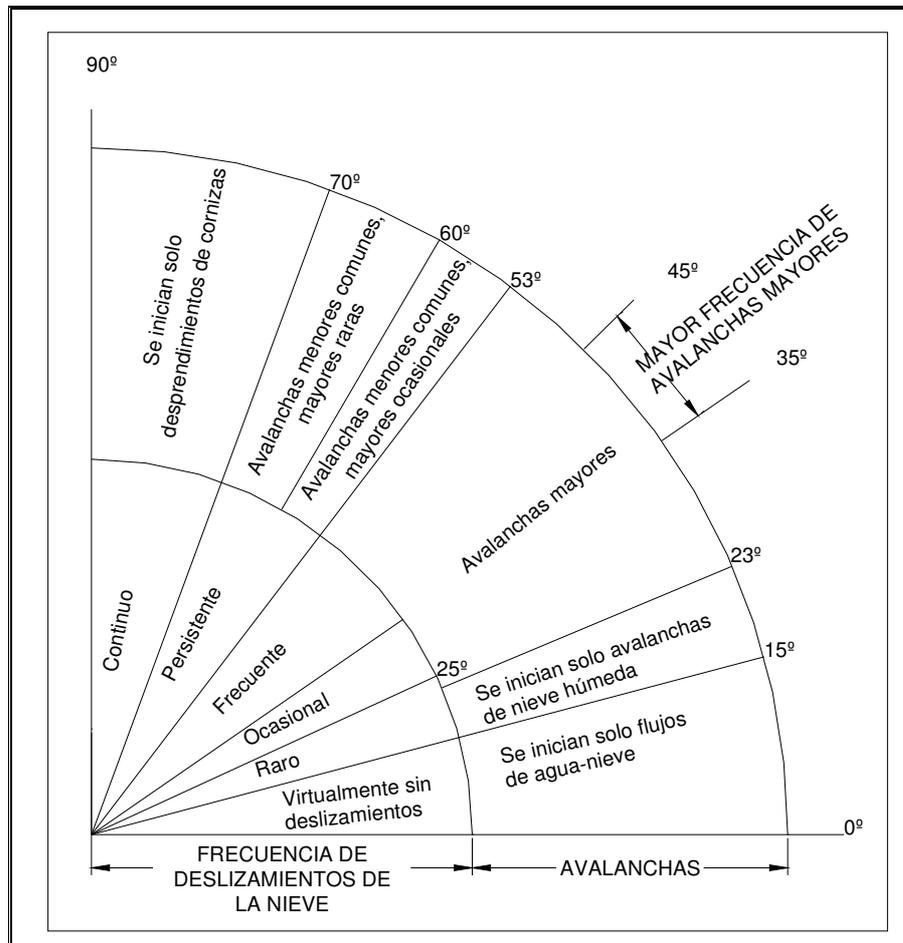
las avalanchas de nieve suelta y seca son extremadamente raras en las pendientes de  $17^\circ$ , por lo que generalmente se acepta que la pendiente mínima para generar avalanchas de este tipo es de  $22^\circ$  (o  $21,5^\circ$ ). Esta es, también, la experiencia en los Andes de Chile.

La nieve recién caída tiene una cohesión relativamente baja, o bien no tiene cohesión, dependiendo esto esencialmente de la temperatura de precipitación. El ángulo de fricción interna de la nieve fresca depende básicamente del tipo de cristales precipitados, los que pueden ser desde esféricos y producir un ángulo de valor mínimo, del orden de  $22^\circ$ , hasta complicadas formas de estrellas cuyos cristales se entrelazan y originan los ángulos máximos, del orden de  $53^\circ$  a  $70^\circ$ ).

Debido a lo anterior, la nieve fresca generalmente logra mantenerse estable en pendientes inferiores a  $23^\circ$ . Por lo mismo, en pendientes mayores a  $53^\circ$  la nieve se acumula cada vez menos, salvo en canaletas o rugosidades del terreno, y mientras este no exceda de aproximadamente los  $70^\circ$  de inclinación. En pendientes superiores a  $60^\circ$  la nieve no se acumula (salvo en relieves muy rugosos), sino que se desliza con mucha persistencia. Así, son las acumulaciones de nieve en pendientes entre  $23^\circ$  y  $53^\circ$  a  $70^\circ$  aquellas que generan la mayor cantidad de avalanchas. En consecuencia, todas las laderas de montaña con pendientes entre aproximadamente  $23^\circ$  y  $70^\circ$  son potenciales zonas de inicio de avalanchas de nieve fría, ya sea como placas de nieve o como avalanchas de nieve suelta. Se requiere, desde luego, que las condiciones meteorológicas permitan la acumulación de suficiente nieve como para iniciar avalanchas, y que las rugosidades del terreno permitan que la nieve se deslice, ya sea como una inicial placa de nieve (avalanchas de placas de nieve) que se desintegra a lo largo de la senda que transita la avalancha, o bien como avalancha de nieve suelta. En la Cordillera de los Andes de Chile central, las condiciones meteorológicas dificultan la ocurrencia de avalanchas de nieve suelta (y fresca) en pendientes inferiores a  $30^\circ$ , pero no se desconocen.

Las avalanchas mayores de nieve fría ocurren, por lo general, en pendientes donde los deslizamientos no son persistentes y donde también permiten que ocurran con cierta frecuencia, vale decir, preferentemente en las pendientes entre  $35^\circ$  y  $53^\circ$ .

Las avalanchas de nieve de primavera, o de nieve húmeda, en que todo el manto de nieve se encuentra a 0°C, ocurren en la cordillera central de Chile en pendientes superiores a 30° y con mantos de nieve saturada de aproximadamente más de un metro de espesor.



**Fig. 2.2.2-A. Frecuencia y magnitud de las avalanchas en relación con las pendientes del terreno en las zonas de inicio de las avalanchas.**

### 2.2.3 Identificación de sendas de avalanchas.

Comenzando una avalancha donde la pendiente y condiciones de nieve lo permiten, esta fluye gravitacionalmente y formando ondas estacionarias en los cambios de dirección de movimiento obligados por las características del relieve.



Una herramienta de ayuda en la identificación de sendas de avalanchas es la presencia de abanicos de deyección de detritos en la base de las laderas, donde se depositan las avalanchas y, junto con ellas, el detrito rocoso que transportan (normalmente 1% a 2% del volumen total de la avalancha). Estos abanicos de detritos se caracterizan por la ausencia casi total de vegetación, y son prominentes en las regiones semiáridas donde prácticamente no existen flujos de agua que puedan originarlos. Las rocas de estos abanicos de detritos poseen un grado de meteorización similar al de los afloramientos rocosos del área, y no poseen suelos que los cubran.

Otra herramienta de ayuda en la identificación de sendas es la presencia de glaciares de roca, los cuales se alimentan, preferentemente, por la nieve de potentes depósitos de avalanchas, la que no logra ser totalmente destruida por la fusión de la temporada veraniega. En el área de los rajos del Proyecto de Expansión, la presencia de glaciares de roca es común.

#### **2.2.4 El flujo de las avalanchas.**

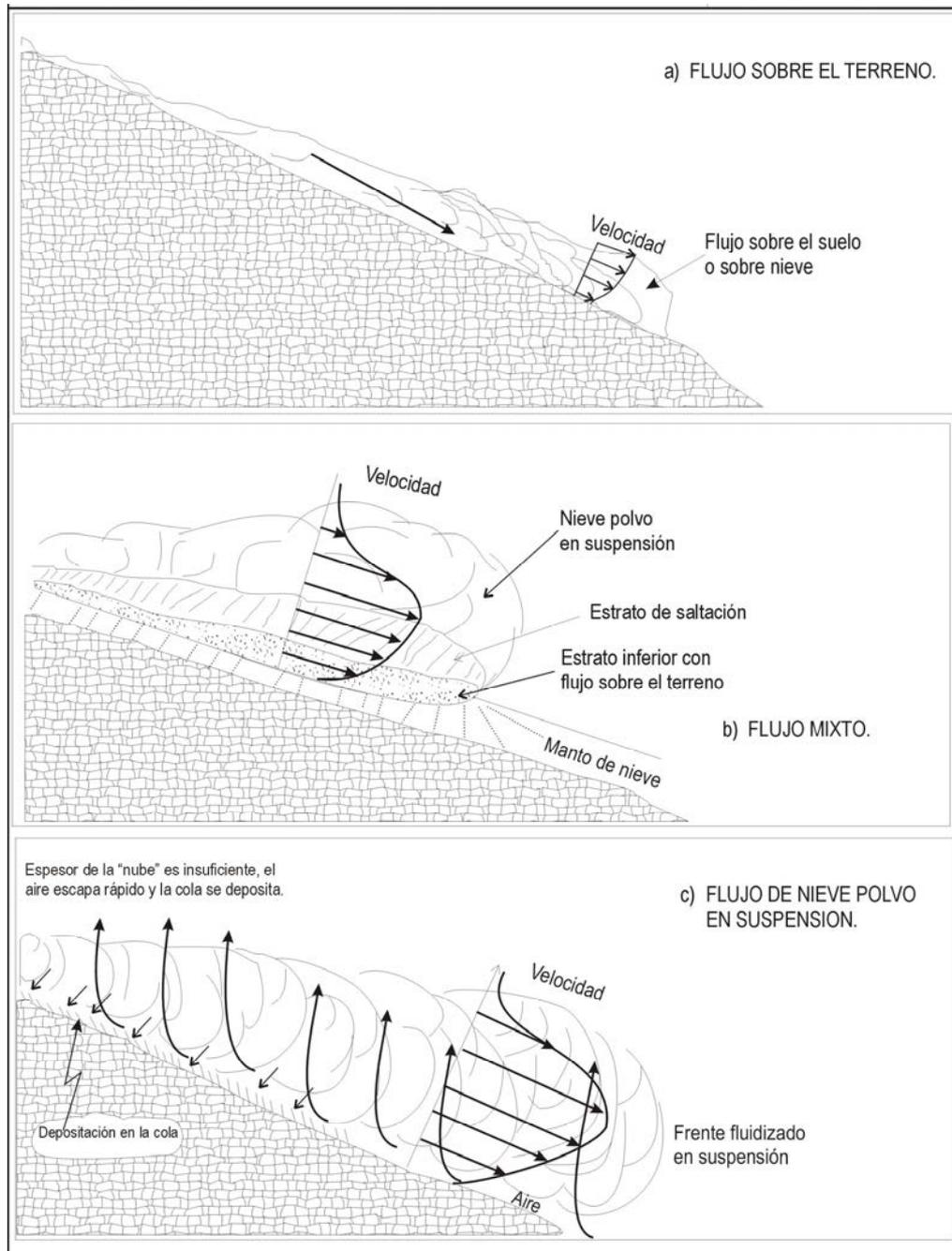
Las avalanchas fluyen como (ver Fig. 2.2.4-A):

- Una mezcla de cristales de nieve en suspensión y aire, denominadas avalanchas de nieve polvo en suspensión, generalmente frías y secas. Estas son las avalanchas más rápidas, de mayor altura de flujo y de mayor distancia de corrida.
- Un flujo sobre el suelo, de nieve densa, generalmente algo húmeda, típica de nieve de primavera o bien cuando las condiciones climáticas permiten la temperización del manto de nieve. En general, son avalanchas de flujo relativamente lento, de baja altura de flujo y de una variable distancia de corrida dependiendo del grado de humedad o saturación de la nieve. Por la cota y temperaturas del aire que existen en el entorno de los rajos, además del efecto de nieve penitente, es poco probable que avalanchas de nieve húmeda puedan desarrollarse en el área del estudio.
- Una mezcla de los dos tipos anteriores de flujo, con un estrato inferior de la avalancha fluyendo sobre el suelo y de nieve relativamente densa pero fría y seca, un estrato intermedio de fragmentos de nieve en “saltación” y por lo general de altura similar o hasta dos y tres veces la altura del estrato inferior, y un estrato superior, con nieve en



suspensión y de baja densidad, que forma la nube de nieve que acompaña al flujo de la avalancha. A este tipo de avalanchas se les denomina de flujo mixto (o de flujo denso).

Las avalanchas de flujo mixto son las más comunes en las montañas de Chile, a juzgar por las observaciones de corridas de avalanchas realizadas por Geoestudios y por la coincidencia de estas distancias con aquellas calculadas como avalanchas de flujo mixto.



**Fig. 2.2.4-A. Tipos de flujo de las avalanchas.**

Avalanchas de nieve polvo parecen desarrollarse principalmente donde, debido a la particular forma del terreno, avalanchas de flujo mixto viajando a alta velocidad encuentran una forma del terreno parecida a la de un salto de esquí, donde las avalanchas son lanzadas al aire, se fluidizan y transforman en avalanchas de nieve polvo en suspensión. Avalanchas de nieve polvo también

pueden originarse tan solo a partir de avalanchas de flujo mixto viajando a altas velocidades en fuertes pendientes; por ello, es siempre conveniente evaluar avalanchas de flujo mixto que corren a velocidades en exceso de 100 km/h, también como avalanchas de nieve polvo. Ambas condiciones, relieve en forma de salto de esquí y largas y abruptas pendientes que permiten a las avalanchas alcanzar altas velocidades, son las condiciones básicas de formación de avalanchas de nieve polvo y flujo en suspensión.

### **2.2.5 Distancia de corrida de las avalanchas.**

Normalmente, las avalanchas de nieve fría y seca se detienen recién cuando la pendiente del terreno es inferior a aproximadamente  $10^{\circ}$  a  $11^{\circ}$ , aún cuando las avalanchas menores, como los “chorreos” (pequeñas avalanchas precursoras de mayores, al inicio de una tormenta), suelen detenerse en pendientes del orden de  $15^{\circ}$  a  $20^{\circ}$  (porque parte de la nieve en movimiento queda retenida en la pendiente y la avalancha pierde altura de flujo y masa).

Aunque las zonas de inicio de avalanchas pueden estimarse, entre otros, de los antecedentes de terreno, para evaluar adecuadamente la distancia de corrida de las avalanchas no son suficientes los elementos descriptivos del terreno. Se requiere calcular las características del movimiento de las avalanchas, para lo cual se necesitan diversos parámetros, como se señala más adelante.

Para calcular la distancia de corrida de las avalanchas, en cada senda se trazan los probables ejes de caídas, divididos en segmentos de pendiente homogénea (según la topografía disponible). Las velocidades de las avalanchas se calculan para cada segmento, junto con una prueba de detención en el segmento y, si la prueba de detención es positiva, se calcula de la distancia de corrida. Es conveniente realizar los cálculos con un programa de computación de simulación de avalanchas, como por ejemplo AVALANCH, desarrollado por Geoestudios Ltda. Este programa se basa en estándares internacionales para el cálculo de avalanchas, en particular en las Recomendaciones Suizas, y en las experiencias locales, y ha sido (y es permanentemente) contrastado con observaciones locales de distancia de corrida de avalanchas y efectos de ellas, y ajustado y validado correspondientemente.

### **2.2.6 El manto de nieve**

Desde el momento en que los cristales de nieve precipitan e incorporan al manto de nieve, sufren un proceso de sinterización que cambia su estructura cristalina y hace al manto de nieve cada vez más denso y (en general) de mayor resistencia mecánica. La nieve fresca, aquella cuya densidad por lo general no excede de  $200 \text{ kg/m}^3$ , es principalmente aquella depositada durante las tormentas y con antigüedad de aproximadamente 72 horas. También se conoce la ocurrencia de avalanchas con nieve de mayor densidad (y generalmente antigüedad), pero son menos comunes a medida que la densidad (y generalmente también la resistencia mecánica) aumenta. Por lo anterior, resulta importante analizar las precipitaciones que pueden ocurrir en tormentas de 72 horas de duración.

Los períodos entre tormentas consisten siempre de cielos claros, con alta tasa de radiación solar, y relativamente baja velocidad de vientos. En las pendientes expuestas a los rayos del sol y en cotas bajas, esto favorece la ablación del manto de nieve, produciendo fusión y evaporación y, ocasionalmente, sublimación. En cotas altas y temperaturas fuertemente negativas, estas condiciones climáticas también favorecen el proceso de sinterización del manto de nieve, mediante el cual la nieve se densifica y endurece con el tiempo. Debido a este proceso, el manto de nieve se hace bastante estable ya dos o tres días después de la conclusión de las tormentas. Debido al mismo proceso, la nieve es más densa y estable en las pendientes que miran al Norte, y menos en aquellas que miran al Sur. También, y debido a la dirección del viento durante las tormentas, principalmente desde el Norte, el manto de nieve se presenta menos compactado en las pendientes que miran al Sur.

La combinación de condiciones climáticas durante las tormentas, con los predominantes vientos del Norte, y el proceso continuo de sinterización que produce metamorfismo en la nieve recién caída, conducen a mantos de nieve menos densos y menos estables en las pendientes que miran al Sur, que aquellos en pendientes que miran al Norte. Vale decir, a características del manto de nieve que son más propicias para las avalanchas en las pendientes que miran al Sur.

Por otra parte, en las altas montañas de la cordillera del centro y Norte de Chile, la exposición al sol y los efectos de la radiación en onda corta son la principal causa de ablación (fusión o



sublimación) de la nieve. Debido a esto, la nieve sobre el suelo subsiste por períodos más prolongados en las laderas y canaletas rocosas que miran, en general, al Sur.



### **3. METODOLOGÍA DE ESTUDIOS BÁSICOS PARA LA GENERACIÓN DE UN NUEVO GLACIAR.**

#### **3.1 TÉCNICAS DE ALIMENTACIÓN DE NIEVE Y ENCAUZAMIENTO DE AVALANCHAS.**

##### **3.1.1 Mejorar la alimentación de un glaciar.**

###### **3.1.1.1 La técnica.**

La ubicación de algunos glaciares se presta para intentar incrementar las acumulaciones de nieve en sus zonas de acumulación y, así, revertir el balance de masas negativo que los afecta, o a lo menos reducir esta tendencia negativa. Estos glaciares se han originado en nichos de montaña ubicados a “sotovento” de la dirección del viento en las tormentas de nieve, aprovechando las mayores acumulaciones naturales de nieve y el menor efecto de la radiación solar por sus exposiciones al Sur. En esta situación, y considerando el relieve relativamente suave en sus cabeceras, parece muy posible magnificar artificialmente el efecto de la acumulación de nieve.

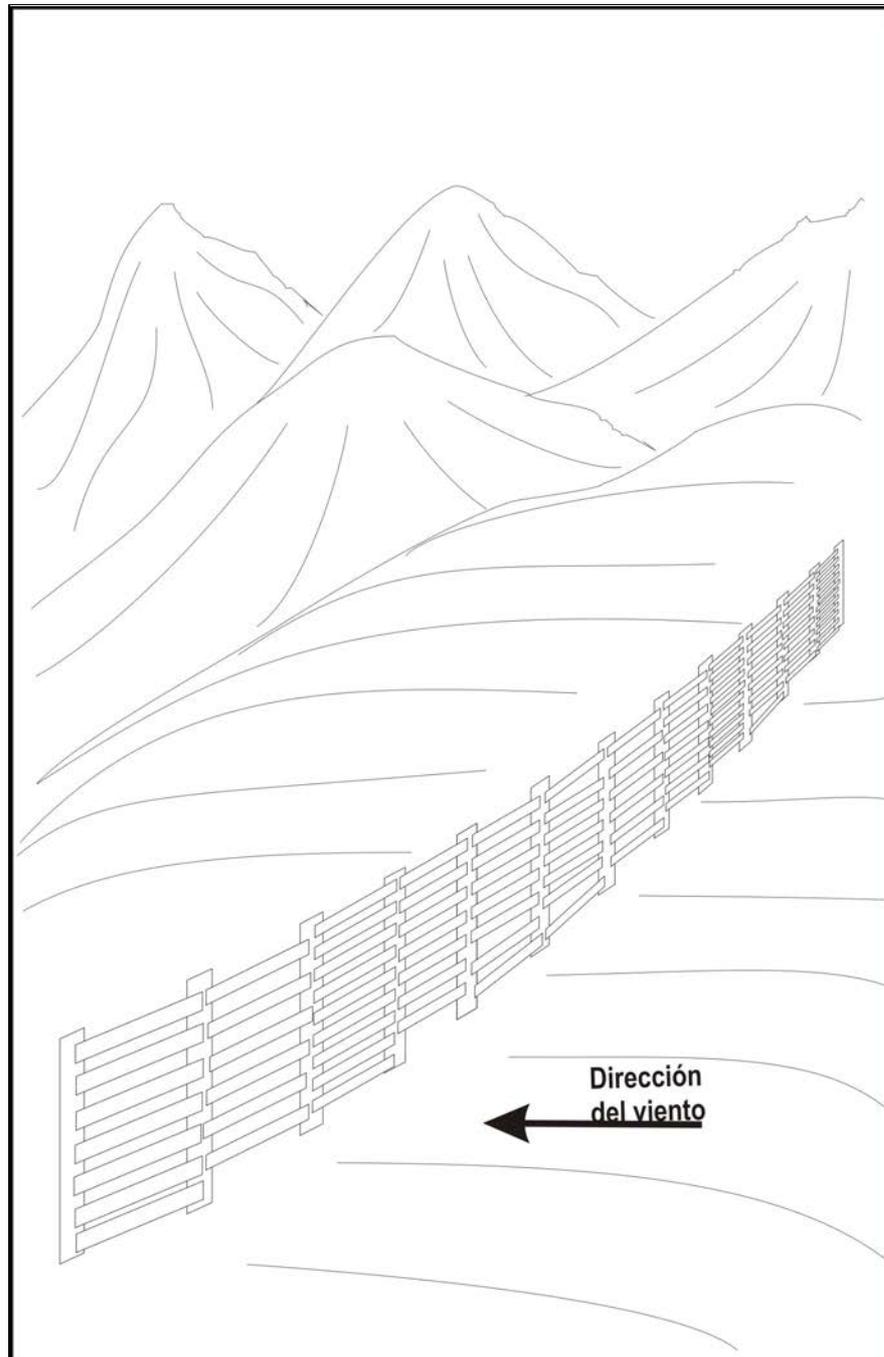
También puede ser aplicable la técnica de mejorar la alimentación con nieve de glaciares a aquellos glaciares generados artificialmente, siempre cuando el relieve en que se ubican lo permita

Para lo anterior es posible utilizar técnicas de manejo de nieve comúnmente empleadas en el diseño de protecciones de avalanchas, en particular la instalación de vallas de nieve en los cordones montañosos que constituyen las cabeceras de estos glaciares. Una de estas técnicas, el empleo de vallas de nieve, permite incrementar significativamente el espesor de la acumulación nival, y realizar esto sobre superficies de varias hectáreas. Otras técnicas son las de empleos de deflectores de viento, púlpitos, techos jet, paneles de turbulencia, y diversas otras.

Las vallas para nieve (ver esquema en Fig. 3.1.1.1-A) tienen el propósito de atrapar la nieve en sitios seleccionados. Las vallas actúan como obstáculo para formar vestigios de nieve (ver párrafo 3.904.405) por delante y detrás de ellas, y se disponen de manera perpendicular a la dirección



dominante del viento en tormentas. El volumen de nieve que puede atrapar una valla es considerable. Las vallas no necesitan ser impermeables al viento; experiencias de terreno han demostrado que vallas con un 70% de su superficie cubierta (designadas habitualmente como de densidad 0,7) atrapan virtualmente la totalidad de la nieve. Por otra parte, las vallas no requieren ser cubiertas en su parte inferior (0,5 a 0,7 m), en lo que es virtualmente la profundidad habitual mínima de la nieve en zonas de montaña y en tormentas importantes.



**Fig. 3.1.1.1-A. Esquema de valla para nieve.**

Las vallas atraparán tanta nieve como lo permita su altura sobre el suelo, pero la altura posee restricciones prácticas por cuanto vallas muy altas (generalmente más de 5 o 6 m dependiendo de

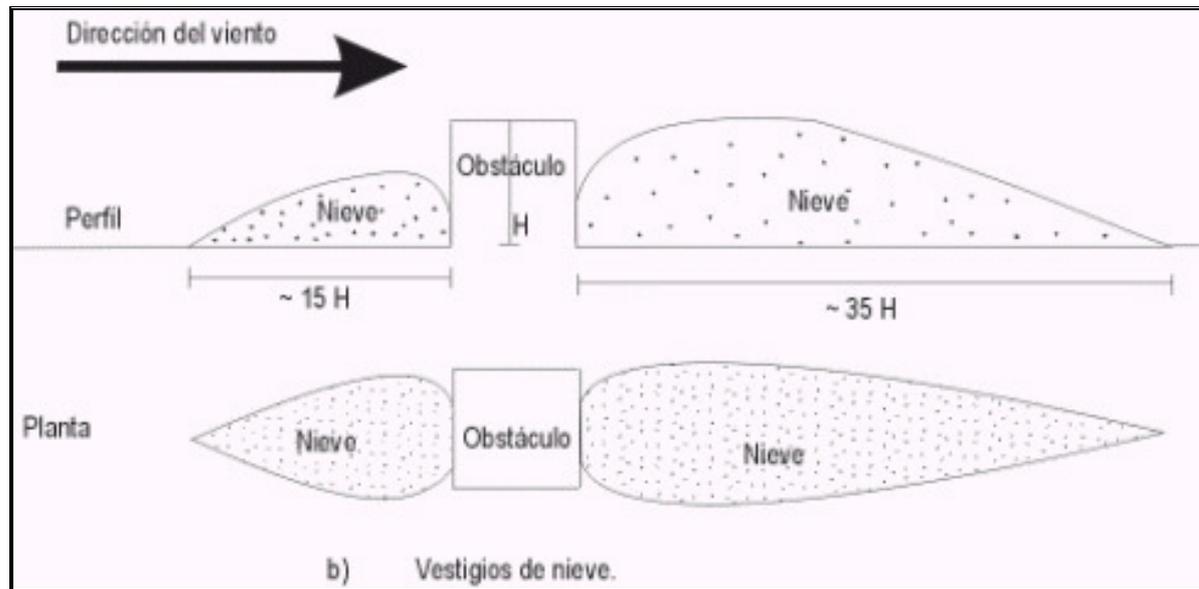
la velocidad máxima del viento) son afectadas por la presión del viento y requieren fuertes anclajes con cables metálicos.

Virtualmente no existen límites en cuanto al diseño de las vallas, desde simples estructuras de maderas, pasando por ejemplo por módulos de malla ACMA con láminas de acero entretejadas entre la malla ACMA, hasta largas y continuas vallas de materiales plásticos (estos últimos normalmente de relativamente corta vida por la acción de la radiación solar).

Un esquema ilustrativo de la disposición de vallas de nieve, y de las acumulaciones artificiales de nieve resultantes, se muestra en las figuras 3.1.1.1-B y C. A modo de ejemplo, una valla de 4 m de alto permite acumular hasta 4 m de espesor de nieve en un área de aproximadamente 140 m de extensión tras la valla y de la amplitud de la valla.



**Fig. 3.1.1.1-B. Valla para producir una acumulación artificial de nieve; experiencias en Chile. Viento de derecha a izquierda sobre la valla. La acumulación de nieve delante y detrás de la valla se denomina vestigio anterior y vestigio posterior de nieve.**



**Fig. 3.1.1.1-C. Esquema de vestigios de nieve en relación con un obstáculo, o valla. Nótese la relación de extensión y espesor del vestigio con respecto a la altura (H) de la valla.**

Una valla, construida con materiales durables, como acero y/o aluminio, puede mejorar sustancialmente la alimentación de glaciares durante toda la vida útil de la valla.

### **3.1.1.2 Las pruebas.**

La prueba de mejorar la alimentación de un glaciar y revertir su balance de masa negativo consiste, en resumen, en construir una valla de nieve de 4 m de alto en la cabecera de una cuenca, y evaluar la acumulación de nieve entre un verano y otro con un perfil topográfico longitudinal en el eje de acumulación, a realizar a mediados del verano del primer y del segundo año. Las diferencias de cota entre el primer perfil, realizado el primer verano antes de la operación de las vallas, y el segundo verano con las vallas operando tras el primer invierno, debiera reflejar la bondad de la valla en la acumulación de nieve.

La valla a construir en el primer verano puede ser de material de corta vida (dos a tres inviernos) y bajo costo, con el solo propósito de ensayar el método. Posteriormente se podrá instalar una

valla de larga duración (decenas de año) de material resistente a las condiciones climáticas, como acero galvanizado o aluminio.

Las actividades a realizar son las siguientes:

- ❖ En base a los antecedentes disponibles, seleccionar el área donde se ejecutará la prueba.
- ❖ Antes de fin de invierno sobrevolar en helicóptero (2 a 4 horas de vuelo, dependiendo de la ubicación) el área de instalación de la valla, para apreciar las condiciones de nieve y los materiales que pueden ser necesarios para la construcción de la valla.
- ❖ A mediados del verano, construcción de la valla. En tablas rústicas de madera tratada, apernada y clavada. De 4 m de alto y 60 m de largo, ancladas con vientos de cables de acero galvanizado y estacas de acero. Con apoyo de helicóptero para el transporte de personal y materiales.
- ❖ Al término de la construcción de la valla, ejecución del perfil topográfico longitudinal, desde la valla en la cabecera del glaciar hasta un punto distante unos 300 m de la valla.

Durante el segundo verano se deberá reparar la valla donde lo requiera y realizar la segunda medición del perfil topográfico.

### **3.1.2 Encauzamiento de avalanchas.**

#### **3.1.2.1 La técnica.**

La generación autosustentable de un nuevo glaciar necesita acumular en cotas altas espesores importantes de nieve durante la temporada invernal, probablemente mayores que 12 a 15 m, de manera que la nieve así acumulada logre sobrevivir los procesos de ablación de la estación de verano. Acumulaciones grandes de nieve es posible obtener manejando los depósitos de avalanchas; encausando con muros de tierra las avalanchas hacia sectores pre-determinados y así concentrando los depósitos en sitios deseados, dirigiendo hacia estos sitios más de una senda de avalancha, y conteniendo las acumulaciones de avalanchas con muros de tierra para evitar que el



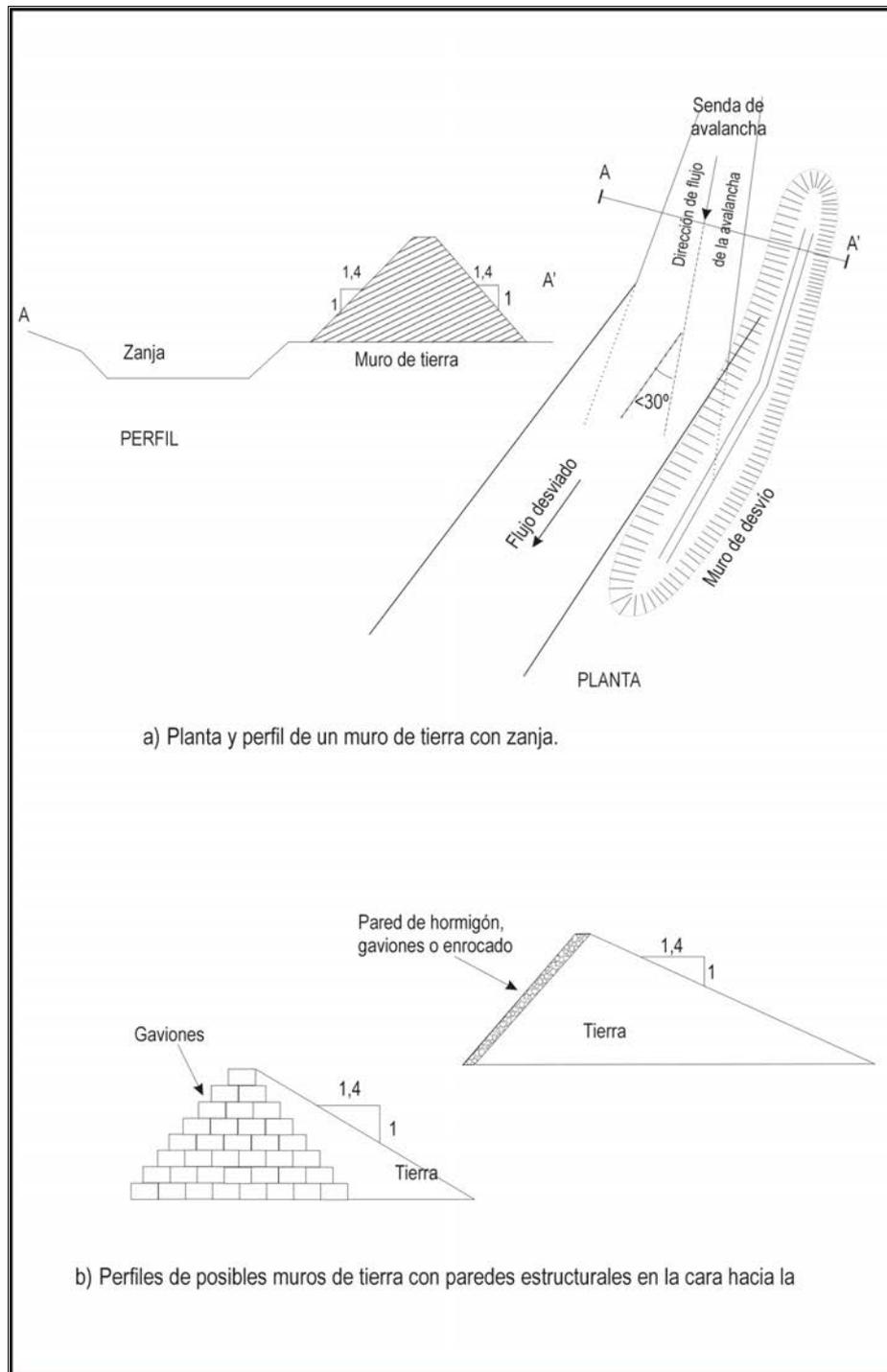
depósito de nieve se desparrame en una amplia extensión (como normalmente sucede en áreas abiertas) con un espesor reducido.

La técnica de manejo de avalanchas con muros (ver Figuras 3.1.2.1-A, B y C) para desviar sus cursos, encauzarlas, detenerlas, y otros, es bien conocida, se utiliza ampliamente en el mundo y en Chile se ha aplicado en numerosas instancias en proyectos mineros y en obras civiles.

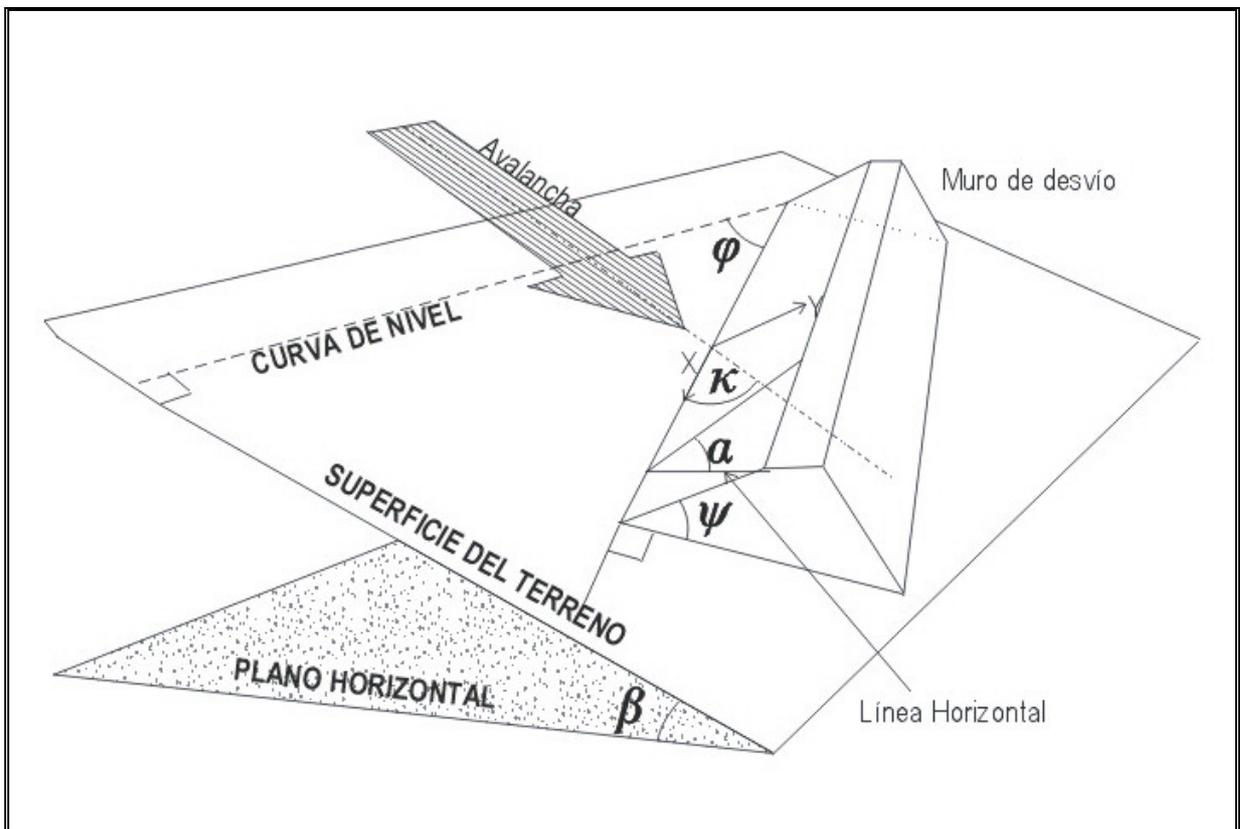
Las estructuras para desviar avalanchas son masivos muros o cuñas de tierra (ver Fig. 3.1.2-A), rocas o concreto, colocados en las zonas de tránsito o de depositación de las sendas de avalanchas, o vecinos a ellas, de manera de desviar el flujo de las avalanchas desde áreas o estructuras que se desea proteger hacia sitios elegidos. Cuando las particulares condiciones del terreno lo permiten, solamente zanjas excavadas en suelos o en rocas pueden ser suficientes para desviar avalanchas. En todo caso, esta estructura no detiene avalanchas, solamente las desvían.

Cuando en la construcción de los muros o de las cuñas se emplea tierra o rocas, es conveniente extraer el material para el muro desde la misma senda de la avalancha, excavando una zanja que ayuda a canalizar la avalancha y a reducir la altura del muro o de la cuña. Idealmente, la amplitud de la zanja debe ser suficiente para contener la avalancha desviada. El diseño de los taludes de los muros, de las cuñas y de las zanjas debe considerar adecuadamente las características geotécnicas de los materiales constitutivos, las aceleraciones sísmicas y los efectos de eventuales presiones de agua, para asegurar la estabilidad de las obras.

Los muros suelen consistir solamente de acumulaciones de tierra, pero ocasionalmente se construyen con el talud que recibe la avalancha constituido por paredes de hormigón, gaviones, enrocados u otros materiales, con el propósito de presentar taludes más parados que lo que permite una simple acumulación de tierra. Los muros de larga vida útil consisten normalmente de una pared exterior de hormigón o gaviones, y un relleno al interior de la cuña de material común del área, como tierra o rocas; si la altura de flujo de las avalanchas es pequeña, o si la pendiente del terreno es moderada, pueden ser suficientes cuñas construidas exclusivamente de tierra.

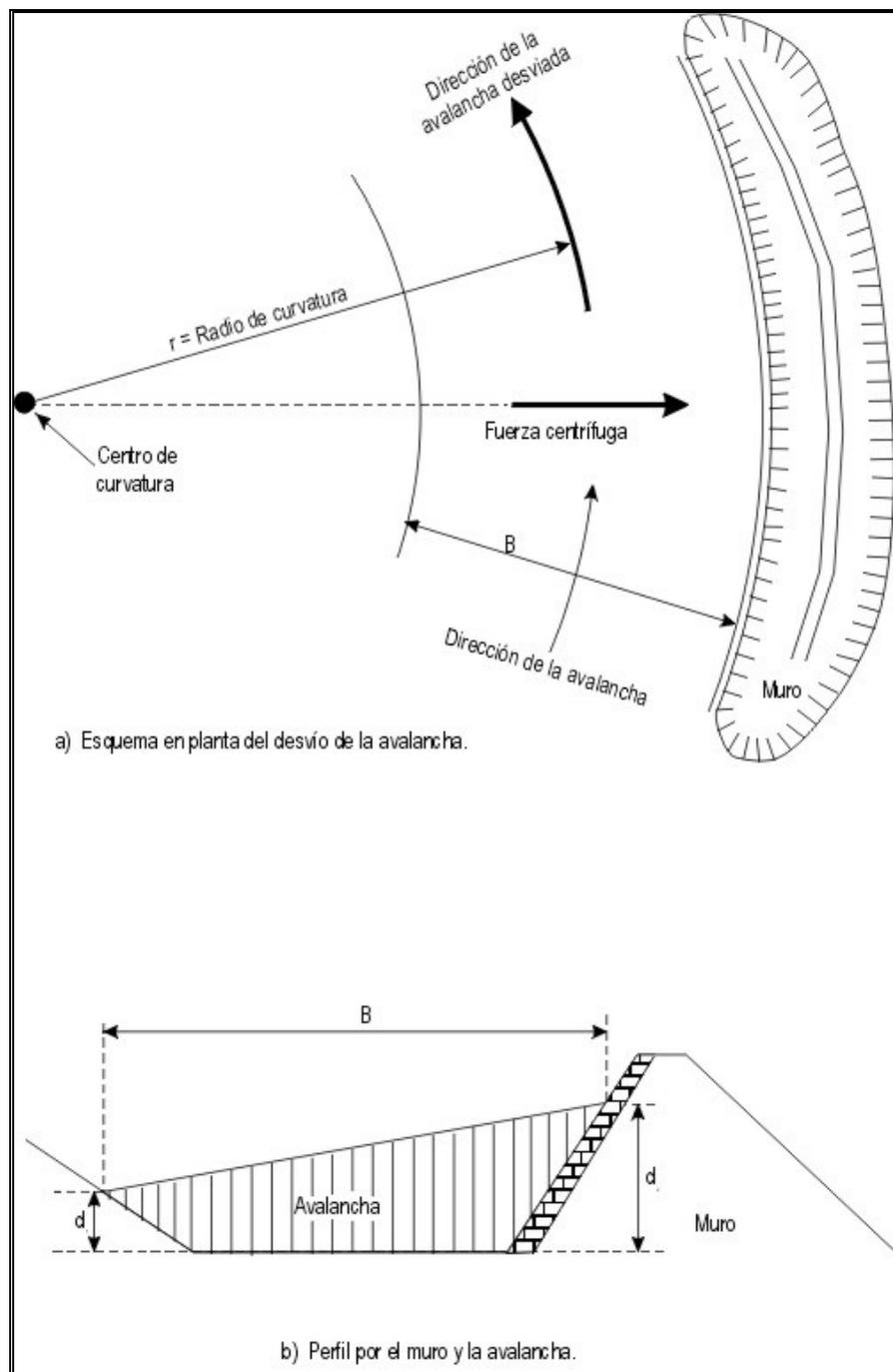


**Fig. 3.1.2.1-A. Esquema de muro para desvío de avalanchas**



**Fig. 3.1.2.1-B. Esquema de configuración geométrica en muro recto para desviar avalanchas.  $\kappa$  = ángulo de desvío,  $\psi$  = ángulo en una sección perpendicular al eje del muro,  $\alpha$  = inclinación de la línea de manto en la cara de aguas arriba del muro.**

Requisito básico de los muros es que sus alturas sean las adecuadas para contener las avalanchas considerando sus alturas de flujo, y que el ángulo de desvío sea tal (normalmente inferior a  $30^\circ$ ) que impida que la onda estacionaria que forma el flujo de la avalancha contra el muro, lo exceda (ver Fig. 3.1.2-C).



**Fig. 3.1.2.1-C. Onda estacionaria en un muro curvo para desvío de avalanchas.**

### **3.1.2.2 La prueba.**

El desvío de avalanchas con zanja-muro se practica de manera común en el mundo, y se han construido y probado estructuras de este tipo también en Chile. Por lo tanto, más que una prueba particular, una estructura, a lo menos preliminar (en cuanto a su altura y extensión) debe construirse en un área seleccionada para la generación de un nuevo glaciar.

Lo anterior implica, en lo esencial:

- a) Realizar un estudio de nieve y características de avalanchas, en particular espesores de nieve máximos en 72 horas, efectos del viento en los espesores de nieve, densidades de nieve en zonas de inicio de avalanchas y en los depósitos de avalanchas, distancia de corrida de las avalanchas, alturas de flujo, y otros.
- b) Identificar áreas de confluencias de sendas de avalanchas, donde estas podrían acumularse.
- c) Identificar tipos de suelos en el área de desvío de avalanchas, para eventual construcción de zanja-muro.
- d) Realizar reconocimientos de las condiciones de nieve y desvío de avalanchas, en helicóptero, antes de la construcción del muro, en invierno tras tormentas, y medir las acumulaciones de nieve en los depósitos. Esto último con topografía pre y post muro.

## **3.2 GENERACIÓN DE UN NUEVO GLACIAR.**

### **3.2.1 El plan general de trabajo.**

El plan general de trabajos para la generación de un nuevo glaciar debe comprender lo siguiente::

- a) Definir la cuenca de montaña donde se intentará generar un glaciar.
- b) Definir las subcuencas (o cajones cordilleranos) donde se harán los estudios de identificación y características de avalanchas.
- c) En las subcuencas seleccionadas, recopilar antecedentes de nieve y realizar los estudios de avalanchas e identificar todos los glaciares presentes.



- d) Tras lo anterior, seleccionar las dos alternativas más favorables de sitio de generación de glaciar.
- e) Durante el verano próximo (el primer verano efectivo), en cada uno de los dos sitios seleccionados instalar el equipamiento e instrumental adecuado para evaluar en detalle el manto de nieve; con estación nivo-meteorológica automática, una o dos rutas de nieve en el valle, y aproximadamente media docena de postes en laderas para observar desde helicóptero espesores de nieve durante el invierno.
- f) Durante el invierno siguiente, hacer controles mensuales, o bi-mensuales, de la ruta de nieve y altura de nieve en postes, y recuperar datos de la estación nivo-meteorológica. Esto con el apoyo de helicóptero. En la ruta de nieve medir densidad de nieve con muestreador Monte-Rosa y en pozos.
- g) Al fin del invierno, y con la información de nieve recopilada, revisar el estudio de avalanchas, seleccionar el área más favorable (de entre las dos analizadas) y hacer un diseño de las obras preliminares de encauzamiento de avalanchas y de alimentación de nieve.
- h) Durante el verano a continuación (el segundo verano efectivo), construir un camino de acceso al área en la que se ejecutarán obras, construir las zanja-muros (preliminares) según los diseños, y construir eventuales vallas. Eventualmente, reparar las rutas de nieve, postes y estación nivo-meteorológica. Hacer un control topográfico del valle en el sitio de obras. Eventualmente instalar sensores de carga de nieve en los esperados sitios de acumulación.
- i) Durante el invierno siguiente, y con apoyo de helicóptero, repetir los controles invernales de nieve. Al término del invierno, revisar los diseños preliminares de las obras y ejecutar los diseños definitivos.
- j) Durante el verano siguiente (el tercer verano efectivo), hacer las reparaciones necesarias y construir (o ampliar las obras preliminares) las obras a sus diseños definitivos. Hacer un estudio de biodiversidad en el valle. Instalar una estación limnigráfica cercana al área de generación de un nuevo glaciar.
- k) Invierno y veranos siguientes, mantener los controles invernales de nieve, y revisar, mejorar o ampliar las obras de alimentación de nieve y encauzamiento de avalanchas. A su vez, realizar un estudio detallado del glaciar en generación en todos sus aspectos,

balance de masa (incluido de hielo, calórico y de agua), deformación, temperatura del núcleo de hielo, etc.

- l) Con la tecnología desarrollada, intentar la generación de un nuevo glaciar en otras cuencas.

### **3.2.2 Estudios y trabajos del primer año.**

#### **3.2.2.1 Definir la cuenca, subcuenca y cajones cordilleranos.**

Definir la cuenca en que se iniciaran los estudios de generación de glaciar es, esencialmente, una decisión de política y aspectos sociales. En todo caso, no parece conveniente iniciar estos estudios en una cuenca árida, donde las nevadas invernales, y las acumulaciones de nieve, no ocurren con cierta habitualidad anual.

Idealmente, los cajones cordilleranos deben estar alejados de desarrollos antrópicos que enmascaren los parámetros de nieve y clima que controlarán la generación del nuevo glaciar.

Desde luego, los cajones montañosos seleccionados deben tener la suficiente cota, y el adecuado relieve, como para permitir acumulaciones importantes de nieve, y para minimizar las tasas de fusión del manto de nieve en las estaciones veraniegas.

Aspectos favorables en la selección de los cajones cordilleranos donde realizar los primeros estudios (de nieve y avalanchas) para la generación de un glaciar son:

- a) Accesibilidad, en lo posible con caminos existentes, o de relativamente simple construcción.
- b) Cercanía a una estación nivo-meteorológica existente y rutas de nieve.
- c) Existencia de antecedentes generales como: fotografías áreas o imágenes satelitales de alta resolución, planos topográficos de detalles, antecedentes de nieve y/o avalanchas
- d) Existencia en el sector de depósitos sedimentarios no consolidados, con los cuales poder construir, eventualmente, obras de desvío de avalanchas como zanjas y muros.



- e) Factibilidad de acceso a altas cumbres para construir obras de alimentación forzada de nieve (como vallas y otras).

### **3.2.2.2 Recopilación de antecedentes, planos y fotos aéreas, y sobrevuelo del área.**

El estudio de generación de un glaciar se iniciará con la recopilación de la información existente relativa a glaciares, nieve, avalanchas, clima y topografía en el área, incluyendo la adquisición de planos topográficos, fotografías aéreas, imágenes satelitales y DEMs de alta resolución que cubran las áreas definidas para los estudios.

Un primer conjunto de datos útiles para un plan de generación de glaciares proviene de los estudios de glaciares realizados en las montañas de la cordillera, tanto en Chile como en países limítrofes. Estos estudios incluyen, entre otros,

- ❖ Velocidades de deformación, y esfuerzos
- ❖ Balances combinados de hielo, calor y agua,
- ❖ Registros meteorológicos en la superficie de nieve, con instalación de estaciones meteorológicas automáticas,
- ❖ Controles de temperatura y su gradiente en las masas glaciares y en las cubiertas de detritos de glaciares de roca,
- ❖ Controles de tasas de fusión en campos de penitentes,
- ❖ Exploraciones de los glaciares en profundidad, mediante sondajes, y
- ❖ Registros de las variaciones glaciales.

Un segundo conjunto de datos proviene de los diversos estudios de avalanchas que se han desarrollado en la cordillera del centro de Chile para implementar medidas de seguridad y protección a carreteras e instalaciones.

Tan pronto existan condiciones de nieve invernal generada en tormentas significativas, se debe realizar un sobrevuelo en helicóptero de los cajones cordilleranos considerados apropiados para el estudio de generación de un nuevo glaciar. Esto, para evaluar desde el aire eventuales sendas de avalanchas activadas por las nevadas.

### **3.2.2.3 Estudio de avalanchas en cajones cordilleranos seleccionados e identificación de glaciares.**

#### **3.2.2.3.1 Los estudios.**

Debe realizarse un estudio de sendas de avalanchas en los cajones cordilleranos considerados para la generación de un glaciar. Con los resultados del estudio de avalanchas se deben seleccionar las dos áreas con mejores posibilidades de desarrollar el plan de generar un nuevo glaciar. Un estudio de avalanchas debe comprender:

- a) Evaluación del manto de nieve (profundidad, distribución, densificación, etc.) en el área, en tormentas de 72 horas, en particular en las zonas de inicio de avalanchas. Considerar los mayores o menores espesores en las zonas de inicio de las avalanchas debido a la redistribución de la nieve por el viento.
- b) Análisis de recurrencias de avalanchas, en períodos de 2 y 10 años.
- c) Identificación de sendas de avalanchas y de depósitos de detritos de avalanchas. En planos topográficos trazar los ejes principales de caída de las avalanchas y confeccionar perfiles verticales. Evaluar los coeficientes de fricción a utilizar en los modelos de simulación de avalanchas
- d) Con un programa computacional (como “Avalanch” de Geoestudios), calcular las distancias de corrida, alturas de flujo, presiones de impacto, distancia de frenado, y espesores medios de los depósitos de nieve en las Zona de Depositación de las avalanchas en los ejes previamente trazados, empleando para los cálculos las características del manto de nieve en recurrencias de 2 y 10 años. El programa Avalanch lleva más de dos décadas de empleo y experimentación, y sus resultados han sido exitosamente contrastados con avalanchas reales y con resultados de programas empleados en otros países.
- e) Indicar en un plano topográfico de escala adecuada (1:10.000 o mejor) los ejes de las avalanchas y las distancias de corrida.

Durante el invierno, y tras una tormenta de nieve, sobrevolar en helicóptero las áreas analizadas por avalanchas, para observar las condiciones de nieve y las avalanchas ocurridas. De manera general, constatar que avalanchas corrieron y si alcanzaron las distancias previstas con el

programa de simulación según los espesores de nieve acumulados en la tormenta; de ser posible, identificar depósitos de avalanchas.

Simultáneamente con todo lo anterior, empleando las fotografías aéreas entregadas y/o imágenes satelitales, identificar los glaciares presentes en los valles analizados para generación de glaciar, y trazar los límites de estos glaciares en un plano en que se puedan superponer los ejes de las avalanchas.

### **3.2.2.3.2** Criterios de cálculo de avalanchas.

Los criterios de cálculo de avalanchas más ampliamente utilizados son aquellos de las recomendaciones Suizas. Existen métodos diferentes a aquel de las recomendaciones suizas, para estimar la distancia de corrida de las avalanchas. Por ejemplo el del Modelo del Terreno, o Modelo  $\beta/\alpha$ , o el modelo de Razón de Distancia de Corrida. Estos modelos se basan en una estadística observada de distancias de corrida de las avalanchas y en otros parámetros observados. Como esta estadística normalmente no existe en Chile, consideramos que sus aplicaciones pueden contener un grado de incertidumbre mucho mayor que aquel que se puede originar al aplicar las Recomendaciones Suizas. Otro método, como aquel del Model M/R, es similar a aquel de las Recomendaciones Suizas en cuanto requieren estimar los coeficientes de fricción de las avalanchas. En todo caso, la principal razón de aplicar las recomendaciones Suizas es porque, en la práctica, en Chile se han aplicado ellas exclusivamente, y porque respecto a ellas existe una adecuada experiencia en el país.

Los criterios básicos en que se sustenta un programa de simulación de avalanchas, como el AVALANCH de Geostudios Ltda. para el cálculo de las características de las avalanchas, se resumen a continuación.

#### **Velocidad de la avalancha.**

En un tramo de pendiente homogénea, la velocidad (V) de una avalancha de flujo mixto es:

$$V^2 = A \times B \quad \text{y en que}$$

$A = \text{Coefic. fricción turbulenta} \times \text{Altura de flujo} \times (1 - \text{Densidad aire}) / \text{Densidad del flujo de nieve}$

$B = \text{Sen(pendiente tramo)} - [\text{Coefic. fricción kinética} \times \text{Cos(pendiente tramo)}]$

Para una avalancha de nieve polvo en suspensión la velocidad máxima (V) en el primer tramo de la senda es:

$$V^2 = 2 \times \text{Aceleración de gravedad} \times (1,5 \times \text{Altura manto de nieve} \times \text{Densidad manto de nieve}) / \text{Densidad del aire}$$

y en los tramos siguientes (tramos N), la velocidad de una avalancha de nieve polvo es:

$$V_N = V_{N-1} \times [\text{Sen(Pendiente tramo N)} / \text{Sen(Pendiente tramo N-1)}]^{1/3}$$

#### **Altura de flujo de la avalancha.**

En avalanchas de flujo mixto la altura de flujo (h) en un tramo N se calcula como:

$$h = h_{N-1} + [0,5 \times \text{Velocidad}^2 / (4 \times \text{Aceleración de gravedad})] / 2$$

En avalanchas de nieve polvo la altura de flujo (h) se calcula como:

$$h = (\text{Densidad aire} / \text{Densidad flujo de nieve}) \times (\text{Altura manto de nieve} + \text{Altura nieve en senda})$$

Como la altura de la nieve fresca en la senda suele ser similar a la altura inicial del manto de nieve, pero por lo general no toda ella es levantada por la avalancha, se prefiere usar el término (Altura manto de nieve x 1,5), lo cual normalmente y en otros casos, produce alturas de flujo más acorde con lo observado.

#### **Densidad del flujo de la avalancha.**

Para el caso de avalanchas de flujo mixto, la densidad comúnmente empleada es 0,25 veces la densidad de la nieve depositada por la avalancha, lo cual suele ser un parámetro del archivo de datos de ingreso.



En el caso de avalanchas de nieve polvo, la densidad (D) del flujo de nieve se calcula como:

$$D = \text{Densidad aire} \times \text{Coefic. fricción turbulenta} / (2 \times \text{Aceleración gravedad})$$

#### **Distancia de corrida.**

La distancia de corrida (S) de las avalanchas se calcula como:

$$S = A \times B$$

en que

$$A = \text{Coefici. fricción turbulenta} \times \text{Altura de flujo} / [2 \times \text{Aceleración gravedad}]$$

$$B = \ln (1 + \text{Velocidad}^2 / \{ \text{Coefici. Fricción turbulenta} \times \text{Altura flujo} \times [ \text{Coefici. Fricción kinética} \times \text{Cos(pendiente tramo)} - \text{Sen(pendiente tramo)} ] \})$$

La velocidad, y la altura de flujo en A y en B son aquellas del tramo anterior a aquel en que la avalancha se detiene.

#### **Espesor máximo del depósito de nieve de avalanchas.**

El espesor (H) máximo del depósito de nieve conformado por una avalancha al detenerse en un tramo (o terreno) abierto se calcula como:

$$H = 0,7 \times [\text{Altura flujo tramo anterior} + \text{Velocidad}^2 / (2 \times \text{Aceleración gravedad})]$$

La velocidad es la media del tramo en que se detiene y la altura de flujo es aquella al final del tramo anterior al tramo en que se detiene.

### **Otros criterios.**

El programa de computación que simula las características de las avalanchas emplea diversos otros criterios de cálculo, entre los cuales cabe destacar:

- Distancias necesarias para alcanzar las máximas velocidades y alturas de flujo en un cierto tramo (las que pueden ser mayores o menores a aquellas del tramo anterior), empleando en ello coeficientes de restitución y ajustando los valores según la real longitud del tramo y los cambios de pendiente.
- Incrementos o reducciones de la amplitud de la avalancha según el tramo particular de la senda sea abierto, restringido o confinado.
- Modificaciones de las ecuaciones de cálculo para tramos con pendientes negativas (hacia arriba).
- Una comprobación tramo a tramo de la eventual detención y distancia de corrida de la avalancha.

#### **3.2.2.4 Selección de dos alternativas de sitio para generar glaciares.**

Finalmente, y tras el análisis de la información recopilada y del estudio de avalanchas, realizar la selección de dos sectores para las pruebas de generación de pequeños glaciares, dentro de los cajones cordilleranos evaluados. Con el estudio de avalanchas, se debe seleccionar dos alternativas de sitios con las mejores condiciones para generar glaciares (a partir de las cuales se elegirá una al término del estudio del segundo año). Los criterios básicos de las mejores condiciones pueden ser:

- ❖ Posibilidad de acumular nieve de sendas de avalanchas contiguas (empleando el plano de distancias de corrida de sendas de avalanchas).
- ❖ Proximidad a una estación nivo-meteorológica, o ruta de nieve de prolongada estadística.
- ❖ Condiciones topográficas adecuadas, tales como: cota del terreno, aspecto al Sur, pendiente del terreno favorable para la generación de avalanchas.



- ❖ Condiciones climáticas apropiadas, tales como protección del viento, protección de la radiación solar, favorecimiento de acumulaciones de nieve en zonas de inicio y de depositación de avalanchas, persistencia natural de la nieve en la temporada veraniega.
- ❖ Evaluar la posibilidad de desviar las trayectorias de avalanchas hacia zonas de depositación, y acumulación común, con elementos tales como muros de tierra o zanjas para el desvío y para la contención de la nieve de avalanchas.
- ❖ Disponibilidad de material detrítico para obras como muro de desvío o contención de avalanchas.
- ❖ Posibilidad de alimentación artificial de nieve empleando vallas u otros elementos.
- ❖ Acceso fácil al área, con camino existente o de simple construcción.
- ❖ Posibilidad de instalar campamento en áreas cercanas libres del peligro de avalanchas.

### **3.2.3 Estudios y trabajos del segundo año.**

#### **3.2.3.1 Instalación de estaciones meteorológicas, de rutas de nieve y postes de alturas de nieve.**

Con el propósito de controlar la acumulación de nieve invernal y las condiciones meteorológicas en los dos sitios alternativos en que se ensayará la generación de un nuevo glaciar, en cada uno de estos dos sitios se instalará una estación meteorológica automática y dos rutas de nieve de cinco postes cada una. Estas instalaciones se harán cuando las condiciones de nieve se encuentren en su mínimo, iniciando los trabajos a mediados de Enero (con la recepción y calibración de las estaciones meteorológicas), y concluyendo a fin de Marzo la instalación y pruebas en terreno de las estaciones, rutas de nieve y postes en laderas. Para ello, las actividades son:

- ❖ Adquisición de instrumentos de importación (2 estaciones nivo-meteorológicas automáticas) y su re-calibración en Chile previo a la instalación en terreno.
- ❖ De no existir planos topográficos adecuados, en ambos sectores se realizarán planos topográficos de escala 1:5.000; empleando fotos aéreas existentes y puntos de control del IGM.

- ❖ Instalar durante el verano las dos estaciones meteorológicas automáticas en sitios libres del peligro de avalanchas, una en cada una de los dos cajones cordilleranos en que se seleccionaron los dos sitios para las pruebas de generación de un glaciar. Las estaciones incluirán colchones de nieve y mediciones de altura de nieve, y un “logger” para toda la información invernal (independientemente de la posibilidad de recuperar datos ocasionalmente, en visitas al terreno en ski o helicóptero). Control de todos los parámetros durante el primer año. Se requiere apoyo de helicóptero para transporte de equipo y personas, simultáneamente con las labores del punto siguiente.
- ❖ Instalar durante el verano cuatro rutas de nieve (cada una con cinco postes para medir altura de nieve, y sus anclajes de cables), dos en cada una de los dos cajones cordilleranos de sitios de prueba de glaciar. Cada poste de altura de nieve será de madera tratada o acero, de altura adecuada a las esperadas precipitaciones nivales, anclado con vientos de acero inoxidable, y con marcas métricas en ellos fácilmente visibles para evaluar el espesor del depósito de nieve en el entorno de cada poste incluso desde helicóptero. Si no existe camino de acceso a las áreas, para este trabajo se requiere apoyo de helicóptero para transporte de personas y materiales, en cada una de las rutas.
- ❖ Además de las rutas de nieve, instalar 6 postes similares, en las laderas y cotas altas, para ser evaluados transitando durante el invierno en helicóptero
- ❖ Revisar el funcionamiento y calibración de las estaciones meteorológicas, previo a su operación invernal no-asistida.

### **3.2.3.2 Planos geotécnicos.**

En cada sitio de generación de glaciar realizar e el verano una breve evaluación de las características geotécnicas del terreno, para apreciar la disponibilidad de material detrítico no consolidado con los cuales realizar la eventual construcción de zanja-muros para desvíos de avalanchas.

### **3.2.3.3 Control de las rutas de nieve y postes en laderas, y observaciones de avalanchas, durante la temporada de nieve invernal.**

Durante la temporada de nieve se deben controlar mensual o quincenalmente las rutas de nieve y postes. Además, tras las tormentas de nieve, realizar vuelos en helicóptero para evaluar las sendas de avalanchas. Para ello se hará lo siguiente:

- ❖ Durante el invierno y con el apoyo de helicóptero, controlar las rutas de nieve en cuanto a espesor y densidad de la nieve, al menos una vez al mes y mientras persista la nieve (probablemente mayo a Noviembre o Diciembre), empleando en las mediciones sondas para determinar el espesor de nieve y equipo Monte Rosa para mediciones de densidad del manto de nieve. Eventualmente, apoyar estas observaciones con uno o dos pozos de nieve en cada sitio.
- ❖ Durante el invierno, acceso ocasional (al menos en dos ocasiones) con el auxilio de helicóptero, a las dos áreas de control de nieve, para observaciones de ocurrencias de avalanchas (estimadas en vuelo según las características de los depósitos de nieve). Eso debe hacerse inmediatamente después de las tormentas de nieve y cuando ya el área está libre del peligro de avalanchas.

### **3.2.3.4 Informe final de la actividad anual, con prediseño de obras de manejo de avalanchas.**

Al término de la temporada invernal, en el mes de Diciembre, entregar un informe con los resultados de los trabajos e investigaciones, y recomendaciones para los trabajos futuros, en particular con un diseño preliminar de obras para encauzar avalanchas y de eventuales manejo de nieve (vallas o similares). Esto último debe ir acompañado de estimación de costos y carta Gantt de trabajos a realizar, y una recomendación respecto a cual de los dos sitios estudiados es el más favorable para la generación de glaciar.



### **3.2.4 Estudios y trabajos del tercer año.**

En aquella de las dos áreas no preferida, debe revisarse la estación meteorológica, rutas de nieve y postes, de manera de mantener en ella las observaciones de nieve durante el próximo invierno.

Los estudios y trabajos a desarrollar el tercer año en el área preferida para la generación de un glaciar deben comprender a lo menos lo siguiente:

- ❖ Habilitar y/o completar y/o mantener la construcción de un camino de acceso.
- ❖ Mantener la estación nivo-meteorológica, las rutas de nieve y postes de nieve en laderas.
- ❖ Elaborar un plano topográfico del área de escala 1:2.000.
- ❖ Instalar estación limnigráfica.
- ❖ Decidir y construir o instalar medidas a escala reducida (preliminares) que contribuyan a la mayor acumulación de nieve, tales como:
  - Cambios en la topografía (con bulldozers, retroexcavadora, camión tolva), acumulaciones de detritos, etc.), para construir zanja- muros de detritos para desviar avalanchas, cuencas, etc.,
  - Instalación de vallas para mejorar la acumulación de nieve,
  - Instalación de sistemas de control de viento en las altas cumbres, para propiciar acumulaciones de nieve.
  - Eventualmente, probar sistemas de inicio artificial de avalanchas de nieve.
  - Probar sistemas de control artificial de ablación del manto de nieve,
  - Otras medidas.
- ❖ Decidir sobre las medidas a adoptar en un pequeño sitio piloto de acumulación de nieve, decidir la ubicación de este sitio, e instalar esas medidas y realizar eventuales movimientos de tierra necesarios.
- ❖ Instalar instrumentos en el piso del pequeño sitio de prueba de acumulación de nieve. Para registros de profundidad de nieve, densidad de nieve, eventualmente reptación y carga.
- ❖ Realizar un estudio de biodiversidad en el sitio de generación de un nuevo glaciar y en su entorno.



- ❖ Durante el invierno siguiente, realizar los controles de nieve y avalanchas, con el apoyo de helicóptero.
- ❖ En particular, durante el verano siguiente, evaluar la efectividad de las medidas preliminares de acumulación de nieve (con mediciones de extensión, espesor y densidad de la eventual nieve remanente). De ser la evaluación positiva, proponer la ampliación de las obras de encauzamiento de avalanchas y de alimentación artificial de nieve, a diseños definitivos. De ser los resultados pobres, decidir entre mejorar lo realizado en el sitio, o cambiar al sitio que fue seleccionado como segunda alternativa.

### **3.2.5 Años subsiguientes.**

En años subsiguientes, a partir del cuarto en adelante:

- ❖ Monitorear el pequeño glaciar generado, durante a lo menos tres años. Este monitoreo debe incluir balances de masa (balance de hielo+balance calórico+balance de agua), movimientos en superficie y esfuerzos en superficie. Deben agregarse sensores de temperatura en profundidad, en la potencial zona de ablación del futuro glaciar.
- ❖ Mantener estación nivo-meteorológica, rutas de nieve, postes de nieve en ladera, y estación limnigráfica.
- ❖ Instalar un campamento y observatorio nivo-glaciológico, vecino al área de estudio, en sitio libre del peligro de avalanchas.
- ❖ Realizar en términos bianuales controles de biodiversidad.
- ❖ Después de lo anterior, o antes si los resultados son satisfactorios, revisar todo el programa de generación de glaciar, introducirles los cambios que parezcan necesarios, e iniciar programas para generar glaciares adicionales en otros sitios de la cordillera.

Fin texto de informe.

Por Geoestudios Ltda.

Cedomir Marangunic D.

10 Diciembre 2008