

CARTA: PL 092/2015

ANT.: Res. Ex. N° 1/Rol N° D-011-2015, de 22 de abril de 2015.

REF.: Expediente Sancionatorio N° D-011-2015.

MAT.: 1) Solicita rectificación de referencias contenidas en escrito de descargos presentado con fecha 26 de mayo de 2015, en lo que indica, 2) Acompaña documento.

Santiago, 29 de mayo de 2015

Srta.

Camila Martínez E.

Fiscal Instructora

División Sanción y Cumplimiento

Superintendencia del Medio Ambiente

Presente.

Por medio de la presente, **GONZALO MONTES ASTABURUAGA**, en representación de **COMPAÑÍA MINERA NEVADA SpA.** (en adelante e indistintamente, "CMN" o la "Compañía"), Titular del Proyecto Pascua Lama (en adelante, "El Proyecto"), ambos domiciliados para estos efectos en Avenida Ricardo Lyon N°222 piso 8, comuna de Providencia, en proceso de sanción D-011-2015, vengo a solicitar a Ud. tener presente las rectificaciones en lo que indica, de referencias contenidas en el escrito de descargos presentado el 26 de mayo del presente ante esta Superintendencia, relativos a las infracciones imputadas en el resuelvo I N° 4, 5 y 7 de la Res. Ex. N° 1/Rol N° D-011-2015 de fecha 22 de abril de 2015 (en adelante e indistintamente "Formulación de Cargos" o "Resolución N°1") de la Superintendencia del Medio Ambiente (en adelante, "SMA" o la "Superintendencia").

En atención a que los descargos presentan errores de referencia y de orden correlativo de las tablas y figuras, a continuación se indican dichos errores y la forma en que éstos se deben entender rectificadas:

1. En el apartado 1.2.3. denominado "El área de vegas intervenidas por sobre al autorizado es mínima y nuestra compañía se ha ajustado a su RCA", se solicita considerar las siguientes rectificaciones:
 - Cada vez que se hace referencia a la RES.EX.No.17-ROL D-011-2015 SMA, se debe entender que esta corresponde a la RES.EX.No.1-ROL D-011-2015 SMA.
 - Por un error de edición se replicó la figura N° 5 en la figura N° 7, por lo que se solicita no considerar el contenido de la página 20, tanto la figura como el párrafo que hace alusión a ella.
 - En la página 21, la figura denominada "Ilustración 8 Diferencia entre cruce de la información de las coberturas", para efectos de mantener la correlación, corresponde a la figura o ilustración N° 7.
 - En la página 22, la figura denominada "Ilustración 9 Intervención Campamento Barriales a 2006 de acuerdo con la Figura 9.3 Adenda 3, 2006" para efectos de mantener la correlación, corresponde a la figura o ilustración N° 8.
 - En la página 22, donde dice: "El cruce de la información de las Figuras 4 y 5 permite identificar un área real intervenida de 0.12 ha entre 2006 y 2014 (ver figura 6)", debe decir: "El cruce de la

- ii) Golder, 2009: "Informe de Monitoreo de Temperatura de Glaciares y Glaciaretos en el área de Pascua Lama".

Se adjuntan en versión papel y digital.

Sin otro particular, le saluda atentamente,



Gonzalo Montes Astaburuaga
pp. Compañía Minera Nevada SpA.



MEMORANDUM

PARA: Rodolfo Westhoff
Pascua Lama, Barrick

DE: Carlos Espinoza y Rodrigo Zamorano
HIDROMAS Ltda.

MATERIA: Situación Hídrica Tercera Región

FECHA: 21 de Noviembre, 2014

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento se orienta al análisis de la información de precipitación, acumulación de nieve y variación de volumen acumulado en el embalse Santa Juana, con el propósito de conocer la situación hidrológica de la zona próxima a Pascua-Lama.

A nivel regional se utiliza información oficial proveniente de documentos de la Dirección General de Aguas emitidos entre los años 2009 y 2014. A nivel local se efectúa el análisis mediante el estudio de información de precipitación nival de la estación Barriales, ubicada en el campamento Pascua-Lama.

2. ANÁLISIS INFORMACIÓN REGIONAL

2.1. Aspectos Generales

La Dirección General de Aguas (DGA) elabora anualmente un pronóstico de la disponibilidad de agua para riego, enfocándose en volúmenes de deshielo, precipitaciones y caudales medios mensuales. Este análisis se realiza en las principales cuencas del Norte Chico, zona central y sur, abarcando desde la cuenca del Río Copiapó hasta la cuenca del Río Ñuble.

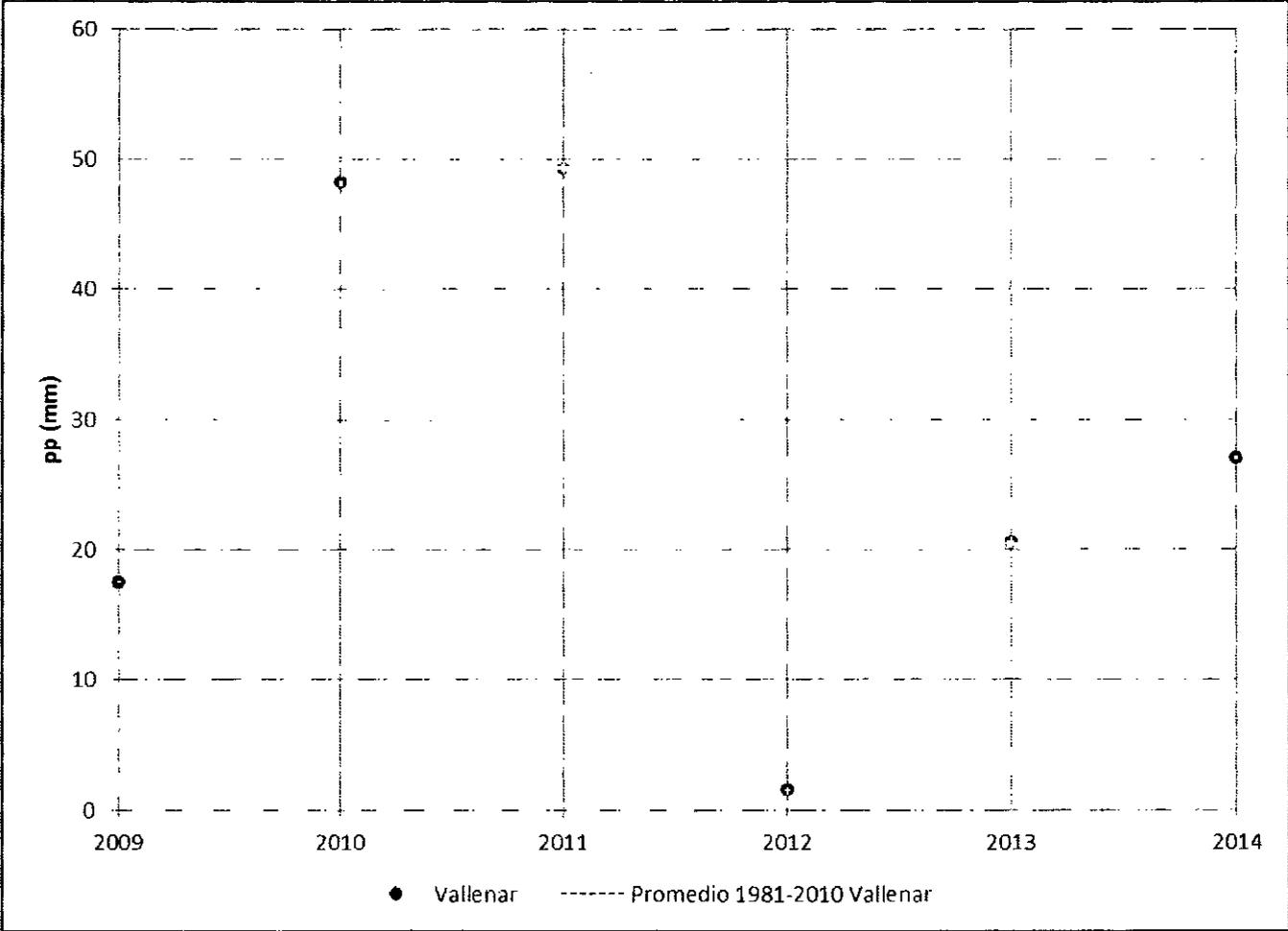
En el presente acápite se presentan los resultados para las precipitaciones, cantidad de nieve acumulada y niveles de embalse, en la zona cercana al proyecto Pascua-Lama.

2.2. Precipitaciones de la temporada invernal

Las estaciones pluviométricas cercanas a la zona de interés son Vallenar y Conay, el estudio de pronóstico de disponibilidad de agua realizado por DGA comprende hasta el 31 de agosto del año correspondiente, denominada temporada invernal. En las Figuras 2.1 y 2.2 se presentan las precipitaciones medias de la temporada mencionada como también el promedio histórico desde el año 1981 al 2010, de las estaciones Vallenar y Conay respectivamente.



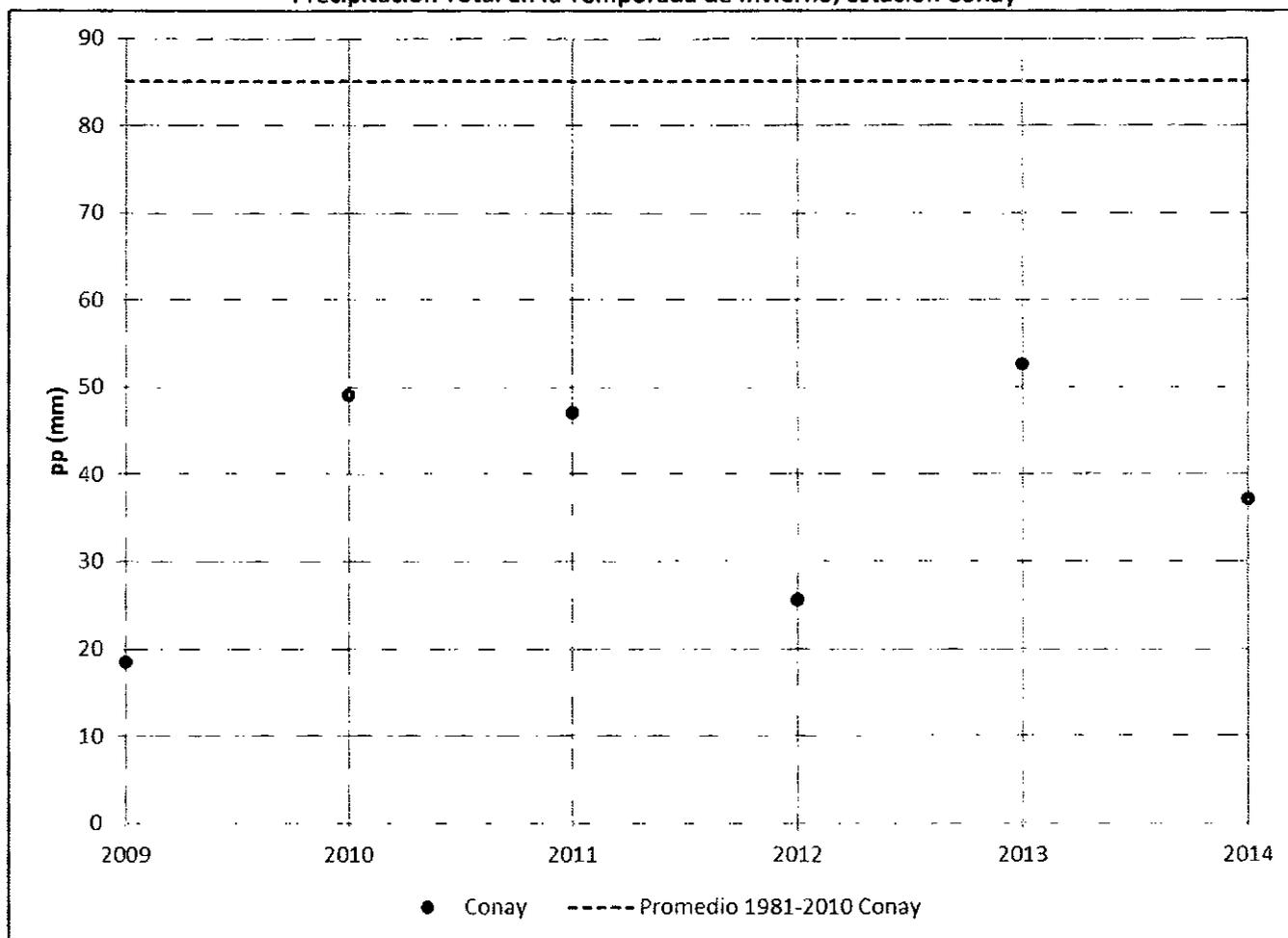
Figura 2.1
Precipitación Total en la Temporada de Invierno, estación Vallenar



Fuente: Elaboración propia a partir de pronósticos de la DGA.



Figura 2.2
Precipitación Total en la Temporada de Invierno, estación Conay



Fuente: Elaboración propia a partir de pronósticos de la DGA.



Como se puede observar en las Figuras 2.1 y 2.2, en los últimos años, a partir del 2012 se tienen precipitaciones por debajo del promedio histórico en ambas estaciones. Para la estación Conay (Figura 2.2), desde el 2009 se observan valores bajo el promedio, presentando un déficit medio de un 55%.

2.3. Acumulación de Nieve en Región de Coquimbo

Se analizó la acumulación de nieve en la temporada para la ruta de nieve Cerro Olivares, contenida en la cuenca del Elqui, Región de Coquimbo. En la Figura 2.3 se presenta la acumulación máxima por temporada, como también la máxima histórica registrada.

Se observa en la Figura 2.3 que la nieve acumulada está muy por debajo de los máximos históricos, inclusive en el año 2010 no se presenta precipitación en forma de nieve. Asimismo en el año 2014 el déficit en referencia con el máximo histórico es de un 93% siendo el mayor de los últimos años.

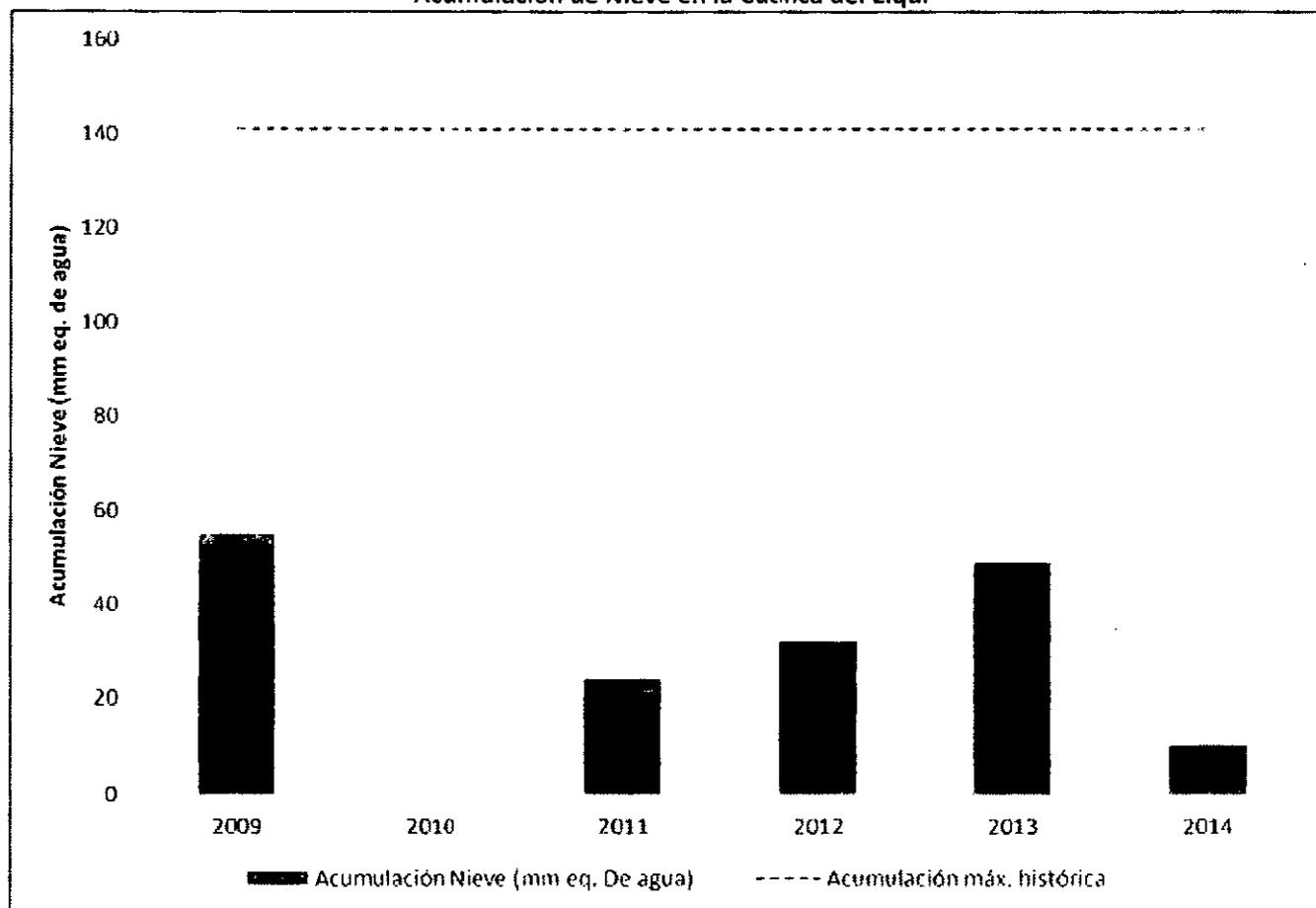
2.4. Volumen Almacenado en Embalse Santa Juana

Debido a la proximidad con la zona de estudio, se realiza el análisis al embalse de riego, de regulación interanual, Santa Juana. La información con la que se cuenta tiene relación con el volumen de agua almacenada al 31 de agosto del año respectivo.

En la Figura 2.4 se presenta el gráfico de volumen embalsado en el embalse Santa Juana, se observa que en los últimos 6 años ha tenido una disminución sostenida, llegando a sus mínimos estadísticos.



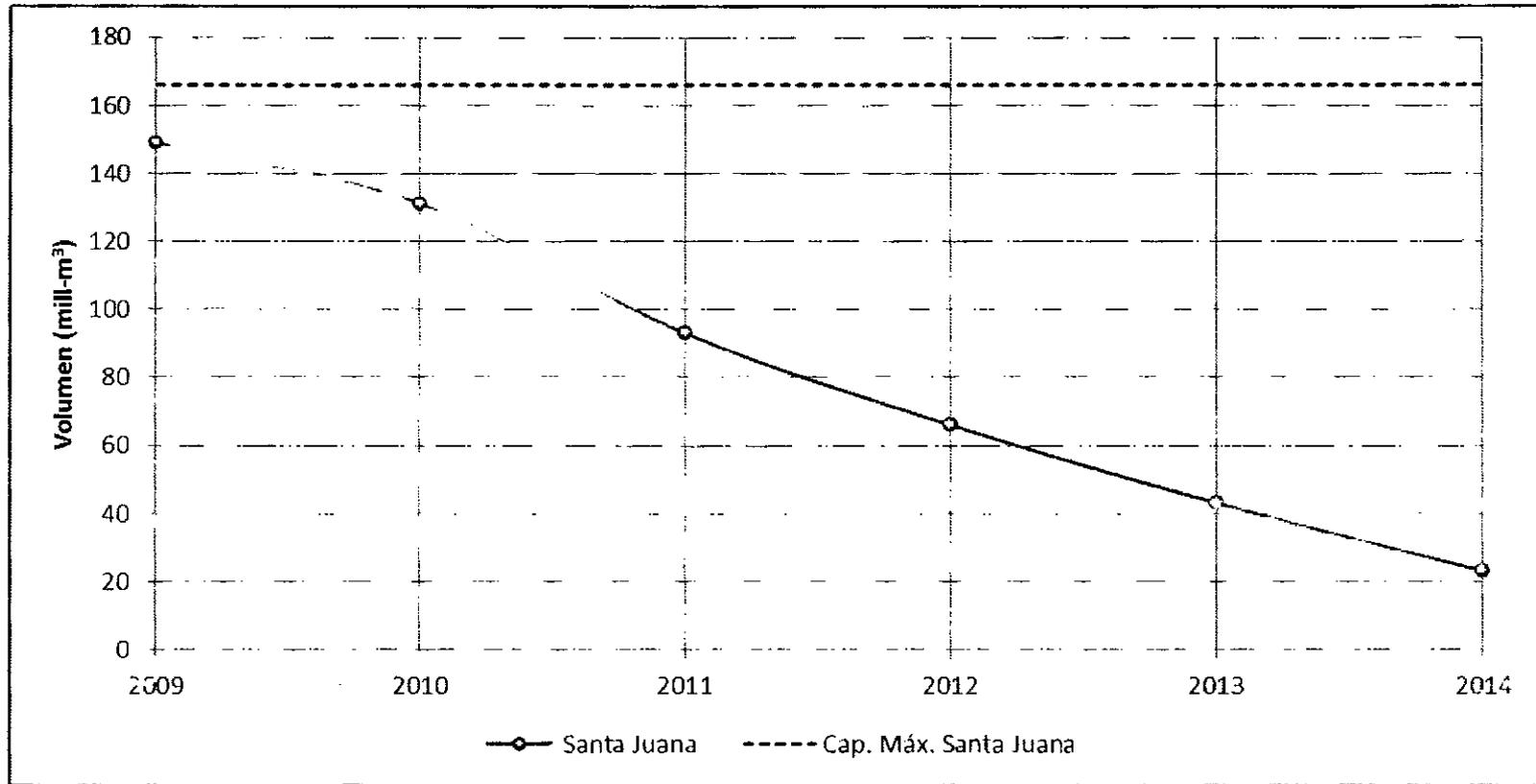
Figura 2.3
Acumulación de Nieve en la Cuenca del Elqui



Fuente: Elaboración propia a partir de pronósticos de la DGA.



Figura 2.4
Volumen Almacenado en el Embalse Santa Juana



Fuente: Elaboración propia a partir de pronósticos de la DGA.



3. ANÁLISIS INFORMACIÓN LOCAL

Para analizar la condición hidrológica en la zona específica del proyecto, se utilizó la estadística de precipitación nival en la estación Barriales, ubicada en el campamento Pascua-Lama.

En la Figura 3.1 se presenta la precipitación nival desde el año 2001, en donde se puede observar que en los últimos 6 años se tiene un comportamiento relativamente seco, por debajo del promedio histórico de la estación.

Este comportamiento es comparable al que se observa en la Figura 2.3 en un contexto regional, siendo la tendencia que se presenten precipitaciones por debajo de los promedios históricos en los últimos años.

4. CONCLUSIONES

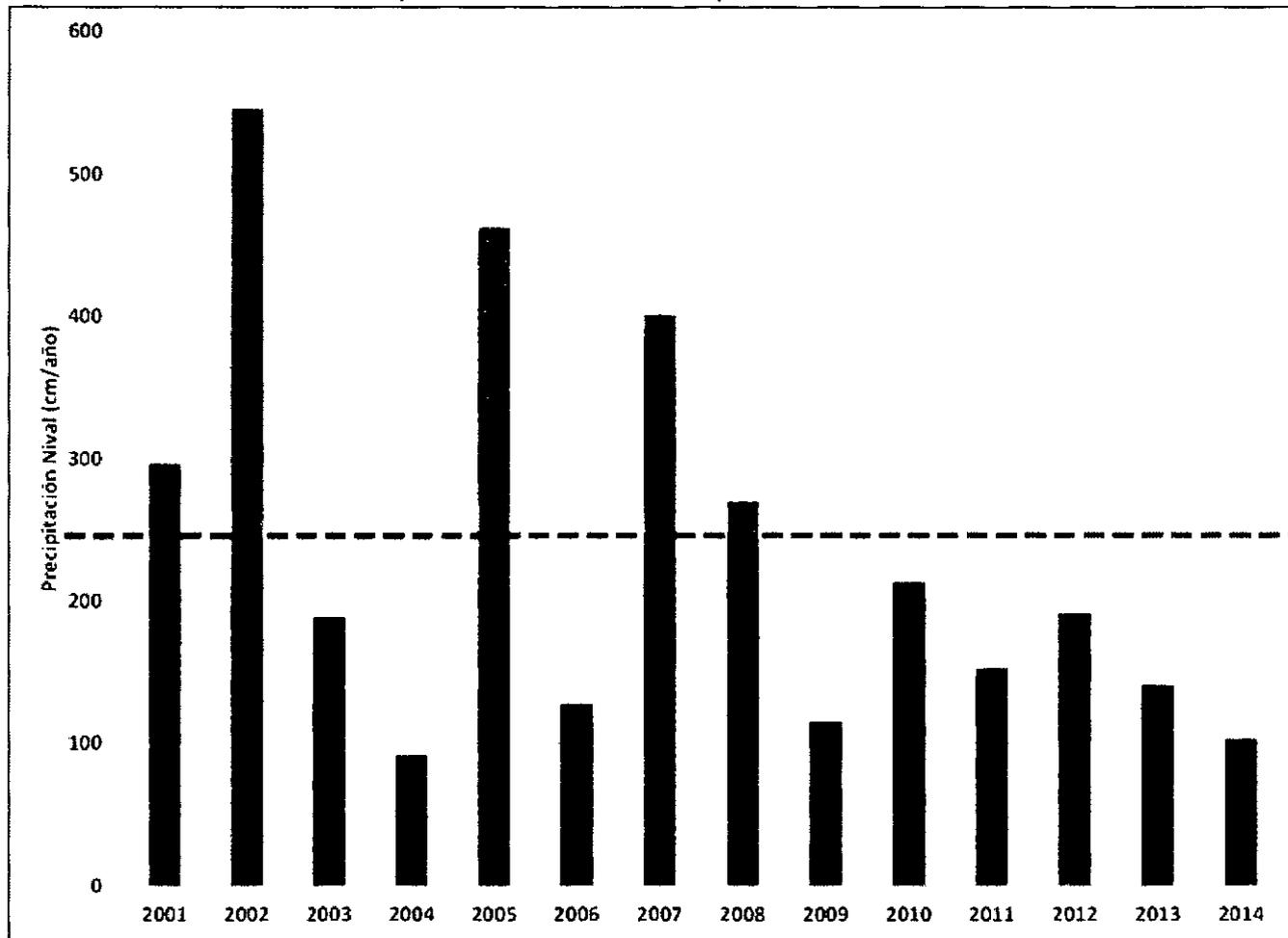
Como resumen de los antecedentes anteriores se observa que el sistema hídrico en que se emplaza el proyecto Pascua Lama ha presentado una condición sostenida de menores aportes hídricos (precipitaciones) lo que se observa en diferentes indicadores regionales medidos independientemente por la Dirección general de Aguas, así como por datos locales generados en el área del campamento de Pascua Lama.

5. REFERENCIAS

- Dirección General de Aguas. Pronóstico de Disponibilidad de Agua. Temporada de Riego 2014-2015. 2014.
- Dirección General de Aguas. Pronóstico de Disponibilidad de Agua. Temporada de Riego 2013-2014. 2013.
- Dirección General de Aguas. Pronóstico de Disponibilidad de Agua. Temporada de Riego 2012-2013. 2012.
- Dirección General de Aguas. Pronóstico de Disponibilidad de Agua. Temporada de Riego 2011-2012. 2011.
- Dirección General de Aguas. Pronóstico de Disponibilidad de Agua. Temporada de Riego 2010-2011. 2010.
- Dirección General de Aguas. Pronóstico de Disponibilidad de Agua. Temporada de Riego 2009-2010. 2009.



Figura 3.1
Precipitación Nival Anual en Campamento Pascua Lama



Fuente: Elaboración propia.



28 de agosto de 2009

PROYECTO PASCUA-LAMA

INFORME DE MONITOREO DE TEMPERATURA DE GLACIARES Y GLACIARETES EN EL ÁREA DE PASCUA-LAMA

Preparado para:

Compañía Minera Nevada Ltda.
Vitacura #2670, piso 8°, Edif. CCU
Vitacura, Santiago

INFORME



**A world of
capabilities
delivered locally**

Número de Informe: 079 215 5019-2.1-IT 002

Distribución:

Compañía Minera Nevada Ltda.
Golder Associates S. A.





ÍNDICE

1.0	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Generalidades.....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Clasificación de los Glaciares Según su Temperatura.....	4
2.0	MONITOREO DE TEMPERATURA DE GLACIARES Y GLACIARETES PASCUA-LAMA	5
2.1	Descripción General de los Glaciares y Glaciaretos.....	6
2.2	Equipos de Monitoreo.....	6
2.3	Calibración y Ajuste de Equipos.....	7
2.4	Instalación de Equipos.....	7
2.5	Limitaciones de Instalación.....	10
2.6	Adquisición de Datos.....	10
3.0	CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE GLACIARES Y GLACIARETES EN PASCUA-LAMA	10
3.1	Procesamiento de Datos.....	10
3.2	Comparación Temperatura Ambiente de Glaciares y Glaciaretos.....	10
3.3	Evolución Térmica de los Cuerpos de Hielo en el Tiempo.....	14
3.4	Evolución Térmica de los Cuerpos de Hielo con la Profundidad.....	19
4.0	CONCLUSIONES	24
5.0	RECOMENDACIONES	24
6.0	REFERENCIAS	25

TABLAS

Tabla 2.1	Información de los Termistores Instalados en los Glaciares y Glaciaretos.....	9
Tabla 3.1	Variación Mensual de la Temperatura con respecto a la Profundidad al Interior de los Glaciares y Glaciaretos.....	23

FIGURAS

Figura 1.1	Ubicación del Área del Proyecto Binacional Pascua-Lama.....	2
Figura 1.2	Ubicación de Termistores en Glaciares y Glaciaretos en el área Pascua-Lama.....	3
Figura 1.3	Clasificación de los Glaciares Según su Temperatura.....	5
Figura 3.1	Relación Temperatura Superficial Glaciarete Toro #1 Upper y Temperatura Ambiental.....	11



INFORME DE MONITOREO DE TEMPERATURA DE GLACIARES Y GLACIARETES

Figura 3.2 Relación Temperatura Superficial Glaciarete Toro #1 Lower y Temperatura Ambiental	12
Figura 3.3 Relación Temperatura Superficial Glaciarete Esperanza y Temperatura Ambiental	12
Figura 3.4 Relación Temperatura Superficial Glaciarete Toro #2 y Temperatura Ambiental	13
Figura 3.5 Relación Temperatura Superficial Glaciar Guanaco y Temperatura Ambiental	13
Figura 3.6 Relación Temperatura Superficial Glaciar Estrecho y Temperatura Ambiental	13
Figura 3.7 Registro de Temperaturas Medidas a Distintas Profundidades en el Glaciarete Toro #1 Upper	14
Figura 3.8 Registro de Temperaturas Medidas a Distintas Profundidades en el Glaciarete Toro #1 Lower	15
Figura 3.9 Registro de Temperaturas Medidas a Distintas Profundidades en el Glaciarete Toro #2	16
Figura 3.10 Registro de Temperaturas Medidas a Distintas Profundidades en el Glaciarete Esperanza	17
Figura 3.12 Registro de Temperaturas Medidas a Distintas Profundidades en el Glaciar Estrecho	18
Figura 3.13 Registro de Temperaturas Medidas a Distintas Profundidades en el Glaciar Ortigas 1	18
Figura 3.14 Perfil de Temperatura Mensual y Estacional del Glaciarete Toro #1 Upper	19
Figura 3.15 Perfil de Temperatura Mensual y Estacional del Glaciarete Toro #1 Lower	20
Figura 3.16 Perfil de Temperatura Mensual y Estacional del Glaciarete Toro #2	21
Figura 3.17 Perfil de Temperatura Mensual y Estacional del Glaciarete Esperanza	21
Figura 3.18 Perfil de Temperatura Mensual y Estacional del Glaciar Guanaco	22
Figura 3.19 Perfil de Temperatura Mensual y Estacional del Glaciar Estrecho	22

ANEXOS

APÉNDICE I

FOTOGRAFÍAS INSTALACIÓN DE TERMISTORES

APÉNDICE II

REGISTRO ORIGINAL DATOS DE TEMPERATURA EN GLACIARES Y GLACIARETES (DIGITAL)

APÉNDICE III

REGISTRO DE DATOS DE TEMPERATURA UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS (DIGITAL)



1.0 INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

Este informe presenta los datos de temperatura de glaciares y glaciaretos ubicados en el área del proyecto binacional Pascua-Lama (Figura 1.1), así como también, entrega una caracterización de estos cuerpos desde el punto de vista térmico. Este trabajo se basó en los datos de temperatura provenientes de la red de monitoreo, obtenida a través de la instalación de termistores, que la Compañía Minera Nevada Ltda. ("CMN") tiene operativos en estos cuerpos de hielo a partir del mes de abril de 2006.

La ubicación de los cuerpos de hielo aquí estudiados se presenta en la Figura 1.2 y corresponden a los glaciares Guanaco, Estrecho y Ortigas 1; y a los glaciaretos Toro #1 Upper, Toro #1 Lower, Toro #2 y Esperanza.

En este documento y en términos simples, se considera como glaciares a aquellos extensos cuerpos conformados principalmente por capas de hielo, los cuales se deforman y se mueven lentamente como respuesta a la gravedad. Los glaciaretos, bajo este concepto, corresponden a cuerpos pequeños de hielo, comúnmente remanentes de antiguos glaciares mayores.

La información utilizada en el presente estudio corresponde a aquellos datos de temperatura medidos por los termistores instalados en los cuerpos de hielo y que, en general, corresponden al periodo de lecturas comprendido entre abril de 2006 y marzo de 2008.

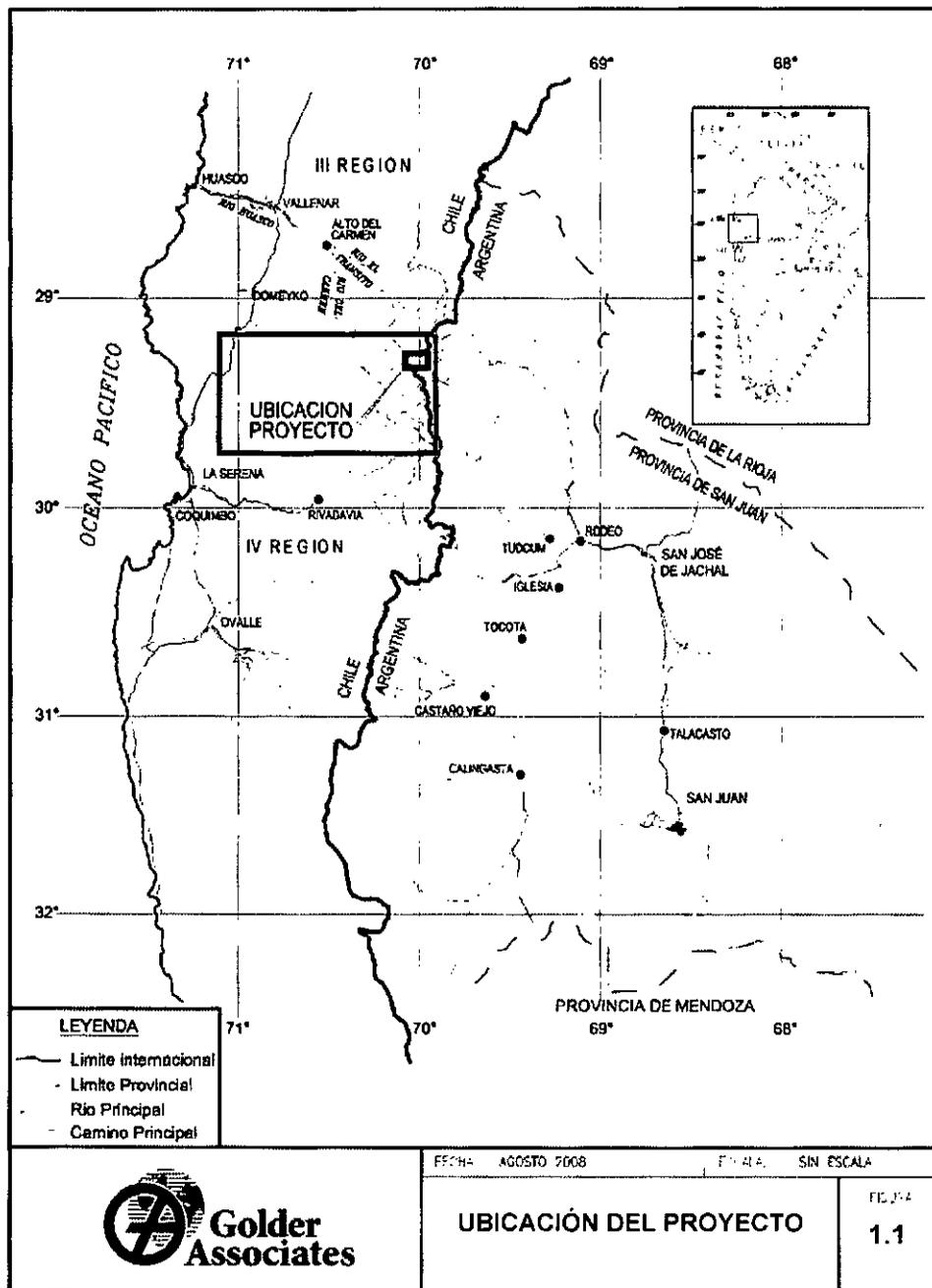
1.2 Objetivos

El presente informe tiene como objetivo principal el conocer la dinámica térmica de los diferentes cuerpos de hielo presentes en el área de estudio, y obtener un mejor entendimiento de su comportamiento. Para ello se plantean como objetivos parciales, el determinar las variaciones de temperatura estacionales; las variaciones con la profundidad; establecer temperaturas de equilibrio al interior de los cuerpos; y clasificar los cuerpos en relación al patrón de temperatura que se desarrolla en su superficie y en su base.



INFORME DE MONITOREO DE TEMPERATURA DE GLACIARES Y GLACIARETES

Figura 1.1 Ubicación del Área del Proyecto Binacional Pascua-Lama

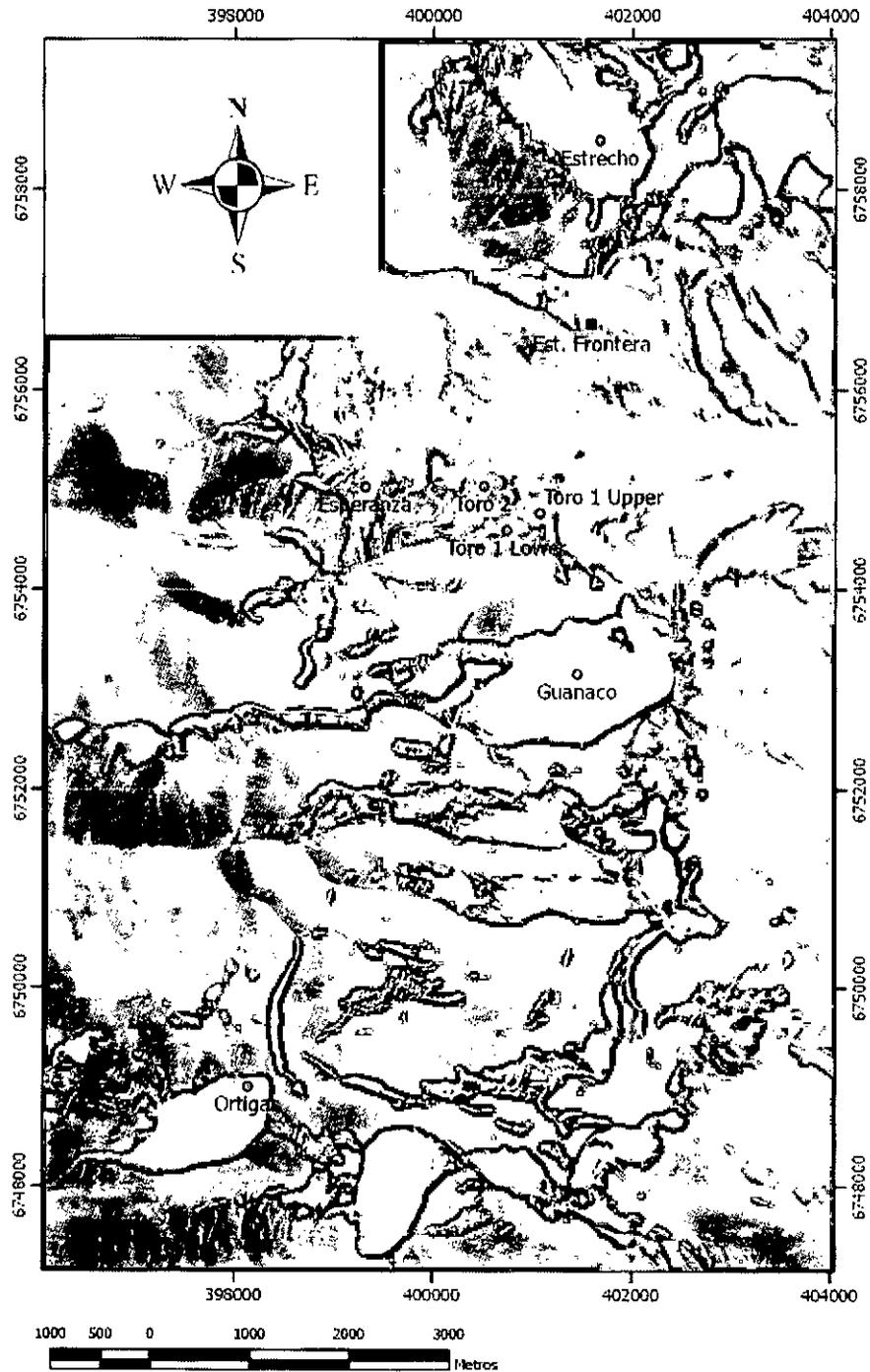




INFORME DE MONITOREO DE TEMPERATURA DE GLACIARES Y GLACIARETES

Figura 1.2 Ubicación de Termistores en Glaciares y Glaciaretas en el Área Pascua-Lama

(Círculos azules: Termistores en glaciares y glaciaretas; Cuadrado rojo: Estación Meteorológica Frontera)



Fuente: Imagen satelital IKONOS UTM WGS 84 2008 proporcionada por CMN



1.3 Clasificación de los Glaciares Según su Temperatura

La temperatura de un glaciar es un factor fundamental a considerar para el estudio de las tasas de fusión, erosión y depositación, por estar directamente relacionadas a las características térmicas del glaciar, especialmente en su base.

Existen diferentes definiciones para la clasificación de glaciares con respecto a su temperatura. Para el propósito de este informe, se decidió utilizar la definición presentada por Ahlman (1935a), quien propuso una clasificación "geofísica" de glaciares de acuerdo a la temperatura del hielo y a la cantidad de fusión superficial (derretimiento). De esta forma, fueron establecidas tres categorías, las cuales aún son ampliamente utilizadas en la actualidad:

- **Glaciar Templado:** Se refiere a todos aquellos glaciares cuya temperatura superficial y la del cuerpo de hielo, en general, se encuentran a la temperatura de fusión, es decir a 0°C.
- **Glaciar Polar o Frío (glaciares de base fría):** Son todos aquellos glaciares cuyo cuerpo de hielo se encuentra siempre bajo los 0°C.
- **Glaciar Sub-polar:** Comprende todas aquellas masas de hielo cuya temperatura varía entre el punto de fusión y algunos grados bajo cero, debido al aumento de la temperatura en los meses verano.

La clasificación anterior es presentada en la Figura 1.3 de la siguiente página.



Figura 3 Clasificación de los Glaciares Según su Temperatura



Fuente: Modificado de Locke (1999)

2.0 MONITOREO DE TEMPERATURA DE GLACIARES Y GLACIARETES PASCUA-LAMA

En esta Sección se presenta una descripción general de las actividades realizadas para el desarrollo del monitoreo de la temperatura de los glaciares y glaciaretos del área de Pascua-Lama. Los temas incluidos en este capítulo son los siguientes:

- Descripción general de los glaciares y glaciaretos
- Equipos de monitoreo
- Calibración y ajuste de los equipos de medición
- Limitaciones de la instalación



2.1 Descripción General de los Glaciares y Glaciaretos

Esta sección describe brevemente los glaciares y glaciaretos ubicados en el área del proyecto, en los cuales se instalaron los termistores. Esta descripción se basa en estudios anteriores y de terreno a objeto de determinar la profundidad o espesor de cada cuerpo de hielo. Las profundidades reportadas son las máximas observadas en los perfiles GPR (*ground penetrating radar*) y están referidas a mediciones verticales desde la superficie del cuerpo de hielo. Estos espesores fueron utilizados como referencia para la perforación con taladro de vapor Huecke y posterior instalación de termistores como se describe en las siguientes secciones. Las profundidades mencionadas a continuación se muestran en la Tabla 2.1.

- Toro #1 Upper:** La superficie de este glaciarete es irregular, con una combinación de penitentes de 1.0m de altura (Fotografías 1 y 2, Apéndice I) y pequeñas terrazas de hielo (asemejándose a un sistema de cascadas de hielo). De acuerdo a las mediciones GPR, la profundidad o espesor de este glaciarete es de aproximadamente 15 metros medidos en la estaca 5T1-2.
- Toro #1 Lower:** Este glaciarete posee una superficie de hielo irregular, con algunas áreas cubiertas con detritos y penitentes de hasta 2.0m de altura (Fotografías 3 y 4, Apéndice I). De acuerdo a las mediciones GPR, la profundidad o espesor de este glaciarete es de aproximadamente 18 metros medidos en la estaca 5T1-8.
- Toro #2:** En este glaciarete la superficie de hielo posee penitentes iguales o superiores a 1,8m de altura (Fotografías 5 y 6, Apéndice I), situados a corta distancia uno del otro. Las mediciones GPR muestran una profundidad o espesor aproximado de 12 metros medidos en la estaca 5T2-2.
- Esperanza:** Este glaciarete está cubierto con penitentes de hasta 5,0m de altura (Fotografía 4, Apéndice I). Las mediciones GPR muestran una profundidad o espesor aproximado de 22 metros medidos en la estaca 5E-22.
- Guanaco:** Este glaciar posee una amplia superficie plana (Fotografía 8, Apéndice I), con penitentes pequeños, de alturas inferiores a 0,5m, terrazas de hielo re-congelado y grietas en la superficie del glaciar. Las mediciones GPR muestran una profundidad o espesor aproximado de 100 metros medidos en la estaca 4G-3.

2.2 Equipos de Monitoreo

La instrumentación utilizada consiste de una serie de cables con 4 termistores con cubierta protectora, conectados a un *datalogger* descargable con capacidad para almacenar hasta un año de mediciones. Los cables con los termistores se congelan dentro de los glaciares, mientras los *dataloggers* permanecen en la superficie donde graban las temperaturas a intervalos de una hora. Los instrumentos utilizados fueron suministrados por Onset Systems, los que han probado ser de una calidad adecuada, a un costo razonablemente bajo.

Los instrumentos utilizados en cada glaciar y glaciarete se detallan a continuación.

- *Datalogger* HOBO® U12 4 de canal externo Outdoor/Industrial, con cubierta protectora. Descargable a través de comunicación USB, con una capacidad de memoria para 43.000 mediciones y un rango operativo nominal de: -20°C a 70°C (-4°F a 158°F).
- Cuatro sensores termistores a prueba de agua (TMCx-HD) conectados a un canal separado, de acuerdo a las especificaciones técnicas, con cables sensores con las siguientes longitudes: 1,83m, 6,10m y 15,24m.



Los *dataloggers* fueron preparados con baterías nuevas y desecante nuevo antes de su instalación en terreno. La programación de los *dataloggers* fue realizada utilizando la aplicación del software *Hoboware*, y antes de cada instalación para captura de datos a intervalos de una hora, usando la hora estándar local.

2.3 Calibración y Ajuste de Equipos

Las temperaturas de la subsuperficie fueron sistemáticamente obtenidas mediante la instalación de termistores, y a través del monitoreo de la resistencia de éstos a través del tiempo.

Los termistores modernos son fabricados para que sean no sólo lineales (resistencia versus temperatura), sino para que además tengan una curva de calibración consistente para un modelo de termistor dado. No obstante, esta calibración es fácilmente comprobable utilizando un medio a temperatura constante para comprobar exactitud, o una prueba colectiva con un rango de temperaturas para comprobar precisión. Para este estudio, pruebas de calibración de termistores fueron llevadas a cabo por personal de Golder en Santiago entre el 7 y el 10 de Abril de 2006 utilizando los siguientes equipos:

- Ocho U12 *Dataloggers*.
- Cables sensores de termistores: ocho a 1,83m, ocho a 15,24m y dieciséis a 6,10m.

Cada uno de los 32 cables fue conectado a los *dataloggers* y recopilaron datos de manera continua por 50 horas, a intervalos de lectura de 30 minutos, en ambientes termales entre +30°C y -18°C. Cada termistor fue periódicamente comprobado con un termómetro de control de mercurio. Las diferencias máximas entre los termistores y el termómetro de mercurio fueron del orden de 1,5°C a 2°C. Una mejor concordancia fue observada cuando la temperatura fue cercana a 0°C, con precisiones dentro de 0,25°C.

Previo a la instalación, en el campamento Barriales, en Pascua-Lama, cada *datalogger* fue conectado a los cables del termistor y probado nuevamente para comprobar su correcto funcionamiento. La programación final fue realizada en el campamento, estableciendo que la temperatura de cada termistor fuera grabada cada hora.

2.4 Instalación de Equipos

Para la instalación de los termistores se contempló cumplir con el método estándar establecido en la publicación *Handbook on Periglacial Field Methods* (2004) por la *International Permafrost Association* ("IPA").

Para la instalación de los termistores, se efectuaron sondajes verticales con un taladro de vapor Huecke perteneciente a CMN, a profundidades de hasta 15 metros. Una vez que se decidió el espaciamiento óptimo de los termistores, sus cables fueron conjuntamente asegurados *in situ*. Estos fueron unidos a una tubería de PVC de 1,5" de diámetro para proporcionar el soporte estructural a lo largo de la perforación y para prevenir el aplastamiento o atrapamiento de los cables.

Para la confección de la base de datos, se estableció que el Canal 1 siempre estuviese conectado al termistor más superficial y el Canal 4 al termistor más cercano al fondo de la perforación. Los Canales 2 y 3 se ubicaron a profundidades intermedias, típicamente alrededor de los 2m y 5m respecto de la superficie del hielo, respectivamente.

Los *datalogger* fueron unidos a estacas, aproximadamente a 1m de la superficie del hielo, y luego cubiertos con bolsas plásticas para permitir una recuperación más fácil en la época primaveral. Los cables de los termistores, también fueron asegurados apropiadamente para prevenir que éstos fuesen afectados por el viento.



INFORME DE MONITOREO DE TEMPERATURA DE GLACIARES Y GLACIARETES

Una vez que todas las instalaciones fueron llevadas cabo y antes de abandonar el terreno, se descargaron los datos de los *dataloggers* para asegurar su adecuado funcionamiento.

Las descargas fueron realizadas entre 1 y 10 meses y fue necesario el reemplazo de baterías cada 2 a 6 meses.

La Tabla 2.1 muestra la ubicación, información instrumental y profundidades de los termistores instalados, mientras que en la Figura 1.2 se presenta gráficamente la ubicación de éstos.

En el Apéndice I se incluyen las fotografías ilustrativas referentes a la instalación de los termistores ubicados en los glaciares y glaciaretos del área de Pascua-Lama.



INFORME DE MONITOREO DE TEMPERATURA DE GLACIARES Y GLACIARETES

Tabla 2.1 Información de los Termistores Instalados en los Glaciares y Glaciaretos

Glaciar/Glaciarete	Estaca ID GOLDER 2006	Estaca ID CEAZA 2008	Coordenadas aprox. de Pozos con Termistores			Espesor del Glaciar/Glaciarete (m)	Número Serial Datalogger	Fecha de Instalación	Profundidades de Instalación (m)				Altura Datalogger sobre la Superficie (m)
			Este (m)	Norte (m)	Elevación (m s.n.m.)				Canales/Termistores				
									1	2	3	4	
Toro #1 Upper	5T1-1	5T1-2	401.072	6.754.771	5.226	15	949204	26-04-2006	0,3	2,0	4,0	5,2	1,5
Toro #1 Lower	6T1-10	6T1-11	400.736	6.754.598	5.124	18	949210	26-04-2006	0,1	2,0	5,0	5,9	1,6
Toro #2	5T2-1	5T2-2	400.508	6.755.039	5.189	12	949208	25-04-2006	2,0	4,0	5,3	7,3	1,5
Esperanza	5E-22	6E-22	399.308	6.755.034	5.074	22	949203	27-04-2006	0,1	2,0	5,0	14,4	0,8
Guanaco	4G-3	6G-3	401.455	6.753.159	5.220	100	949206	29-04-2006	0,1	2,0	5,0	14,0	0,8
Estrecho	5A-5	6A-6	401.671	6.758.491	5.222	80	s/r	19-05-2006	0,1	2,0	5,0	14,0	s/r
Ortigas 1	5O-2	5O-2	398.140	6.749.004	5.213	28	s/r	29-01-2008	s/r	2,0	7,0	12,0	1,2

Coordenadas UTM WGS84
s/r: sin registro



2.5 Limitaciones de Instalación

Durante las actividades de perforación se encontraron las siguientes limitaciones:

- Las capas de detritos (fragmentos de rocas) presentes dentro del hielo retrasaron el progreso de la perforación de vapor, por lo que en algunos casos el fondo del sondaje no alcanzó la profundidad deseada.
- La profundidad máxima que se pudo obtener fue de 15m con el sistema Huecke.
- Las profundidades señaladas en la Tabla 2.1 son referentes a las obtenidas en la instalación de los termistores. Con la ablación y la depositación de nieve, la distancia (profundidad) obviamente varía, pero para propósitos de este estudio, estos valores no fueron ajustados.

2.6 Adquisición de Datos

La descarga de los datos se realizó principalmente entre abril de 2006 y marzo de 2008.

3.0 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE GLACIARES Y GLACIARETES EN PASCUA-LAMA

3.1 Procesamiento de Datos

Con el objetivo de proporcionar una interpretación de las variaciones de temperatura que se registraron en un período de tiempo definido en diferentes profundidades de glaciares y glaciaretos del Proyecto Pascua-Lama, Golder utilizó la base de datos proporcionada por CMN (Apéndice II) y de ella, sólo se consideran los datos que se tuvieron por correctos desde el punto de vista del óptimo funcionamiento de los termistores.

Para la interpretación se descartaron todos los valores de temperatura con mediciones erráticas, y aquellos con valores de temperaturas que se encontraron fuera del rango de detección del instrumental, es decir, temperaturas inferiores a -20°C y superiores a $+30^{\circ}\text{C}$. En la mayoría de los casos, estos registros erróneos se produjeron por el agotamiento de las baterías de los equipos.

Es de importancia mencionar que si bien existen algunos intervalos específicos de tiempo que son descartados por las razones explicadas: en términos generales, las mediciones de temperatura son de largo plazo y pueden ser utilizadas para indicar la condición termal del hielo.

3.2 Comparación Temperatura Ambiente de Glaciares y Glaciaretos

Para observar posibles interacciones térmicas entre la superficie de los cuerpos de hielo y la atmósfera, se realizó una comparación entre la temperatura del termistor más somero de los cuerpos de hielo (termistores instalados entre 0 y 4 m de profundidad en el hielo) y la temperatura ambiente medida en la estación meteorológica Frontera. La ubicación de esta estación se presenta en la Figura 1.2 y la comparación de temperaturas, en las Figuras 3.1 a 3.6.

Para efectos de este análisis se incorporó la serie de datos correspondiente al termistor somero, que por razones climáticas, se consideró como medida fuera del hielo. El registro en la estación Frontera posee mayor frecuencia de medición a partir de enero de 2007.



INFORME DE MONITOREO DE TEMPERATURA DE GLACIARES Y GLACIARETES

De la revisión de estas figuras es posible observar que los termistores someros instalados en los glaciaretos Toro #1 Lower (mayo 2006 a enero 2007), Esperanza (mayo a dic. 2006) y Toro #2 (abril a diciembre 2007), glaciar Guanaco (inicio mayo a inicio noviembre 2006) y glaciar Estrecho (Figuras 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6), se mantuvieron ubicados en el cuerpo de hielo. Esta situación se desprende del hecho de que el registro térmico presenta una muy baja oscilación térmica, es decir, las temperaturas se mantienen fundamentalmente constantes en comparación con el patrón de alta oscilación térmica que presenta la estación Frontera. Para estos termistores que se mantuvieron bajo el hielo, es posible indicar que su temperatura es similar a la temperatura media ambiental medida en la estación Frontera.

Por su parte, el patrón térmico de los termistores someros instalados en los glaciaretos Toro #1 Upper, Toro #1 Lower (febrero 2007), Toro #2 (enero - marzo 2008), Esperanza a partir de enero 2007 y glaciar Guanaco (finales de abril - inicio mayo de 2006 y noviembre 2006 - abril 2007), es similar y se correlaciona al patrón térmico de los datos de la estación Frontera (Figuras 3.1, 3.4 y 3.5). Esta situación indicaría que estos termistores no permanecieron en la ubicación en que fueron instalados, quedando expuestos a la superficie y registrando las oscilaciones propias del ambiente.

Figura 3.1 Relación Temperatura Superficial Glaciarete Toro #1 Upper y Temperatura Ambiental

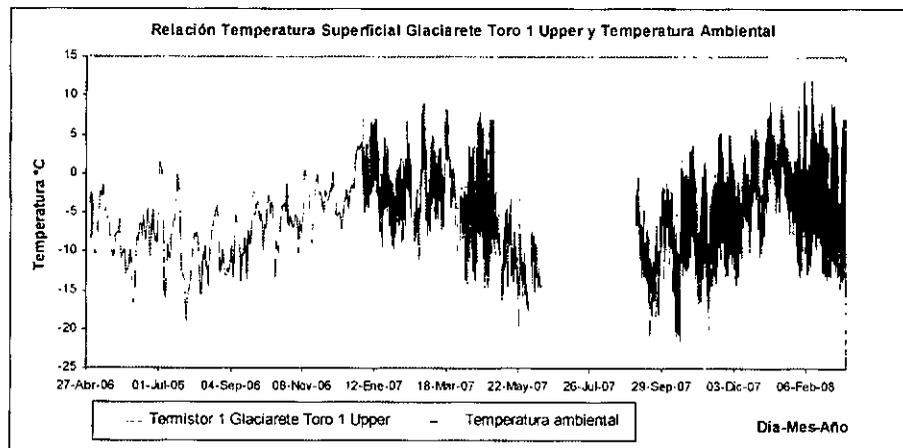




Figura 3.2 Relación Temperatura Superficial Glaciarete Toro #1 Lower y Temperatura Ambiental

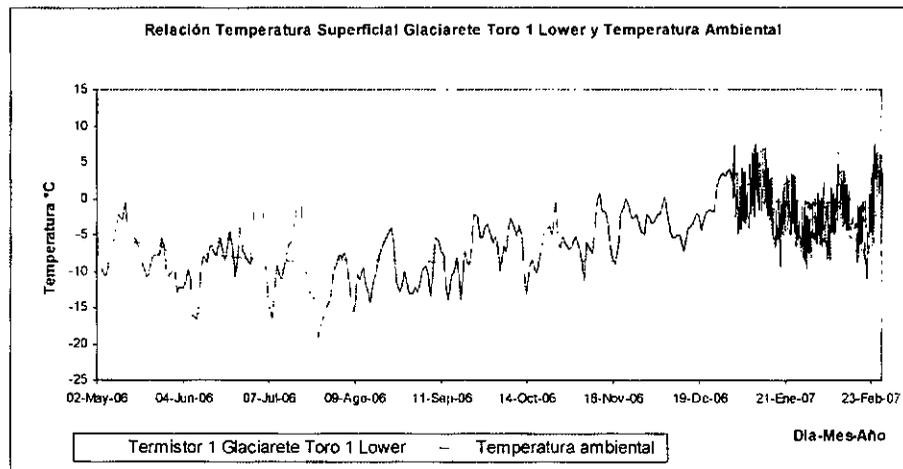


Figura 3.3 Relación Temperatura Superficial Glaciarete Esperanza y Temperatura Ambiental

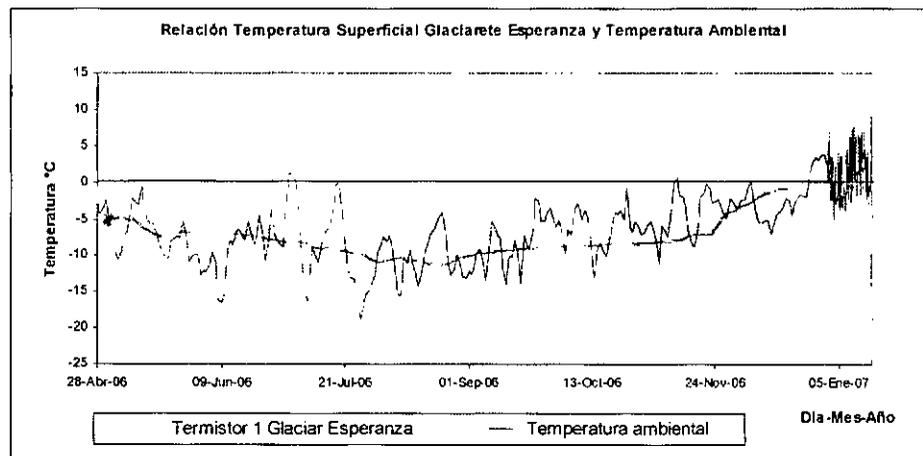




Figura 3.4 Relación Temperatura Superficial Glaciarete Toro #2 y Temperatura Ambiental

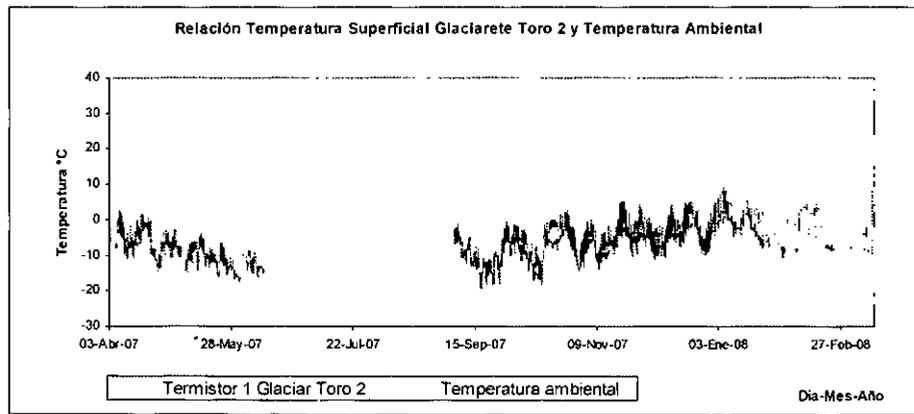


Figura 3.5 Relación Temperatura Superficial Glaciar Guanaco y Temperatura Ambiental

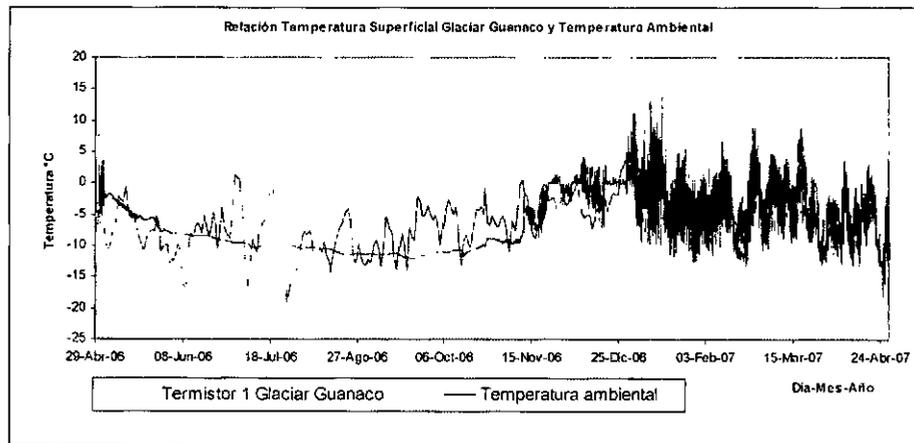
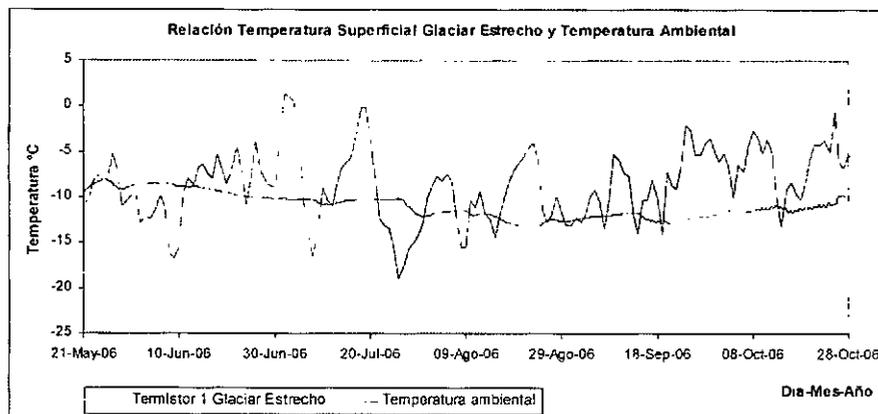


Figura 3.6 Relación Temperatura Superficial Glaciar Estrecho y Temperatura Ambiental



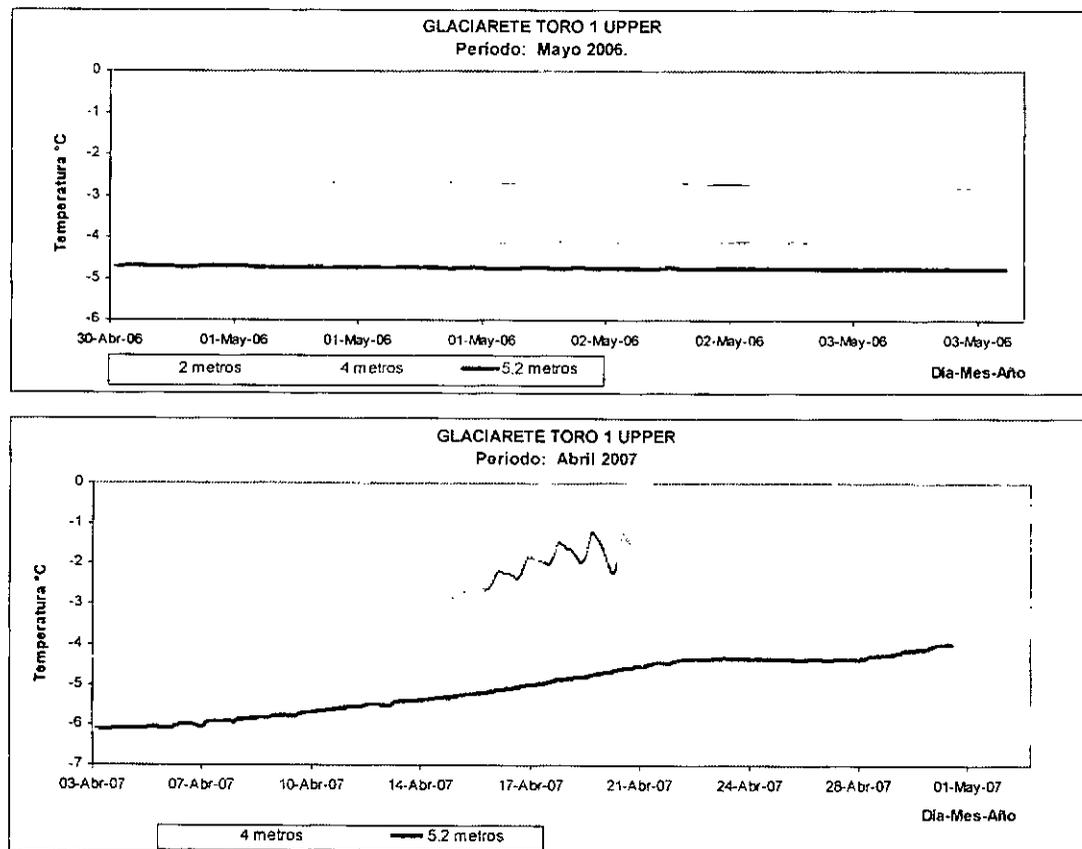


3.3 Evolución Térmica de los Cuerpos de Hielo en el Tiempo

Las Figuras 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13 presentan los registros de temperaturas que fueron medidos a distintas profundidades en el glaciarete Toro #1 Upper, glaciarete Toro #1 Lower, glaciarete Toro #2, glaciarete Esperanza, glaciar Guanaco, glaciar Estrecho y glaciar Ortigas 1 respectivamente. Estas figuras fueron producidas de acuerdo a los criterios descritos de selección de datos representativos para la interpretación de la información. Es importante mencionar que para este análisis no se incorporaron aquellos datos de los termistores someros que se consideraron medidos fuera del hielo.

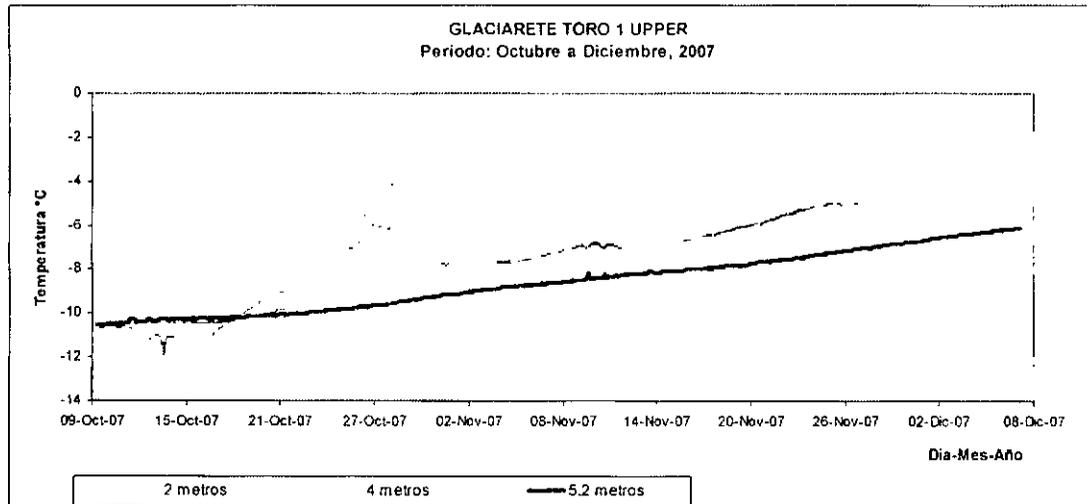
En términos generales, para la Figura 3.7 se pueden establecer las siguientes observaciones: a) Para el periodo inicial correspondiente a mayo de 2006, no se observan mayores variaciones en la temperatura; b) Para abril de 2007 se observa un ascenso leve de las temperaturas del orden de -2°C , y la presencia de una amplitud térmica diaria del termistor ubicado a 4 m de profundidad, hacia el final del registro que se presenta; c) Para el periodo comprendido entre octubre y diciembre de 2007, se observa una tendencia similar al leve aumento de temperatura de los dos termistores más profundos (4m y 5,2m), mientras que un comportamiento algo más errático del termistor más superficial (2m), y; d) Es probable que entre el final del periodo abril del 2007 y el inicio del periodo octubre a diciembre de 2007, pueda haberse producido un descenso de la temperatura, por lo menos en los dos termistores más profundos (4m y 5,2m; las profundidades son variables).

Figura 3.7 Registro de Temperaturas Medidas a Distintas Profundidades en el Glaciarete Toro #1 Upper



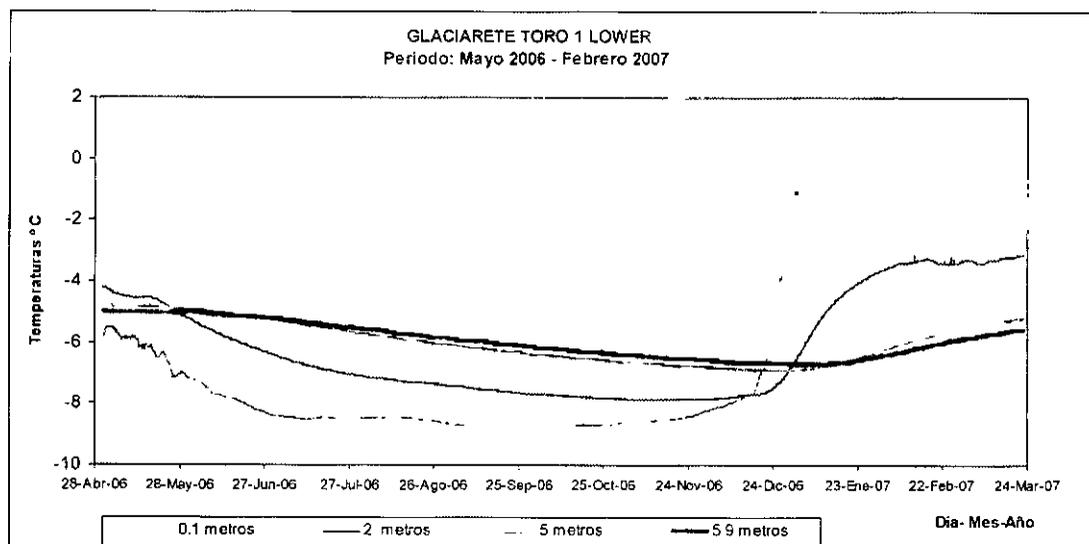


INFORME DE MONITOREO DE TEMPERATURA DE GLACIARES Y GLACIARETES



La Figura 3.8 muestra las temperaturas medidas a distintas profundidades en el glaciarete Toro #1 Lower, durante el período mayo de 2006 a febrero de 2007. Las mediciones de temperatura fueron registradas mediante los termistores instalados a 0,1; 2,0; 5,0 y 5,9 metros de profundidad. En términos generales, se pueden observar rangos de variaciones normales para los dos termistores más profundos, mientras que los dos más superficiales muestran variaciones de temperatura que pueden corresponder a mayores influencias de las temperaturas ambientales.

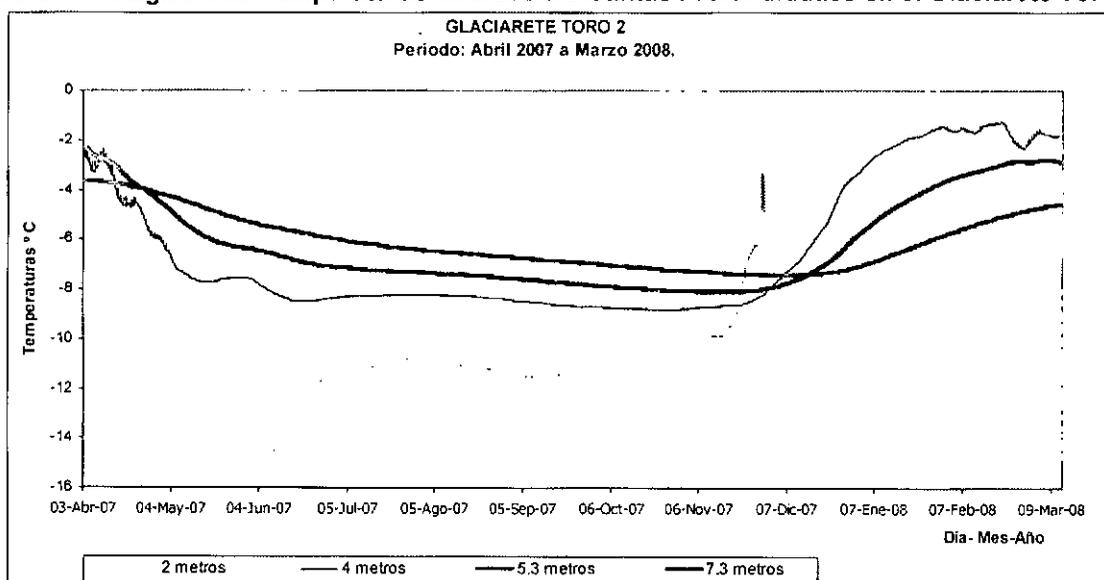
Figura 3.8 Registro de Temperaturas Medidas a Distintas Profundidades en el Glaciarete Toro #1 Lower





La Figura 3.9 muestra el registro de temperaturas medidas a distintas profundidades en el glaciarete Toro #2, durante el periodo abril de 2007 a marzo de 2008. Las mediciones de temperatura fueron registradas mediante termistores instalados a 2,0; 4,0; 5,3 y 7,3 metros de profundidad. Para este registro es posible observar tendencias muy similares de descensos y ascensos de temperaturas para los tres termistores más profundos, mientras que las variaciones son mayores para el termistor más cercano a la superficie. Al igual que en los casos anteriores, las variaciones pueden estar afectadas por las condiciones ambientales externas en los termistores más superficiales.

Figura 3.9 Registro de Temperaturas Medidas a Distintas Profundidades en el Glaciarete Toro #2

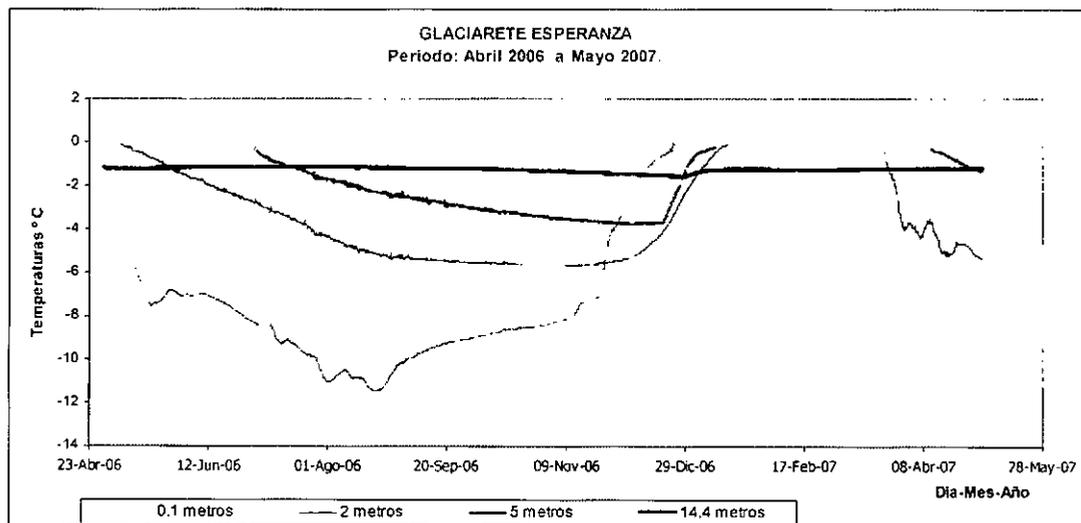


La Figura 3.10 muestra las variaciones de temperaturas medidas a distintas profundidades en el glaciarete Esperanza, entre abril de 2006 y mayo de 2007. Las temperaturas fueron registradas mediante los termistores instalados a 0,1; 2,0; 5,0 y 14,4 metros de profundidad. Para este registro es posible observar que el termistor más profundo prácticamente no registra variaciones de temperatura, y que los tres termistores más superficiales muestran tendencias de variaciones (ascensos y descensos) similares entre ellos.



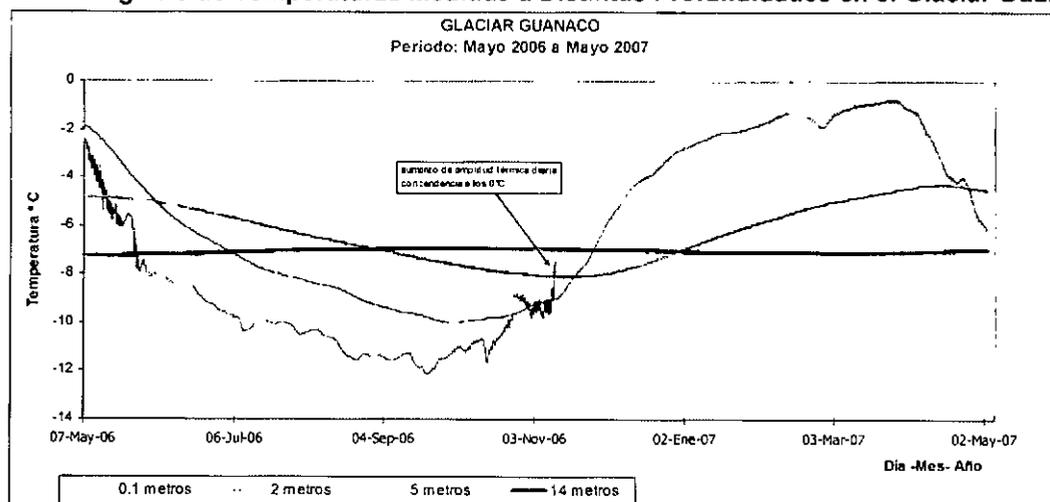
INFORME DE MONITOREO DE TEMPERATURA DE GLACIARES Y GLACIARETES

Figura 3.10 Registro de Temperaturas Medidas a Distintas Profundidades en el Glaciarete Esperanza



La Figura 3.11 muestra el registro de temperaturas medidas a distintas profundidades en el glaciar Guanaco, entre mayo de 2006 y mayo de 2007. Los termistores fueron instalados a 0,1; 2,0; 5,0 y 14,0 metros de profundidad. En general, es posible observar que el termistor más profundo prácticamente no muestra variaciones significativas de temperatura. Sin embargo, los tres termistores más superficiales muestran tendencias de variación (ascensos y descensos) similares entre ellos.

Figura 3.11 Registro de Temperaturas Medidas a Distintas Profundidades en el Glaciar Guanaco

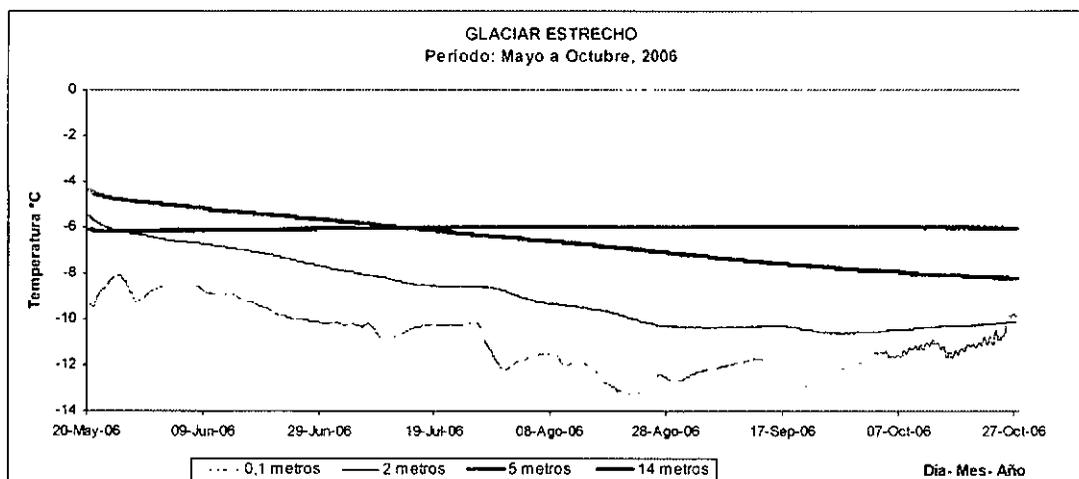




INFORME DE MONITOREO DE TEMPERATURA DE GLACIARES Y GLACIARETES

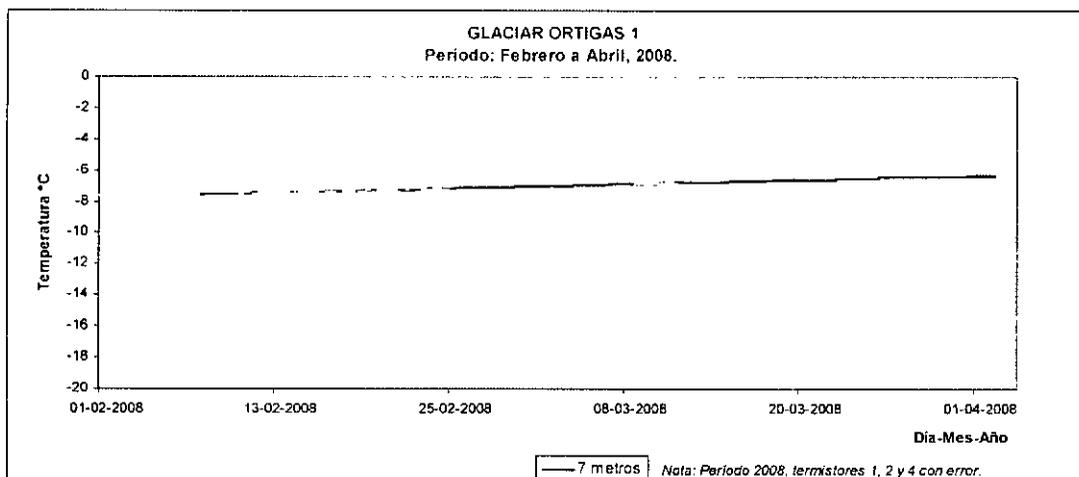
La Figura 3.12 muestra el registro de temperaturas medidas en el glaciar Estrecho, entre mayo de 2006 a octubre de 2006. Las temperaturas fueron registradas mediante termistores instalados a 0,1; 2,0; 5,0 y 14,0 metros de profundidad. Es posible observar que el termistor más profundo prácticamente no registra variaciones de temperatura en el periodo evaluado, y que los dos termistores intermedios muestran tendencia a un descenso de temperatura. Esta tendencia es similar entre ellos. Se observan algunas oscilaciones de temperatura en el termistor más superficial.

Figura 3.12 Registro de Temperaturas Medidas a Distintas Profundidades en el Glaciar Estrecho



Para el glaciar Ortigas 1, la Figura 3.13 muestra que para el periodo febrero de 2008 a abril de 2008 no se observan mayores variaciones en la temperatura.

Figura 3.13 Registro de Temperaturas Medidas a Distintas Profundidades en el Glaciar Ortigas 1





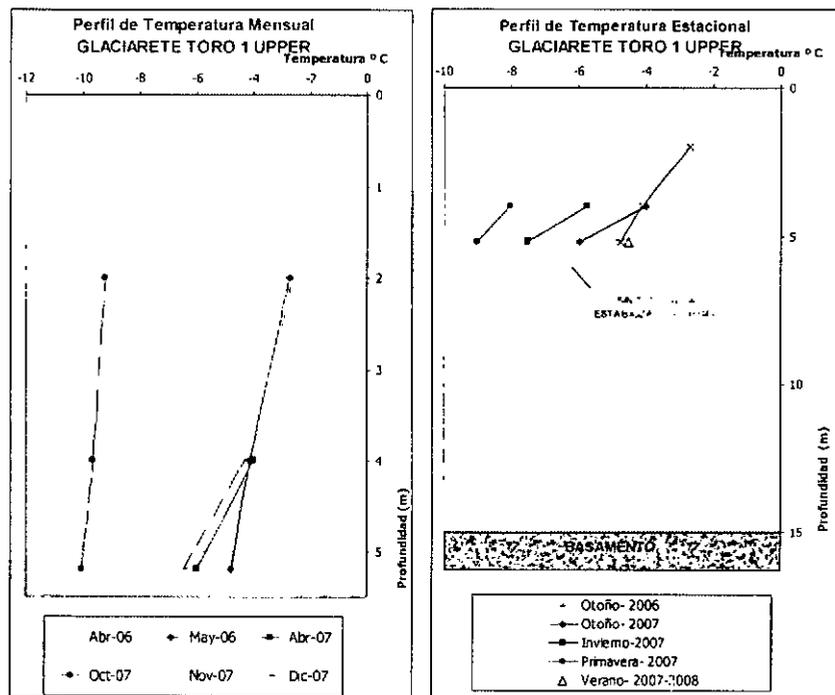
3.4 Evolución Térmica de los Cuerpos de Hielo con la Profundidad

En esta sección se presenta el monitoreo térmico al interior de cada uno de los glaciares y glaciaretes, de manera tal de establecer patrones de comportamiento con la profundidad, tendencias a la estabilización de temperaturas y eventuales gradientes termales.

Para este análisis se graficó la temperatura promedio mensual y estacional para todas las profundidades monitoreadas para cada glaciar o glaciarete. Los gráficos son presentados en las Figuras 3.14 a 3.19 (gráficos a y b).

A modo de establecer una relación espacial entre el espesor del cuerpo monitoreado y el espesor total del cuerpo, en las figuras siguientes se indica la ubicación del basamento o sustrato sobre el cual descansa el cuerpo de hielo. La información de espesores de glaciares y glaciaretes fue tomada de la Tabla 2.1.

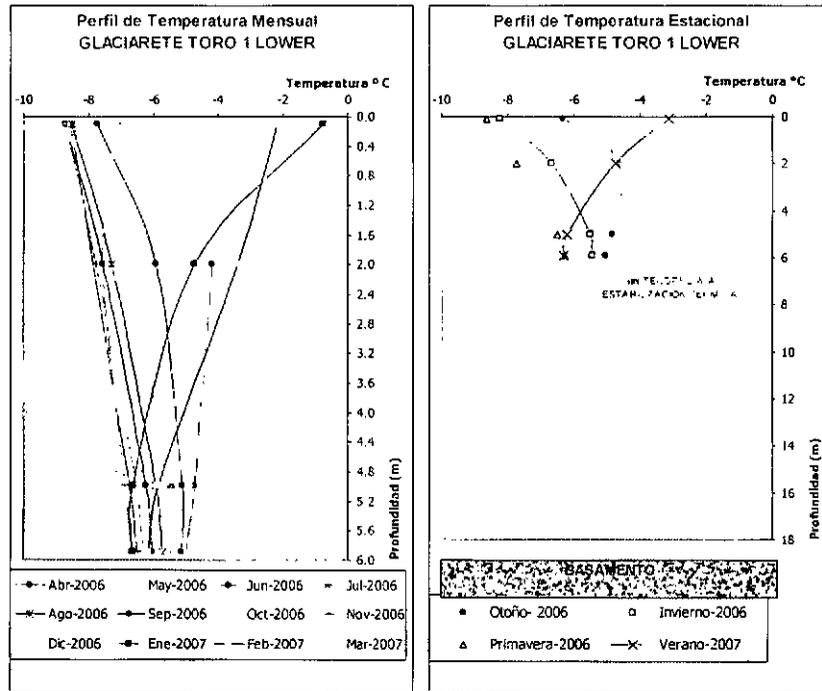
Figura 3.14 Perfil de Temperatura Mensual, Estacional del Glaciarete Toro #1 Upper





INFORME DE MONITOREO DE TEMPERATURA DE GLACIARES Y GLACIARETES

Figura 3.15 Perfil de Temperatura Mensual y Estacional del Glaciarete Toro #1 Lower





INFORME DE MONITOREO DE TEMPERATURA DE GLACIARES Y GLACIARETES

Figura 3-16 Perfil de Temperatura Mensual y Estacional del Glaciarete Toro #2

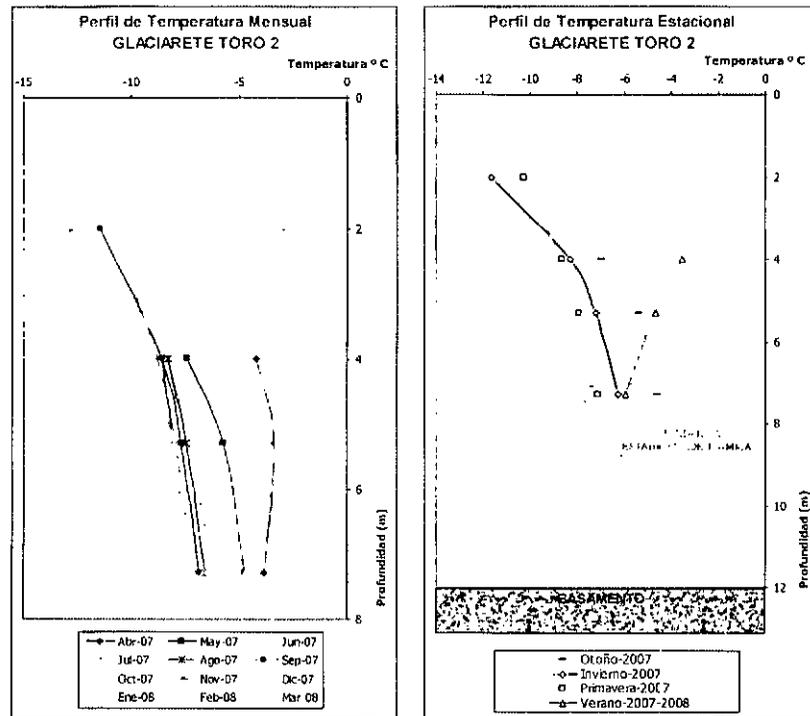
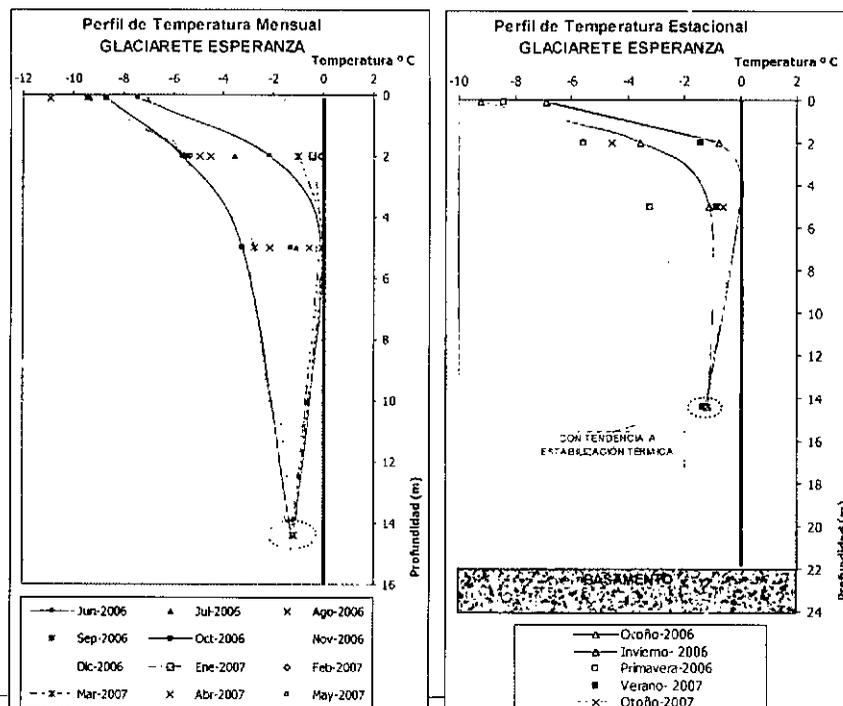


Figura 3-17 Perfil de Temperatura Mensual y Estacional del Glaciarete Esperanza





INFORME DE MONITOREO DE TEMPERATURA DE GLACIARES Y GLACIARETES

Figura 3 18 Perfil de Temperatura Mensual y Estacional del Glaciar Guanaco

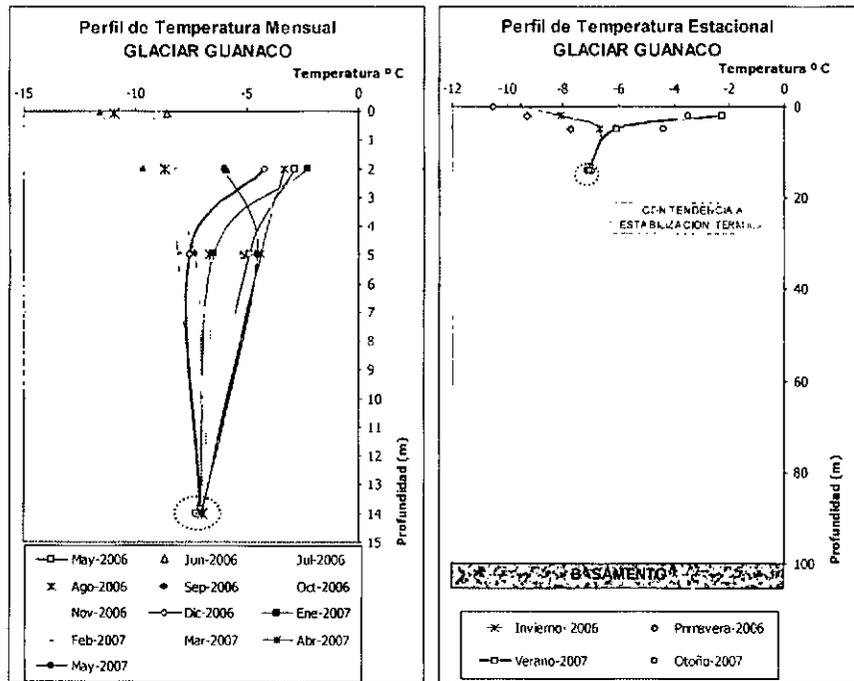
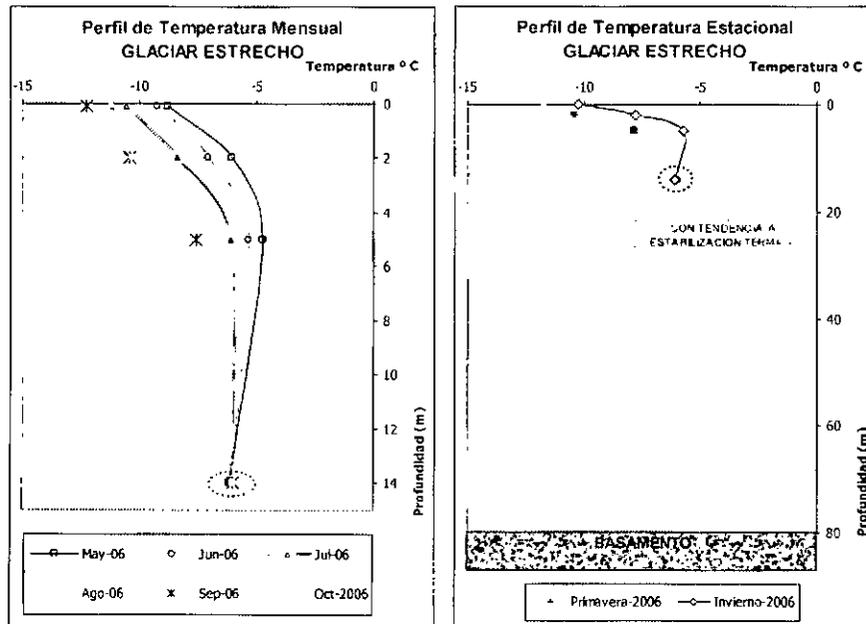


Figura 3 19 Perfil de Temperatura Mensual y Estacional del Glaciar Estrecho





INFORME DE MONITOREO DE TEMPERATURA DE GLACIARES Y GLACIARETES

En la Tabla 3.1 se resumen los datos máximos y mínimos de temperaturas para las capas superficiales y profundas.

Tabla 3.1 Variación Mensual de la Temperatura con respecto a la Profundidad al Interior de los Glaciares y Glaciaretos

Cuerpo de Hielo		Elevación (m s.n.m.)	Termistor Superficial			Termistor Profundo		
			Prof. Termistor (mbs)	Temp. Máx Mensual (°C)	Temp. Min Mensual (°C)	Prof. Term (mbs)	Temp. Máx Mensual (°C)	Temp. Min Mensual (°C)
Glaciarete	Toro #1 Upper	5.226	0,3	0	-8,1	5,2	-2,6	-10
	Toro #1 Lower	5.124	0,1	0	-6	5,9	-5	-6,6
	Toro #2	5.189	2	0	-8,8	7,3	-3,8	-7,4
	Esperanza	5.074	0,1	0	-10,9	14,4	-1	-1,5
Glaciar	Guanaco	5.220	0,1	0	-11,6	14	-6,9	-7,2
	Estrecho	5.222	0,1	-8,7	-12,3	14	-5,9	-6,1
	Ortigas 1	5.213				7	-6,7	-7,4

De la revisión de las figuras y de la Tabla 3.1 se observa:

- Para profundidades menores o iguales a 14 metros no hay una única tendencia de aumento o disminución de la temperatura con la profundidad, puesto que los datos están influenciados por cambios estacionales. Dado que los perfiles de temperatura presentados sólo representan el comportamiento en las capas altas de los cuerpos, tal como se muestra en la Figura 1.3, no es posible predecir la tendencia de la temperatura con la profundidad.
- Para casi la totalidad de los casos analizados, se observa que las temperaturas más bajas se presentan en primavera e invierno, aumentando levemente hacia el otoño y alcanzando el máximo en el verano.
- Las zonas más superficiales de los cuerpos analizados presentan una tendencia a aumentar su temperatura por sobre el punto de fusión en ciertos periodos de verano. Esta situación correspondería a la interacción entre estas capas superficiales y la atmósfera, donde se observa un aumento de la temperatura ambiente en verano.
- Para la masa de los cuerpos de hielo, las temperaturas son muy inferiores a 0°C, razón por la cual ellos pueden ser clasificados como Polares o Sub Polares, es decir, no corresponderían al tipo Templado.
- Para ciertos cuerpos, tales como el glaciarete Esperanza y los glaciares Guanaco y Estrecho, se observa que la temperatura para profundidades mayores a 14 metros tiende a mantenerse estable para todas las estaciones (inferiores a 0°C). A pesar de esto, no es posible definir con certeza un gradiente termal que permita extrapolar los datos a mayor profundidad, es decir, no es posible - con la información disponible - indicar la temperatura que alcanzaría el hielo en contacto con el basamento.



- La capa activa corresponde a la superficie superior del permafrost (o suelo permanentemente congelado), es decir, a la capa que limita la base del permafrost y la interfase suelo/atmósfera, caracterizándose por ciclos estacionales de congelación/descongelación (se deshiela y congela según temporadas). Dado lo anterior, la capa activa no está relacionada con el monitoreo de la temperatura de los glaciares y glaciaretos, puesto que aplica al permafrost y no a estos cuerpos de hielo.

4.0 CONCLUSIONES

- En relación con las variaciones de temperatura de los glaciares y glaciaretos con respecto a la profundidad, en términos generales y de acuerdo a la cantidad y calidad de los datos analizados, se puede concluir que la información disponible sólo representa el comportamiento en las capas superiores de los cuerpos de hielo.
- Del mismo modo, se concluye que el comportamiento termal del hielo en superficie está influenciado por los cambios estacionales, es decir, para la mayoría de los casos analizados, las temperaturas al interior de los cuerpos de hielo aumentan hacia el verano y disminuyen hacia el invierno.
- Dado que las temperaturas medidas en profundidad son inferiores a 0°C, es posible clasificar los cuerpos de hielo como Polares o Sub Polares, es decir, no corresponderían al tipo Templado.
- Si bien se puede concluir que en algunos casos las temperaturas tienden hacia una muy baja variación con el aumento de la profundidad, se concluye que mediante los datos disponibles no es posible definir un gradiente termal que permita extrapolar los datos a profundidades mayores.

5.0 RECOMENDACIONES

- Considerando que los glaciares Guanaco, Estrecho y Esperanza permiten caracterizar una temperatura relativamente homogénea a partir de los 14 metros de profundidad, se recomienda para trabajos futuros, y para efectos de comparación, la instalación de termistores a partir de dicha profundidad, e idealmente llegar hasta la base del glaciar. Esto requerirá del desarrollo de una metodología de instalación alternativa y posiblemente equipos adicionales.
- En el mismo sentido que el señalado en el punto anterior, también se recomienda la instalación a mayores profundidades de termistores en los glaciaretos Toro #1 y Toro #2.
- Con respecto al programa de monitoreo, se recomienda modificar la frecuencia en la obtención de datos a intervalos más espaciados que los hasta ahora empleados, con el objeto de contar con bases de datos que sean igualmente representativas de las temperaturas pero más fáciles de manejar por tener registros más cortos.
- En lo posible, se recomienda la preparación de informes dos veces al año (una vez antes del invierno y una después del invierno) o estacionales, en los que continuamente se podrán actualizar y verificar las bases de datos y lecturas, además de observar las tendencias que muestren los datos monitoreados.
- Finalmente, también se sugiere la elaboración de un modelo que permita predecir el gradiente termal entre los datos medidos y la base del cuerpo de hielo.



6.0 REFERENCIAS

- Ahlman, H. W. (1935a). Contribution to the Physics of Glaciers. Geogr. J., 86, 97-113.
- Barrick. (2008). Plan de Monitoreo de Glaciares Pascua-Lama, Enero de 2008.
- BGC Engineering Inc. (2008). Review of Pascua-Lama Geothermal Monitoring Data. Memorandum.
- A Handbook on Periglacial Field Methods. (2004). The Working Group on Periglacial Processes and Environments, Co-chairs: Ole Humlum and Norikazu Matsuoka. The University Centre in Svalbard, Noruega.
- Locke, W. (1999). <http://www.homepage.montana.edu/~geol445/hyperglac/morphology1>.
- Paterson, W. (1994). The Physics of Glaciers. 3rd. ed. Pergamon Press, Oxford,UK, 480 p.
- Payne, T. (1995). Limit Cycles in the Basal Thermal Regime of Ice Sheets. Journal of Geophysical Research 100B3: 4249-4263.



Página para firmas de Informe

Andrew Morsley/
Jefe de Proyecto

Juan Luis Fernández
Gerente Área Manejo de Aguas

AM/JLF/ca

\\san1-s-nas\proyectos\079\abierto\079 215 5019 cmn, glacier technical support\informacion tecnica\primera parte\ask 2.1 temp monitoring\revisión agosto 2009\079 215 5019-2.1-it 002-temistor.doc



APÉNDICE I

FOTOGRAFIAS INSTALACIÓN DE TERMISTORES

Foto 1: Instalación de Termistores - Glaciarete Toro 1 Upper, Abril 2006



Foto 2: Instalación de Termistores - Glaciarete Toro 1 Upper, Abril 2006



Foto 3: Instalación de Termistores - Glaciarete Toro 1 Lower, Abril 2006



Foto 4: Instalación de Termistores - Glaciarete Toro 1 Lower, Abril 2006



Foto 5: Instalación de Termistores - Glaciarete Toro 2, Abril 2006



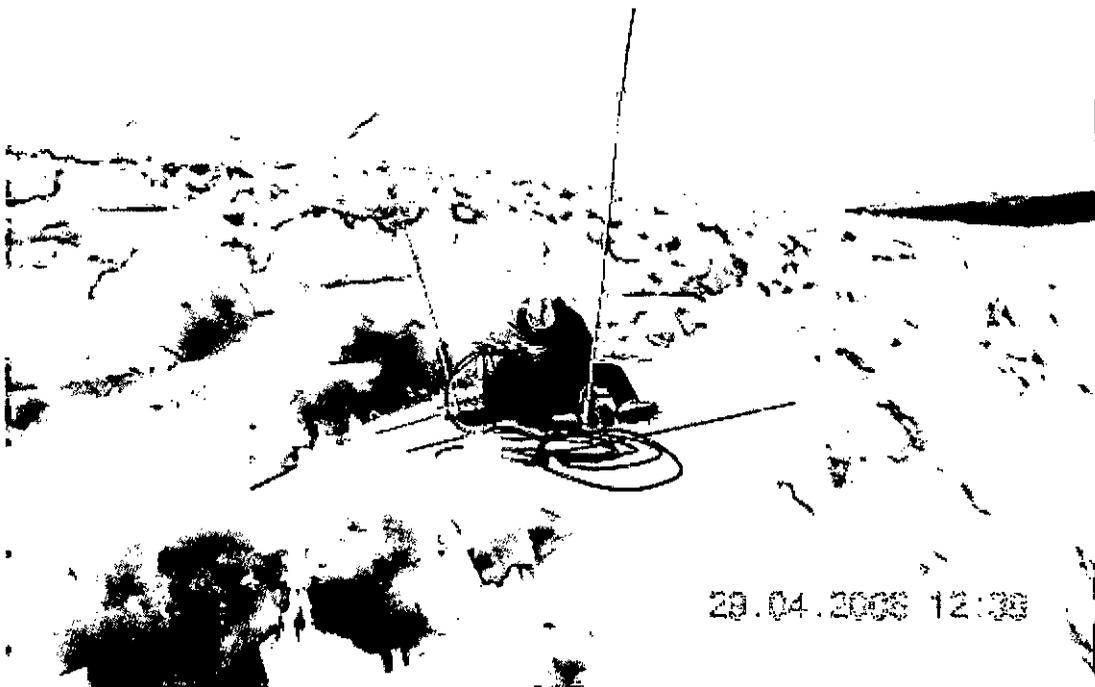
Foto 6: Instalación de Termistores - Glaciarete Toro 2, Abril 2006



Foto 7: Instalación de Termistores - Glaciarete Esperanza, Abril, 2006



Foto 8: Instalación de Termistores – Glaciar Guanaco, Abril 2006





APÉNDICE II

REGISTRO ORIGINAL DATOS DE TEMPERATURA EN GLACIARES Y GLACIARETES (DIGITAL)



APÉNDICE III

REGISTRO DE DATOS DE TEMPERATURA UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS (DIGITAL)

En Golder Associates nos esforzamos por el ser grupo global más respetado especializado en proveer servicios de ingeniería de la tierra y ciencias ambientales. Operando como una compañía de propiedad de sus empleados desde nuestra formación en 1960, hemos creado una cultura única de compromiso que nos lleva a una estabilidad organizacional de largo plazo. Como resultado, nuestros clientes cuentan con el apoyo de profesionales que entienden sus necesidades en los ambientes específicos en los que operan. Seguimos expandiendo nuestras capacidades técnicas y experimentando un crecimiento constante de nuestras oficinas en África, América del Norte, América del Sur, Asia, Europa y Oceanía.

África +27 (0) 254 4300
América del Norte +1 800 275 4231
América del Sur +55 21 8095 9500
Asia +852 2562 3658
Europa +353 21 4280 20
Oceanía +61 8 8862 3500

solutions@golder.com
www.golder.com



Golder Associates S.A.
Av.11 de Septiembre 2353 - Piso 2
Providencia
Santiago
Chile
T: +56 (2) 594 2000

