

# ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DEL TECHO DEL PERMAFROST Y DE LA CAPA ACTIVA DEL TERRAPLÉN DE ASENTAMIENTO DEL MUSEO OTTO NORDENSKJÖLD, ISLA CERRO NEVADO, ANTÁRTIDA

Gabriel GOYANES<sup>1,2,3,4</sup> y Yevgeniy YERMOLIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Antártico Argentino - Dirección Nacional del Antártico, Buenos Aires. E-mail: goyanes@gl.fcen.uba.ar

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

<sup>3</sup> Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina

<sup>4</sup> Centro de Estudos Geográficos / Instituto de Geografia e Ordenamento do Território - Universidade de Lisboa, Portugal.

## RESUMEN

La cabaña de Otto Nordenskjöld fue construida en 1902 en la isla Cerro Nevado, Antártida. La misma fue designada Sitio y Monumento Histórico N° 38 por el tratado Antártico y Monumento Histórico Nacional por Decreto del Poder Ejecutivo Nacional (26/07/1965). Por ello nuestro país tomó la obligación de preservarla de la degradación natural a la que se encuentra sujeta. En este trabajo se presenta un relevamiento topográfico junto a las medidas de mitigación, realizadas desde 1980 hasta el presente, con la finalidad de prevenir la degradación del permafrost bajo el museo, el cual afecta la estabilidad de la estructura. Además, se analiza el régimen térmico y la distribución espacial de la capa activa y del tope del permafrost del terraplén, como así también su interacción con diferentes variables topográficas. Los estudios realizados evidencian la proximidad de los suelos congelados a la superficie favoreciendo la subsidencia de la misma debido a la fusión de los hielos subterráneos. Estos sectores acumulan nieve, la cual al derretirse, transmite calor a su entorno acrecentando la degradación de los suelos congelados. Los procesos mencionados ocurren próximos a la cabaña Museo Otto Nordenskjöld, lo que hizo necesaria una rápida intervención. El programa MUSEOANTAR realizó medidas de prevención durante la campaña antártica de verano 2014-2015, que se concentraron sobre la ladera NE-SO del terraplén, colocando tablestacas verticales y gaviones tipo "en saco" que facilitan el rellenado de las depresiones con sedimentos de diferente granulometría, de forma de elevar la cota media de la superficie, eliminar los posibles sitios de acumulación nival y favorecer la circulación del aire frío.

**Palabras clave:** Régimen térmico, permafrost, cambio climático, Museo Otto Nordenskjöld, Antártida

## ABSTRACT

*Study of current conditions of the active layer and top of permafrost of the embankment under the Otto Nordenskjöld Museum, Cerro Nevado Island, Antarctica*

The Otto Nordenskjöld hut was built in Cerro Nevado Island, Antarctica, in 1902. It was named as Historic Site and Monument No. 38 by the Antarctic Treaty and as National Historic Monument by a decree of the Argentinian government (07/26/1965). For this, Argentina must preserve the hut from the natural deterioration which is subject. In this work, a topographical survey is conducted together with the assessment of the mitigation techniques used in the area from 1980 to the present in order to prevent permafrost degradation under the museum. Besides, the thermal regime and the spatial distribution of the active layer and the top of permafrost and their interaction with different topographic variables are analyzed. The studies conducted in the area showed the close surface location of the frozen ground favours the surface subsidence by melting of the underground ice. This phenomenon creates concavities where the snow is trapped. When it is melted, it transfers heat to the environment increasing shallow frozen ground degradation. These processes occur near the hut Otto Nordenskjöld Museum, so a fast intervention was necessary. Prevention works were made by MUSEOANTAR program during the 2014-2015 Antarctic summer fieldwork and they were focus on the NE-SW embankment slope according to the achieved results. Vertical sheet piles and horizontal gabions were used to fill the depressions with sediments of different grain size in order to raise the average level of the surface, smooth all sites of snow accumulation and promote cold air circulation.

**Keywords:** Thermal regime, permafrost, climate change, Otto Nordenskjöld Museum, Antarctica

## INTRODUCCIÓN

Nils Otto Gustaf Nordenskjöld (1869-1928) fue un geólogo, geógrafo y explora-

dor de nacionalidad sueca que lideró expediciones tanto a la Patagonia argentina como a ambos polos. La más recordada

es la Expedición Antártica Sueca entre 1901 y 1904 a bordo del velero Antarctic, en la que participó el Alférez de Navío de

la Armada Argentina José María Sobral y que contó con el apoyo del gobierno argentino. La misma presenta un valor adicional en nuestro país, ya que marca los comienzos de la actividad científica oficial de Argentina en la Antártida.

Esta expedición partió rumbo al continente antártico el 16 de octubre de 1901 desde Gotemburgo (Suecia), pasando por Buenos Aires en el mes de Diciembre del mismo año y arribando a la isla Cerro Nevado en Antártida en febrero de 1902. Allí Nordenskjöld, Bodman, Ekelöf, Jonasen, Akerlundh y Sobral, fueron desembarcados y rápidamente comenzaron con la construcción de una casilla prefabricada (cabaña Otto Nordenskjöld), comprada en Suecia, la que serviría de alojamiento (Fig. 1). La misma fue montada en cercanías de la costa este de la isla sobre un relicto de una morena de fondo (64° 22' S - 56° 59' O) y próxima a un frente glaciario el cual les proveería de agua potable. Los expedicionarios permanecieron en esta cabaña efectuando observaciones meteorológicas, estudios de magnetismo, trabajos de biología, estudios de astronomía, de mareas, observaciones del estado del hielo, relevamientos cartográficos y reconocimientos geológicos en el área. Inicialmente la campaña fue planeada para que durara un año, pero frente al hundimiento del Antarctic, debieron realizar una segunda invernada hasta ser rescatados finalmente en noviembre de 1903 por la corbeta argentina Uruguay comandada por el Teniente de Navío Julián Irizar.

Posteriormente al abandono de sus ocupantes, la cabaña Otto Nordenskjöld ha permanecido deshabitada y sin mantenimiento hasta 1979-1980 cuando el programa MUSEOANTAR, dependiente del Departamento de Museo e Historia del Instituto Antártico Argentino, adquirió el compromiso tomado por la república Argentina como país miembro del Tratado Antártico, de salvaguardar el patrimonio histórico del continente antártico en el área geográfica de su influencia (Comerci 1983, Capdevila 2000, Goldberg 2001). Por este motivo, la cabaña Otto Nordenskjöld fue designada co-

mo Sitio y Monumento Histórico N° 38 en el marco del Tratado Antártico, y es también Monumento Histórico Nacional declarado por Decreto del Poder Ejecutivo Nacional N° 6058 del año 1965. Desde entonces, en un esfuerzo bilateral entre Argentina y Suecia, se han desarrollado diversas tareas para reacondicionar el museo.

La cabaña también se encuentra sujeta a varias perturbaciones externas. Particularmente, su ubicación sobre un terraplén natural con permafrost rico en hielo en su interior, determina las condiciones inestables de fundación (Yermolin 2012) que se han manifestado en las últimas décadas principalmente por consecuencia del gradual aumento de la temperatura media anual y más precisamente un aumento de las temperaturas durante los veranos australes (Turner *et al.* 2005, 2007, 2009). Esto ha traído aparejado fenómenos de termokarst y termoerosión por aumento del descongelamiento estacional y fusión de los hielos subterráneos en el área del refugio (Yermolin 2012), haciendo peligrar la estabilidad de la infraestructura de la cabaña Otto Nordenskjöld.

Por lo mencionado, el objetivo del presente trabajo fue la realización de un estudio detallado de las condiciones actuales del techo del permafrost y de la capa activa debajo del terraplén sobre el cual se asienta la cabaña, y la búsqueda de soluciones para disminuir los riesgos asociados a la subsidencia del terreno.

## MARCO REGIONAL

Cerro Nevado (64°28'S, 57°14''O) se localiza hacia el este de la península Antártica, a 22,5 km al suroeste de la base Marambio (Isla Seymour) y a 10 km hacia el sureste de la isla James Ross (Fig. 1). Posee 341 km<sup>2</sup> de los cuales solamente 15 km<sup>2</sup> se encuentran libres de hielo. El resto está cubierto por un glaciar en domo denominado glaciar Nevado. A cotas cercanas al nivel del mar y sobre el estrecho de Bouchard, el relieve de la isla está representado por niveles aterrazados de entre 5 a 10 m de altura correspondientes a relictos de una morena de fondo, uno de

los cuales es asiento de la cabaña de Nordenskjöld (Yermolin 2012) (Fig. 2). Además se destaca la presencia de un nivel de planicie glaciifluvial elevado, el cual junto a las morenas está siendo erosionado por el desarrollo de la actual planicie glaciifluvial. Hasta la cota de 170 m, el relieve está constituido por pendientes empinadas (15-40°), fuertemente disectadas por profundos valles fluviales. Esta sección contiene abundantes niveles fosilíferos de origen marino, y se halla recorrida por diques basálticos de dirección NE-SO, los que constituyen resaltos topográficos importantes (Olivero *et al.* 2008) y son la fuente de los procesos de caída de rocas. A lo largo del área se reconocen estructuras de colapso sobre las diferentes geofor- mas, generadas por la fusión de los hielos intersticiales, por lo que pueden denominarse depresiones de termokarst.

El análisis de los datos de las variables meteorológicas de la base Marambio (a 200 m.s.n.m.) provistos por el Servicio Meteorológico Nacional desde 1970 hasta el 2015, indican que en la zona la temperatura media anual es de -8,5 °C, mientras que durante la estación de verano se eleva a -1,5 °C. La precipitación anual estimada es inferior a los 220 mm y el régimen del sistema hídrico superficial es variable durante la época estival, y depende de las condiciones meteorológicas, de la presencia del permafrost y de la actividad de los procesos criogénicos (Silva Busso *et al.* 2000, Yermolin y De Angelis 2002, Yermolin y Skvarca 2004). Por las condiciones mencionadas, el área se ubica en la zona de permafrost continuo (Bockheim 1995, Bockheim y Hall 2002, Yermolin y Silva Busso 2006), con un espesor de suelo congelado aproximado de 200 m (Fukuda *et al.* 1992) y espesores de capa activa variables entre 0,4-0,5 m y 1,5-1,6 m (Yermolin y Skvarca 2004).

## Marco geológico local

Estudios previos realizados por Yermolin (2012) sobre la base de la cabaña en la isla Cerro Nevado, evidencian la inestabilidad del terreno. El autor atribuye principalmente esta situación a que el terraplén está compuesto de materiales clásticos

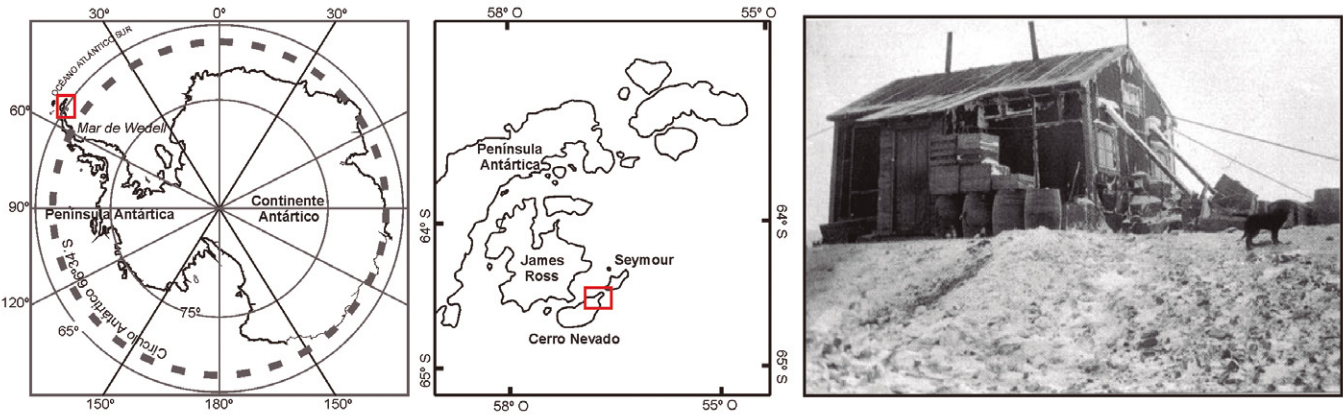


Figura 1: Ubicación del área de estudio y fotografía de la época de la cabaña de Otto Nordenskjöld.

de acarreo, los cuales se encuentran con una pendiente de desequilibrio y sometidos constantemente a la acción erosiva del agua superficial y supra-permafrost durante la época estival. A su vez, Yermolin (2012) indica que los depósitos del terraplén en la parte superior están compuestos por fracciones clásticas finas y medio gruesas con contenido de arena fina - limo y poca arcilla, mientras que en las secciones inferiores de la capa activa y el techo del permafrost se encuentran en general las fracciones más finas de arena media y fina con limo y arcilla. En las capas superficiales del permafrost se hallan los hielos intersticiales ocupando los espacios entre los sedimentos más gruesos. El contenido de los hielos subterráneos puede alcanzar el 17-20% y en algunas secciones aisladas el contenido de hielos intersticiales puede superar el 30% (Yermolin 2012).

El mismo autor destaca que la tendencia al incremento de la temperatura del aire y el aumento del espesor de descongelamiento estacional en este sector de la península Antártica durante las últimas décadas, ha favorecido los procesos de asentamiento del terreno en áreas de permafrost con hielos subterráneos, el cual afecta directamente a la estructura de la cabaña Museo Otto Nordenskjöld.

Por lo mencionado es que se hace imprescindible el estudio y monitoreo térmico del terraplén donde se ubica la cabaña Otto Nordenskjöld a fin de conocer el estado actual de la situación del terreno y buscar diferentes soluciones a futuro pa-

ra evitar daños sobre la misma, la cual tiene un valor histórico muy importante ya que representa los inicios de la investigación antártica argentina. Esta es una difícil tarea ya que no es posible el traslado de maquinarias ni de materiales de construcción a estas latitudes debido a la difícil y compleja logística, lo que conlleva a realizar las tareas de mitigación con elementos que pueden ser recuperados en el lugar.

## METODOLOGÍA

### Topografía detallada del terraplén

Debido a la ausencia de una topografía detallada del sector en estudio, durante la campaña antártica de verano 2014-2015 se relevaron, mediante la utilización de un GPS de mano y una brújula, 67 puntos acotados. Por la baja precisión que tienen estos equipos, se procedió a esperar varios minutos en la adquisición de cada punto a fin de reducir al máximo su error como así también a realizar cada toma con un espaciamiento que doblegara al del error estimado. Con ellos se construyó un mapa topográfico del terraplén de la cabaña.

La intención de poseer un mapa topográfico detallado es que sirva de base para referenciar aquellas tareas de reacondicionamiento sobre el terraplén que ya se han realizado como así también las futuras tareas que sobre él se realicen. Además, sirvió de base para el desarrollo de un modelo de elevación digital (DEM) del sitio, del cual se derivaron variables como la in-

clinación, orientación, radiación solar incidente, escorrentía superficial, curvatura total y posibles líneas de flujo superficial, en un ambiente de información geográfica (SIG). La elección de estas variables es porque dan indicios de estabilidad, exposición e intensidad de la radiación solar incidente, zonas de acumulación de agua y nieve y zonas favorables para el flujo del agua en estado líquido, respectivamente (Goyanes 2015). Es de destacar que la radiación solar incidente se calculó de forma teórica utilizando el software ArcGis (licencia otorgada por la Universidade de Lisboa), debido a la ausencia de datos en el terreno. Por ello debe ser considerada como un valor aproximado.

### Régimen térmico y espesor de capa activa y temperatura del aire

Con la finalidad de conocer la distribución de temperaturas del suelo en profundidad, se realizaron, durante el mes de enero del 2015, tres sondeos superficiales que alcanzaron el tope del permafrost. Dos se ubicaron sobre el terraplén de la cabaña Otto Nordenskjöld y uno fuera del mismo. El primero de ellos (BH1) se instaló al norte de la cabaña, sobre una superficie orientada hacia el mismo punto cardinal, y alcanzó los 0,68 m de profundidad. El segundo (BH2) fue instalado en una zona con claras evidencias de subsidencia sobre la ladera oeste del terraplén, alcanzando los 0,675 m de profundidad. Por último, la tercera perforación (BH3) fue realizada fuera del terraplén de la cabaña, a una distancia de

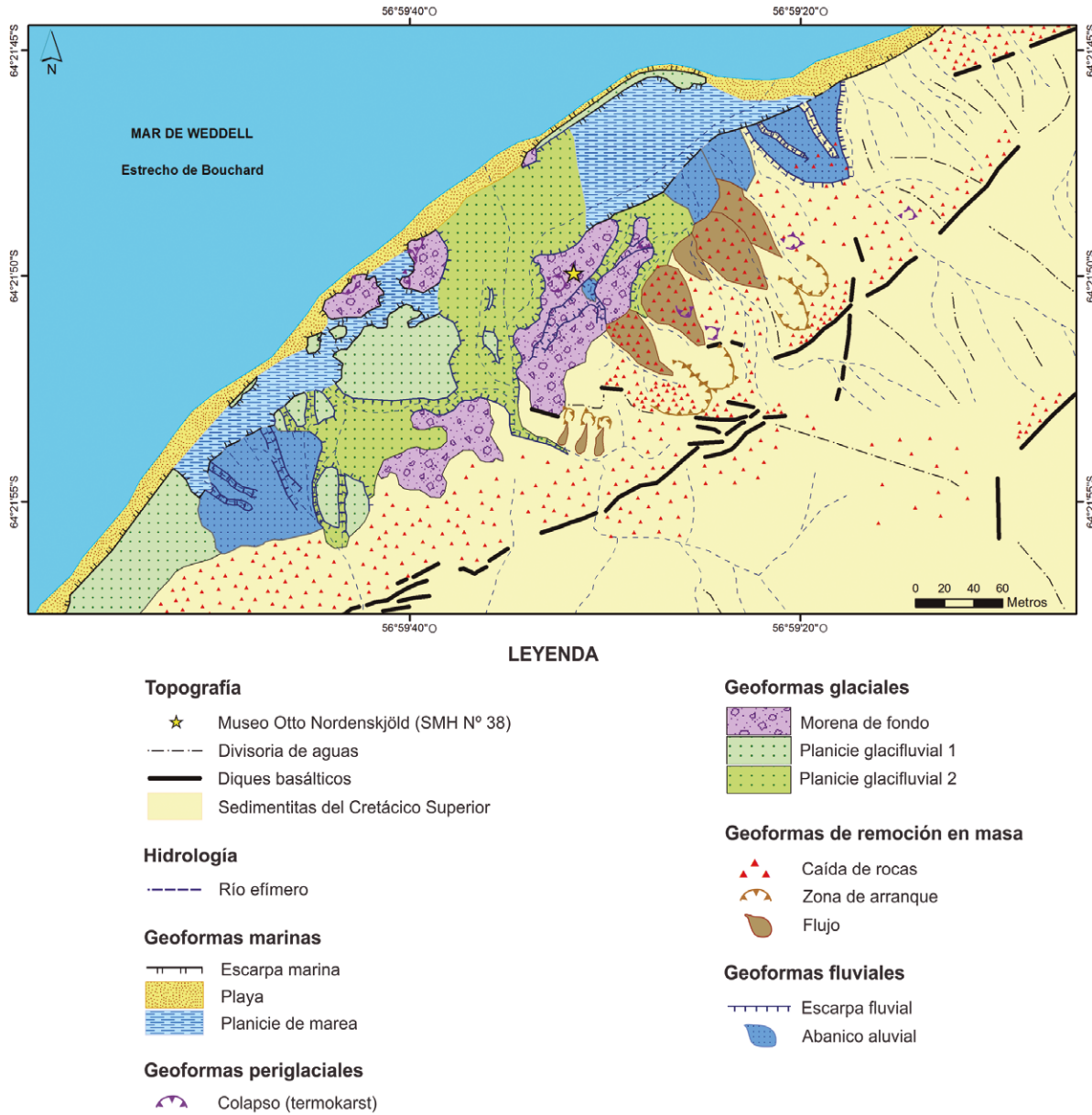


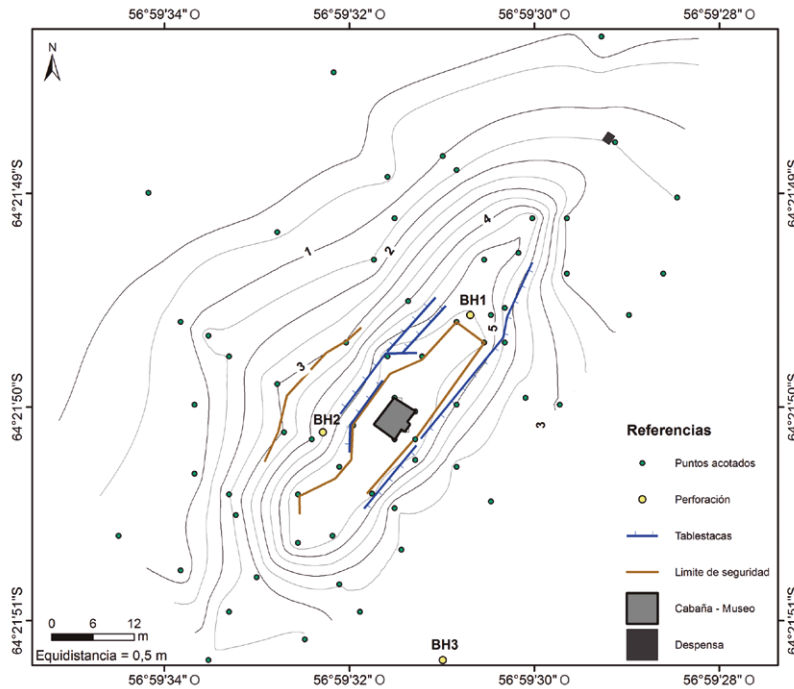
Figura 2: Mapa Geomorfológico del sector de emplazamiento del museo Otto Nordenskjöld.

34 m hacia el sureste, sobre otro relicto de la misma morena de fondo y con una profundidad de 0,62 m, con la finalidad de poder efectuar un análisis comparativo. Todos los sondeos fueron realizados utilizando un barrenado manual y se han colocado dentro tubos de PVC sellados en sus extremos para evitar el ingreso de agua y la circulación del aire (Guglielmin *et al.* 2012). En cada uno de ellos se realizó la medición diaria de la temperatura del suelo a dos profundidades utilizando un termistor WTS271 (con una precisión de 0,2 °C), desde el 10 de enero hasta el 1

de febrero del 2015, tiempo que duró la campaña antártica en el lugar. A futuro se espera poder instalar, dentro de los sondeos, sensores de temperatura a diferentes profundidades, que permitan conocer la evolución diaria de la temperatura del subsuelo a lo largo del año. Con el objetivo de caracterizar el estado térmico de la capa activa y del techo del permafrost a lo largo de toda la superficie, utilizando el mismo termistor, se midió la temperatura a 2,5, 50 y 70 cm de profundidad en 38 puntos conformando una grilla irregular. En cada uno de ellos,

además se midió de forma mecánica el espesor de capa activa utilizando una cruz de hierro graduada, la cual se inserta en el terreno hasta alcanzar el techo del suelo congelado. Con los datos obtenidos se construyeron mapas de la distribución de temperaturas a esas profundidades y del espesor de capa activa utilizando el método de interpolación de vecino más próximo (Hinkel y Nelson 2003, Mazhitova *et al.* 2004, Guglielmin 2006). Con la finalidad de estudiar la interacción entre la atmósfera y el suelo, se midió con un termómetro digital RS-206-3722 (con





**Figura 3:** Mapa topográfico del terraplén sobre el que se construyó la cabaña junto a las infraestructuras, la ubicación de los puntos acotados relevados y la ubicación de los sondeos realizados durante la campaña de verano 2014-2015. El límite de seguridad corresponde a aquel delimitado para la aproximación de los turistas a las laderas. Además se presenta la ubicación de las tres perforaciones superficiales realizadas.

una precisión de 0,2 °C) la temperatura del aire entre el 10 de enero y el 1 de Febrero del 2015. A fin de que sea representativa esta información, se tomaron los datos a la mañana, en horas del mediodía y por la tarde, para luego calcular el valor medio diario.

## RESULTADOS

### Topografía y relevamiento de las tareas de mantenimiento ya realizadas

Mediante la interpolación de los 67 puntos acotados utilizando el método de vecino más próximo, se obtuvo un DEM con un tamaño de pixel de 2x2m, cuyos valores extremos van desde 0 m al nivel del mar hasta valores superiores a los 6 m sobre la superficie del terraplén. El mismo permitió la construcción del mapa topográfico a escala 1:600 con una equidistancia entre curvas de nivel de 0,5 m (Fig. 3). Sobre esta base, se mapearon tablestacas de aluminio instaladas desde 1980 hasta el presente, las cuales están aferradas al suelo mediante estacas y han servido de contención al relleno de materiales gla-

ciofluviales efectuado (Figs. 3 y 4). Se reconocen dos sectores donde se han realizado trabajos de contención, uno al N-NO y otro al NE-E-SE de la cabaña. En ambos las tablestacas de contención se disponen con dirección NE pero con inclinaciones contrarias, al NO y SE respectivamente, buscando de rellenar y expandir la superficie sobre la que se apoya la estructura de la cabaña ON. En algunos tramos de esta contención, puede observarse cómo la tablestaca ha quedado desconectada de la superficie (situación inestable) debido a la remoción natural del relleno, como es el caso de aquella ubicada al N (Fig. 4-b).

Del análisis de las variables derivadas del DEM, se observa que las mayores pendientes ocurren sobre los márgenes del terraplén, siendo más pronunciadas en áreas reducidas al NE, SO, SE y N de la cabaña (Fig. 5). Esta última coincide con la zona de déficit del relleno (tablestaca expuesta), mencionado anteriormente. Por el contrario la parte superior de la morena de fondo y sus alrededores presentan las menores inclinaciones (0-5°).

Las observaciones realizadas sobre el histograma de frecuencias respecto a las orientaciones de las superficies evidencian el predominio de aquellas situadas hacia el NO, seguidas por las orientadas al O y en menor medida al N (Fig. 5).

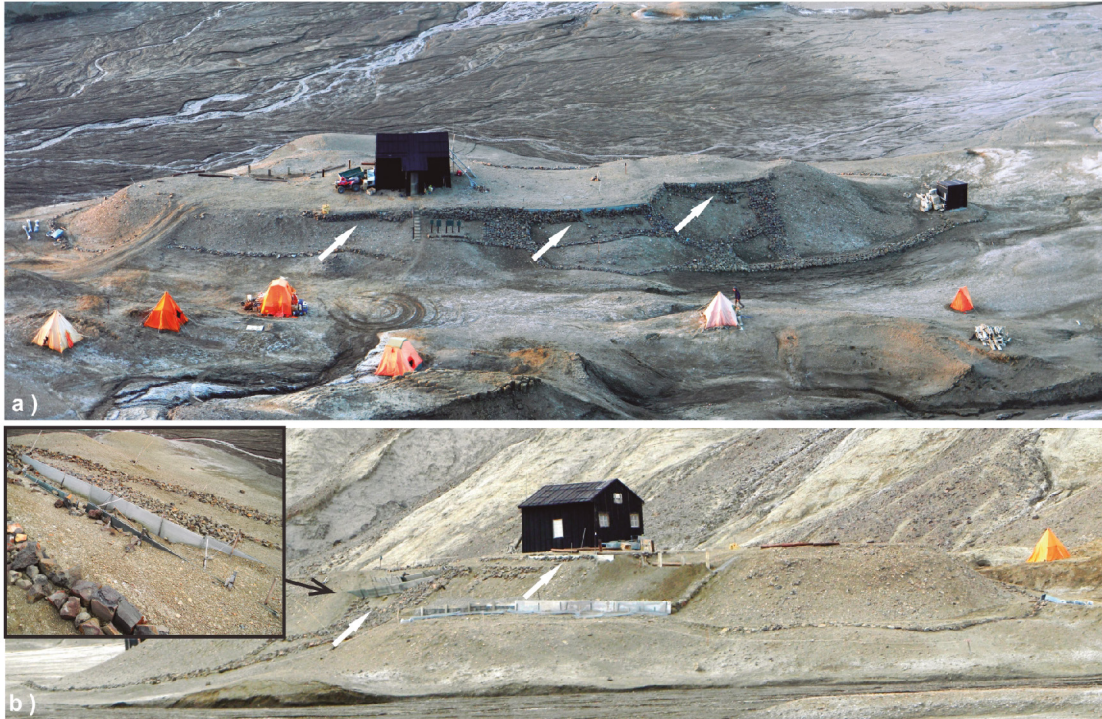
Sobre la ladera oeste del terraplén se hayan los mayores valores de radiación, mientras que sobre la ladera sur, debido al reparo del mismo, se encuentran los valores más bajos (Fig. 5). Asimismo, sobre la ladera occidental existen tres focos puntuales donde la radiación es máxima, que coinciden con la parte norte del terraplén, con la zona donde las tablestacas están expuestas y con la depresión ubicada al sudoeste de la cabaña.

Del análisis del mapa de curvatura total se observa que la superficie superior del terraplén es más bien convexa y que sobre la ladera N-SO existen numerosos sectores cóncavos (Fig. 5). Estos últimos son propensos a acumular espesores de nieve que superan los 2 m, como fue corroborado durante el relevamiento de campo en la campaña de verano 2014-2015. Rasgo destacable es ver como en el sector donde la tablestaca de contención se haya expuesta debido a la remoción del material de relleno se encuentra representado por una concavidad en el terreno. Así también al sudoeste de la cabaña se destaca una gran concavidad, la cual también se advierte por una vaguada en las curvas de nivel.

Por último, utilizando las herramientas de *flow direction* y *flow accumulation* en ArcGis, se aproximaron las posibles líneas de drenaje superficiales (Fig. 5). De esta aproximación se desprende que la única y mayor línea de flujo que se encuentra cerca del área de la cabaña presenta su nacimiento en la concavidad situada al oeste de la misma, la que fuera mencionada anteriormente.

### Régimen térmico y espesor de capa activa y temperatura del aire

La temperatura media del aire medida desde el 10 de enero al 1 de febrero del 2015 en la cabaña Otto Nordenskjöld, presentó un valor medio de 3,6 °C, un máximo de 10,1 °C y una mínima de -2,4



**Figura 4:** Terraplén del Museo Otto Nordenskjöld, las flechas blancas indican la posición de las antiguas tablestacas verticales. a) Vista desde el este; b) Vista desde el suroeste. El detalle muestra la tablestaca expuesta debido a la remoción natural del relleno.

°C. Por su parte, en el mismo intervalo de tiempo de medición, en el sondeo BH1 se registró una temperatura media de 3,1 °C a 18 cm de profundidad y de -0,04 °C a los 68 cm, con máximas de 8,4 °C y 1,4 °C y mínimas de -1,9 °C y -1,3 °C, respectivamente. Para BH2 se obtuvo una temperatura media de 1,3 °C a 17,5 cm de profundidad y de -0,6 °C a los 67,5 cm, con máximas de 4,3 °C y 0,2 °C y mínimas de -1,7 °C y -1,4 °C, respectivamente. En BH3 se obtuvieron valores de temperatura media de 3,8 °C a 11,8 cm de profundidad y de -1,2 °C a los 61,8 cm, con máximas de 10,9 °C y -0,02 °C y mínimas de -1,5 °C y -1,7 °C, respectivamente. Las temperaturas medidas muestran la correlación entre la temperatura del aire y la de los sondeos BH1 y BH3, como así también el comportamiento diferente de BH2 (Cuadro 1, Fig. 6). La diferencia en los días en los cuales se alcanzan las temperaturas máximas y mínimas evidencian los valores diferentes de conductividad térmica del suelo en cada sector. A su vez, se destaca como la temperatura inferior en las tres perforaciones se encuentra por debajo de 0 °C y no muestra correlación directa con las variaciones diarias en la temperatura del aire. Solamente la

parte profunda de BH1 parecería mostrar buena correlación con la tendencia al aumento de la temperatura del aire observada hacia el final del intervalo de medición.

El régimen de temperaturas en BH2 puede dividirse en dos sectores de acuerdo a su comportamiento. El primero de ellos desde el inicio de toma de datos (10 de enero) y hasta el 19 de enero, donde la temperatura superior del sondeo se comporta de igual forma que la del aire; y el segundo período desde el 20 de enero hacia delante, donde se comienza a disipar lentamente esta correlación (Fig. 6). Los resultados de la interpolación de los 38 puntos de la medición de la temperatura superficial, evidencian que los mayores valores se ubican sobre la ladera NE-SO del terraplén con un punto más cálido situado en la zona donde la tablestaca está descubierta (13,5-15,5 °C) (Fig. 7). Por el contrario, los valores más bajos (5,5-7,5 °C) se hayan sobre la superficie superior y la pendiente NE del mismo. Al analizar los valores hallados a 10 cm de profundidad, se observa que la distribución de temperaturas recién mencionada se mantiene, siendo de 1-2 °C los valores más bajos y de 12-13 °C los más elevados (Fig. 7).

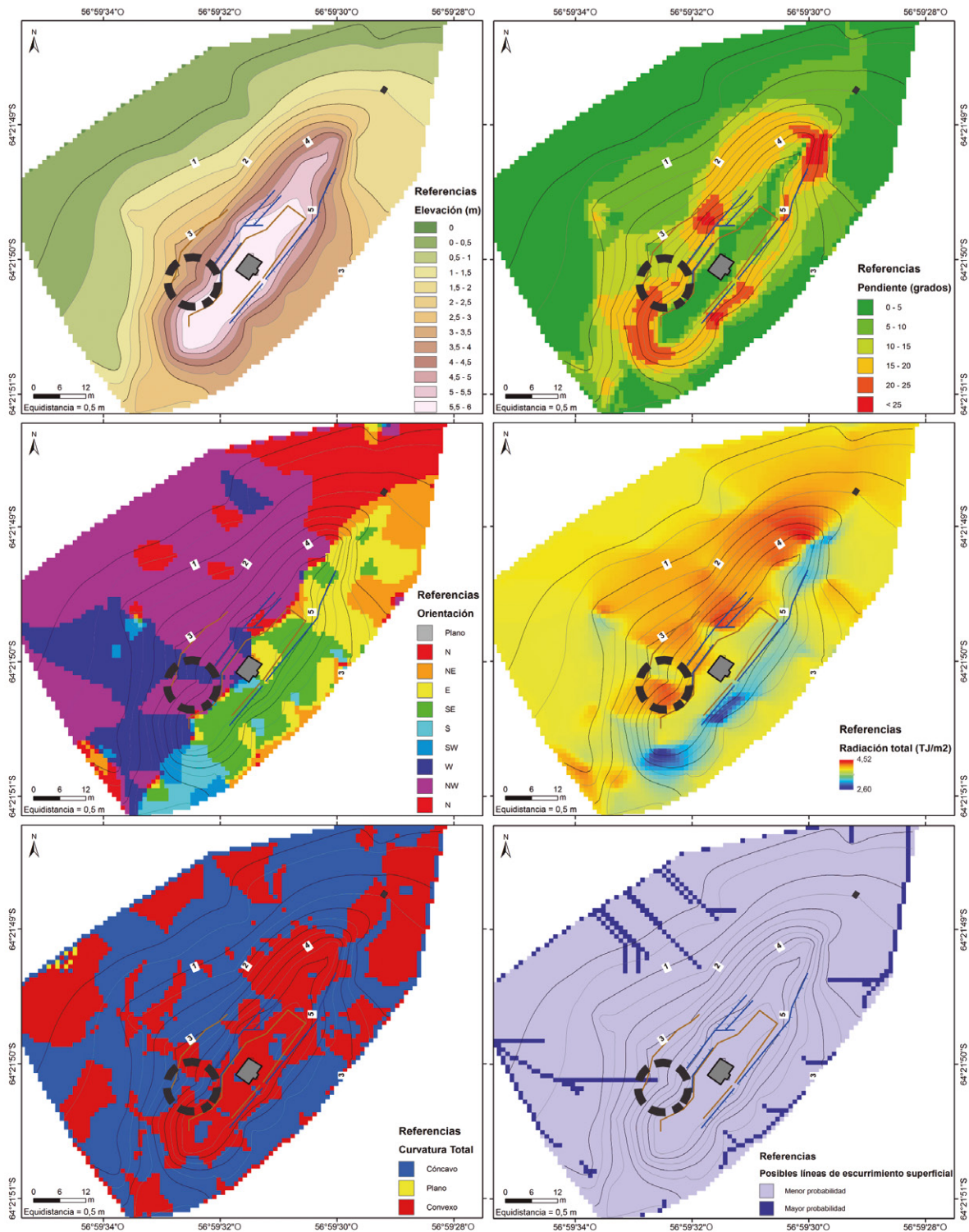
A diferencia de la anterior, la zona ubicada al norte del terraplén evidencia altos valores de temperaturas y la franja de la parte superior del mismo con los valores más bajos se ha extendido hacia la depresión localizada al SO de la cabaña. Por su parte, la distribución de temperaturas a 50 cm de profundidad muestra el patrón mencionado para los 10 cm, acentuando aún más la franja de bajas temperaturas (Fig. 7). En este caso la amplitud de valores es de entre -1- -0,5 °C a 2-2,5 °C.

El análisis de la distribución del espesor de capa activa nos muestra que los menores valores (0,43-0,48 m) se disponen sobre una franja NE-SO sobre la ladera este del terraplén, con la menor profundidad hallada hacia el NE y al sur de la cabaña sobre la superficie superior (Fig. 7). Por el contrario, los mayores valores (0,78-0,83 m) se disponen de igual forma pero sobre la ladera oeste del mismo con focos puntuales de mayor profundidad en la zona donde la tablestaca está al descubierto.

## DISCUSIÓN

Las observaciones realizadas en el registro de la temperatura del aire desde 1970 hasta el 2015, medidas por el Servicio Me-





**Figura 5:** Diferentes variables derivadas del DEM. Para una rápida visualización y ubicación se encuentra el mapa topográfico sobre cada una de las variables. Las líneas punteadas encierran la principal estructura de colapso mencionada en el texto.

teorológico Nacional en Base Marambio, evidencian una tendencia al incremento en la temperatura media del aire durante el verano para el sector analizado, aun-

que es de destacar que para los últimos años se ve el comienzo de una tendencia negativa que debe ser monitoreada detalladamente (Fig. 8). Este aumento, po-

dría acentuar los procesos de subsidencia por termokarst debido a la fusión del permafrost rico en hielo e incrementaría la cantidad de agua supra-permafrost ge-

**CUADRO 1:** Temperaturas medias, máximas y mínimas del aire y del suelo a diferentes profundidades dentro de los sondeos.

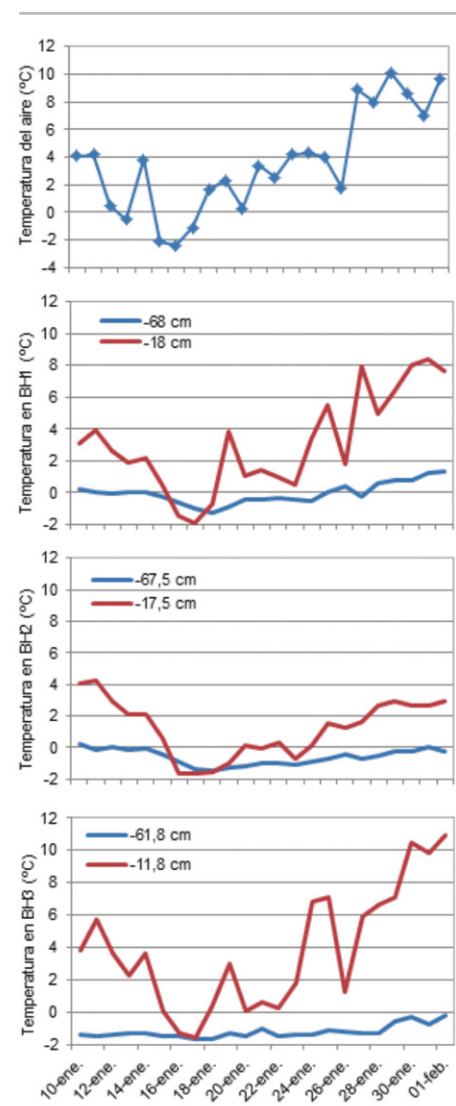
	BH1			BH2			BH3							
	Aire	Fecha	18 cm	Fecha	68 cm	Fecha	17,5 cm	Fecha	67,5 cm	Fecha	11,8 cm	Fecha	61,8 cm	Fecha
Media	3,6		3,1		-0,04		1,3		-0,6		3,8		-1,2	
Max	10,1	29-Ene	8,4	31-Ene	1,4	1-Feb	4,3	11-Ene	0,2	10-Ene	10,9	1-Feb	-0,2	1-Feb
Min	-2,4	16-Ene	-1,9	17-Ene	-1,3	18-Ene	-1,7	16-Ene	-1,4	18-Ene	-1,5	17-Ene	-1,7	18-Ene

nerando procesos de termoerosión (U.S. Arctic Research Commission Permafrost Task Force 2003, United Nations Environment Programme 2012), poniendo en peligro la estabilidad de la cabaña Otto Nordenskjöld. Por ello es que se hace imprescindible la continuidad de trabajos orientados al estudio de la estabilidad del terraplén, de forma de diseñar y aplicar medidas de mitigación (United Nations Environment Programme 2012).

La información proporcionada por los tres sondeos superficiales evidencia el control ejercido por la temperatura del aire sobre la temperatura superficial del suelo, mostrando ambos las mismas variaciones diurnas (Fig. 6). Por el contrario, la parte profunda se encuentra por debajo de los 0 °C durante el intervalo analizado y no evidencia estas variaciones diarias. Además, si consideramos el relevamiento realizado mecánicamente del espesor de capa activa, consideramos que este comportamiento diferencial se debe a la presencia del tope del permafrost a esta profundidad (French 2007). Como se observa en la figura arriba mencionada, los sondeos BH1 y BH3 presentan igual comportamiento pese a encontrarse en dos sectores diferentes de la misma morena de fondo, lo que evidenciaría un patrón regional de respuesta del subsuelo frente a las condiciones climáticas. Mención especial merece el comportamiento del sondeo BH2, el cual será tratado más adelante en esta sección.

El análisis de las diferentes variables derivadas del DEM permite identificar aquellas zonas más susceptibles a la degradación de los suelos congelados dentro del área de estudio (Fig. 5). Se deduce que la cara del terraplén con orientación NE-SO e inclinación hacia el O es la que sufrirá las mayores consecuencias debido a que sobre ella se hayan los mayores valores de radiación solar incidente por el

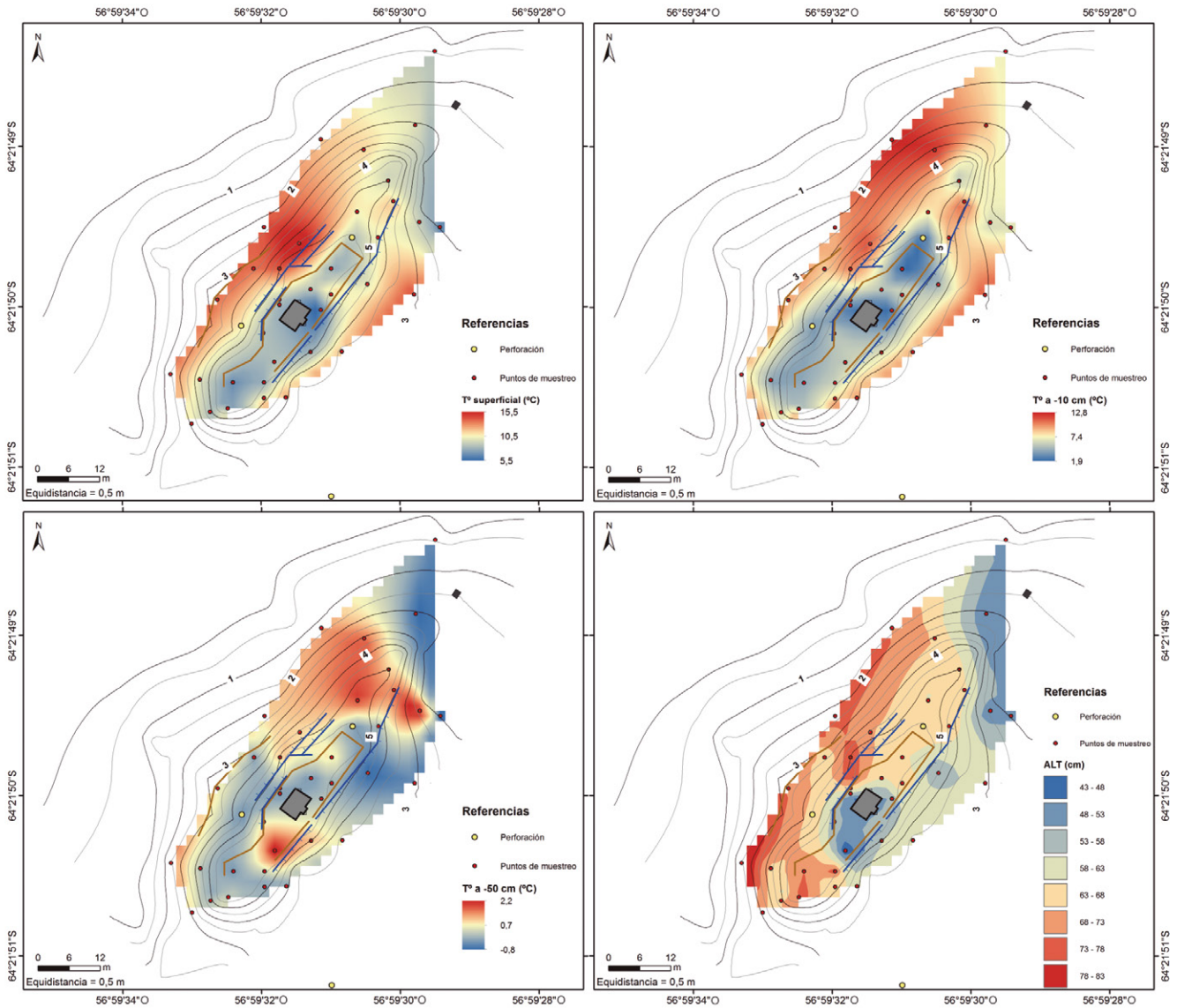
dominio de las superficies con exposición al NE y N. Los resultados alcanzados mediante el estudio de la distribución de temperaturas del suelo en profundidad y del espesor de capa activa confirman esta suposición, encontrándose las mayores temperaturas y espesores de descongelamiento sobre la ladera ubicada al oeste de la cabaña Otto Nordenskjöld (Fig. 7). Sin embargo, debido a las irregularidades del terreno, la ladera no respondería uniformemente frente a estos parámetros. De aquí radica la importancia de la realización de relevamientos topográficos de detalle (U.S. Arctic Research Commission Permafrost Task Force 2003). En la zona de estudio se reconocen dos áreas dentro de la pendiente oeste del terraplén del museo, caracterizadas por ser vaguadas, ubicadas al norte y al sudoeste de la cabaña Otto Nordenskjöld (Fig. 3). La primera de ellas se corresponde con la zona donde la tablestaca se haya expuesta debido a la removilización del relleno (Fig. 4-b), mientras que la segunda se asocia a una depresión originada por subsidencia (termokarst) (Fig. 9). Ambas están caracterizadas por pendientes mayores a los 25° y su exposición hacia el oeste y su forma cóncava favorecen la acumulación de nieve durante las tormentas (Yermolin 2012). Posteriormente a estas, la fusión genera el drenaje de agua en estado líquido por las posibles líneas de flujo (Fig. 5), transfiriendo calor al entorno y acelerando la fusión del permafrost en profundidad (Adlam *et al.* 2010). De esta manera, se incrementarían los procesos de subsidencia. Este proceso se torna aún más riesgoso, ya que como lo indican los menores espesores de capa activa en ambos sitios y las bajas temperaturas a 0,5 m de profundidad, el techo del permafrost se sitúa a poca profundidad, quedando prácticamente expuesto a los procesos superficiales.



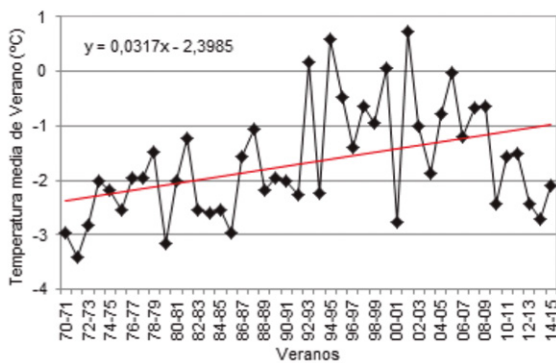
**Figura 6:** Temperatura del aire y la obtenida desde los sondeos superficiales a diferentes profundidades desde el 10 de Enero hasta el 1 de febrero del 2015.

Debido a la proximidad de estas áreas susceptibles al colapso de la cabaña Museo Nordenskjöld (aprox. 6 m), se hizo imprescindible el desarrollo de tareas de mitigación. Por tal motivo, durante la campaña de verano 2014-2015, se comenzó con el relleno de estos sectores, de forma de: (1) elevar la cota del terreno, (2) impedir que la penetración de las temperatu-





**Figura 7:** Distribución espacial de las temperaturas a diferentes profundidades en el terraplén, junto al espesor de capa activa medido.



**Figura 8:** Tendencia en la temperatura del aire durante la estación de verano de acuerdo a los datos provenientes de la base Marambio, desde 1970 hasta la actualidad.

ras del aire superiores a los 0 °C durante el verano alcancen el núcleo de hielo y lo degraden, (3) de intentar de aumentar el es-

pesor de suelos congelados, y (4) suavizar la irregularidad de la superficie evitando la acumulación de nieve. Con la fina-

lidad de evitar que este relleno se movilice ladera abajo por diferentes procesos, como fuera mencionado para el norte de la cabaña donde la tablestaca está expuesta, se construyeron gaviones tipo colchón o saco con alambre de tejido romboidal galvanizado (3 mm de espesor) (Figs. 9 y 10). La base de los mismos está constituida por una capa de bloques basálticos decimétricos debido a que se busca la circulación del aire frío por los mismos. Hacia arriba el relleno se realizó con depósitos de till correspondientes a otras morenas de fondo del área, ya que este tipo de sedimento heterogéneo es más favorable para el desarrollo de hielo de segregación



**Figura 9:** Detalle de la zona con subsidencia debido a procesos de termokarst al sudoeste de la cabaña, antes y después de los trabajos de mitigación.

(French 2007), favoreciendo la estabilización de la ladera. Estos “gaviones horizontales” fueron reforzados con tablas metálicas verticales en su extremo inferior de forma de evitar su movilización ladera abajo.

Los trabajos de relleno, que comenzaron el día 18 de Enero del 2015 elevaron la cota media de la ladera en 0,5 m y en el sector donde se ubica el sondeo BH2 lo hizo en 0,4 m. Como puede observarse en la figura 6, la temperatura a los 0,68 m de profundidad del sondeo a partir de esa fecha, ya no presenta el comportamiento diurno similar al de la temperatura del aire que tenía anteriormente, sino que dichas variaciones se atenuaron drásticamente.

Para saber si las tareas de mitigación han sido correctas se recomienda un monitoreo térmico a largo plazo, pero inicialmente puede decirse que han surgido efecto. Para corroborar estos resultados, en futuras campañas de verano se planean realizar nuevas mediciones en el sondeo BH2 a las mismas profundidades, buscando encontrar que el techo del permafrost haya ascendido algunos centímetros o por lo menos haya frenado su descenso.

## CONCLUSIONES

El análisis de la tendencia de la tempera-

tura del aire, en la región noreste de la península Antártica, evidencia un calentamiento que se ve reflejado en el desarrollo de geofomas asociadas a la degradación del permafrost rico en hielo en profundidad. Debido a la presencia de infraestructuras con un elevado valor histórico en superficie, como la cabaña Museo Otto Nordenskjöld, se hace imprescindible la realización de tareas enfocadas a la caracterización geomórfica-térmica a fin de comenzar rápidamente con las tareas de mitigación y/o protección. El estudio de la distribución de temperaturas y del espesor de capa activa sobre el terraplén de asentamiento de la cabaña Otto Nordenskjöld, junto al análisis de diferentes variables en un ambiente SIG, ha mostrado ser una herramienta con potencial para tal fin.

En la zona del museo de Otto Nordenskjöld, los resultados evidenciaron la mayor degradación de la ladera oeste del terraplén debido a la exposición a la radiación solar incidente. La misma favorece el desarrollo de procesos de subsidencia de la superficie por fusión de los hielos enterrados, los cuales se hayan a poca profundidad. Conjuntamente, estos sitios acumulan potentes espesores de nieve que, al mejorar las condiciones climáticas se funden y aportan al aumento de

las aguas supra-permafrost. Estas aguas al presentar mayores temperaturas que el suelo congelado, favorecen la termoerosión del mismo. Frente a un potencial panorama de degradación donde se ubica la cabaña Otto Nordenskjöld, en la campaña de verano 2014-2015 se realizaron tareas tendientes a suavizar la topografía de la ladera oeste del terraplén, de forma de elevar la cota del terreno y de eliminar las posibles concavidades donde se acumula la nieve. Esta metodología de trabajo en principio arrojó buenos resultados, los cuales serán corroborados en las siguientes campañas antárticas.

Es de destacar, la necesidad de realización de relevamientos topográficos detallados utilizando metodologías más precisas de forma de alcanzar mayores resoluciones lo que traerá aparejado mejores resultados.

## AGRADECIMIENTOS

Estas investigaciones forman parte del estudio interdisciplinario llevado a cabo por Argentina y Suecia, enmarcados en el programa MUSEOANTAR. Asimismo las tareas científicas son parte de los proyectos: “Características de la relación permafrost-hidrogeología e influencia del cambio climático en áreas de crio-

peg y talik en el norte de la Península Antártica” (PICT-O-2010-0122) financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, “Estudio volcanológico y geomorfológico de volcanes activos en Antártida y los Andes” (PICT-A/2010-0092) financiado por la Dirección Nacional del Antártico (DNA) y “PERMANTAR-3” (PTDC/AAG-GLO/3908/2012) financiado por la Fundação para a Ciência e a Tecnologia, República de Portugal.

Agradecemos a la Dirección Nacional del Antártico y al Programa Polar Portugués (PROPOLAR) por la posibilidad de realizar trabajos en el continente Antártico y al personal militar de la base “Marambio” quienes nos proveyeron de la logística en la isla. Asimismo agradecemos al personal del Ejército Argentino con quienes hemos realizado las tareas de protección en el museo durante la pasada CAV 2014-2015.

Los autores también agradecen los comentarios y sugerencias de los revisores y el editor, los cuales mejoraron la calidad y presentación de este trabajo.

Los editores agradecen el trabajo de los revisores Alejandro E. Celli y Miguel de Pablo Hernández.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Adlam, L.S., Balks, M.R., Seybold, C.A. y Campbell, D.I. 2010. Temporal and spatial variation in active layer depth in the McMurdo Sound Region, Antarctica. *Antarctic Science* 22: 45-52.
- Bockheim, J. 1995. Permafrost distribution in Southern circumpolar region and its relation to the environment: a review and recommendations for further research, *Permafrost and Periglacial Processes* 6: 27-45.
- Bockheim, J. y Hall, K. 2002. Permafrost, active-layer dynamics and periglacial environments of continental Antarctica. *South African Journal of Science* 98: 82-90.
- Capdevila, R. 2000. Programa Museoantar 1992-1994 (informe de progreso): la cabaña sueca de la Isla Cerro Nevado. Contribución N° 451 del Instituto Antártico Argentino, 14 p., Buenos Aires.
- Comerci, S.M. 1983. Los trabajos de la República Argentina en la isla Cerro Nevado durante las campañas antártica 1979-1980 y 1980-1981. Contribución N° 291 del Instituto Antártico Argentino, 12 p., Buenos Aires.
- French, H. 2007. *The Periglacial Environment*. John Wiley & sons Ltd., 480 p., Oxford.
- Fukuda, M., Strelin, J., Shimokawa, K., Takahashi, N., Sone, T. y Trombotto, D. 1992. Permafrost occurrence of Seymour Island and James Ross Island, Antarctic Peninsula region. En: Yoshida et al. (eds.), *Recent Progress in Antarctic Earth Sciences*. Terrapub, 745-750, Tokyo.
- Goldberg, F., Wiklander, L. y Capdevila, R. 2001. The Swedish hut in Antarctica. Mohlin and Reppen, PAGINAS, Estocolmo.
- Goyanes, G. 2015. Control climático e interacciones permafrost-volcanismo en isla Decepción, Antártida. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Buenos Aires (inédita), 317 p., Buenos Aires.
- Guglielmin, M. 2006. Ground surface temperature (GST), active layer, and permafrost monitoring in continental Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes* 17: 133-143.
- Guglielmin, M., Worland, M.R. y Cannone, N. 2012. Spatial and temporal variability of ground surface temperature and active layer thickness at the margin of maritime Antarctica, Signy Island. *Geomorphology* 155/156: 20-33.
- Hinkel, K.M. y Nelson, F.E. 2003. Spatial and temporal patterns of active layer thickness at Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) sites in northern Alaska, 1995–2000. *Journal of Geophysical Research* 108, doi: 10.1029/2001JD000927.
- Mazhitova, G., Malkova (Ananjeva), G., Chestnykh, O. y Zamolodchikov, D. 2004. Active-layer spatial and temporal variability at European Russian Circumpolar-Active-Layer-Monitoring (CALM) sites. *Permafrost and Periglacial Processes* 15: 123-139.
- Olivero, E., Ponce, J.J. y Martinioni, D. 2008. Sedimentology and architecture of sharp-based tidal sandstones in the upper Marambio Group, Maastrichtian of Antarctica. *Sedimentary Geology* 210: 11-26.
- Silva Busso, A., Sánchez, R. y Fresina, M. 2000. Caracterización del Comportamiento Hidrogeológico en la Isla Marambio, Antártida. Primer Congreso Mundial Integrado de Aguas Subterráneas, ALSHUD.AIH 292 (en CD), 21p., Fortaleza.
- Turner, J., Colwell, S.R., Marshall, G.J., Lachlan-Cope, T.A., Carleton, A.M., Jones, P.D., Lagan, V., Reid, P.A. y Iagovkina, S. 2005. Antarctic climate change during the last 50 years. *International Journal of Climatology* 25: 279-294.
- Turner, J., Overland, J.E. y Walsh J.E. 2007. An Arctic and Antarctic perspective on recent climate change *International Journal of Climatology* 27: 277-293.
- Turner, J., Bindschadler, R. y Convey, P. 2009. Antarctic climate change and the environment. *Scientific Committee on Antarctic Research*, 23 p., Cambridge.
- United Nations Environment Programme 2012. Policy Implications of Warming Permafrost report. Report, United Nations Environment Programme, 38 p., Nairobi.
- U.S. Arctic Research Commission Permafrost Task Force 2003. Climate Change, Permafrost, and Impacts on Civil Infrastructure. Special Report 01-03, U.S. Arctic Research Commission, 72 p., Arlington.
- Yermolin, Y. 2012. Estado actual y propuesta para la preservación del Patrimonio Histórico del Museo Nordenskjöld, Cerro Nevado, Antártida. Informe técnico del IAA-DNA para el MUSEOANTAR (inédito), 23 p., Buenos Aires.
- Yermolin, E. y De Angelis, H. 2002. Procesos exógenos en el permafrost de la isla Marambio (Seymour), Península Antártica. 15° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 463-469, Buenos Aires.
- Yermolin, Y. y Skvarca, P. 2004. Estudio de las variaciones de la capa activa en isla Marambio. V° Simposio Argentino y I° Latinoamericano sobre Investigaciones Antárticas: 4 p., Buenos Aires.
- Yermolin, E. y Silva Busso, A. 2006. Mapa y caracterización geocriológica del área de la Base Esperanza, Península Antártica. Tercer Congreso de la Ciencia Cartográfica y X Semana Nacional de la Cartografía, 11p., Buenos Aires.
- Yermolin, E. y Silva Busso, A. 2007. Desarrollo determokarst y aguas subterráneas en Bahía Esperanza, Península Antártica. VI Simposio Argentino y III latinoamericano sobre investigaciones antárticas, 5 p., Buenos Aires.

Recibido: 2 de noviembre, 2015

Aceptado: 6 de septiembre, 2016