

PERMATHERMAL

SERIE TEMPORAL

MONITORIZACIÓN TÉRMICA
DE SUELOS CONGELADOS EN
LAS ISLAS LIVINGSTON Y
DECEPCIÓN, ANTÁRTIDA.



Mantenimiento de las estaciones
PT y CALM para el control del
permafrost y la capa activa en las
islas Livingston y Decepción,
Antártida.

Informe de campaña 2023-24



Miguel Ángel de Pablo Hdez.

Unidad de Geología. Facultad de Ciencias.



**Dpto. de Geología, Geografía y Medio Ambiente.
Unidad de Geología.**

Fecha de publicación: Abril 2024

Publicado por Miguel Ángel de Pablo

Este documento puede ser distribuido libremente bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0):

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Datos de contacto:

Dr. M.A. de Pablo. Unidad de Geología. Dpto. de Geología, Geografía y Medio Ambiente. Edificio de Ciencias. Campus Científico-Tecnológico. Universidad de Alcalá.

Ctra. A-II PK 33,600. 28871 Alcalá de Henares, Madrid. España.

Tel: (+34) 91 885 4960 / Fax: (+34) 91 885 5090

Correo-e: miguelangel.depablo@uah.es

Aviso: Este documento es un *Informe Técnico* y la información que contiene es el resultado del conocimiento y experiencia profesional y científica del equipo investigador, y está basada en los datos disponibles. Los autores no se hacen responsables del mal uso de la información contenida en este documento, ni de las aplicaciones que terceros realicen a partir de la información, datos, resultados y conclusiones aquí presentadas.

Esta campaña de mantenimiento de la serie temporal PERMATHERMAL ha sido financiada por el Comité Polar Español a través de la Unidad de Tecnología Marina del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Dicha financiación se gestionado a través de un contrato Art.60 Ley Orgánica 2/2023 de 22 de marzo del Sistema Universitario (ref. 2023/068 y código 2023/00117/001), que ha tenido por objeto la realización de las actuaciones correspondientes.

Cite este documento como:

de Pablo, M.A. 2024. Maintenance of PT and CALM stations for permafrost and active layer monitoring on Livingston and Deception Islands, Antarctica. 2023-24 campaign report. (in Spanish). ACMA-Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España. 72 pp. DOI: 10.5281/zenodo.10927583.

Foto de portada y contraportada: Vista del glaciar Hurd, desde la cima del Monte Reina Sofía en isla Livingston, Archipiélago del las Shetlant del Sur, Antártida.

Equipo investigador



Redes internacionales



Financiación y logística



Colaboradores



CONTENIDO

Introducción.....	1
Mirando al futuro.....	1
Los inicios de la red	2
La estandarización.....	4
La red	5
La reinstrumentalización	6
Nuevos retos	8
La campaña 2023-24.....	9
Estaciones	11
Localización.....	11
Parámetros	14
Mediciones.....	16
Mantenimiento	17
Datos.....	17
Instrumentación.....	21
Estaciones PT.....	21
Dispositivos de medida.....	21
Temperatura del aire	23
Temperatura de la superficie	23
Temperatura del terreno	24
Espesor de nieve.....	25
Flujo térmico	25
Estaciones termométricas automáticas	26
Estaciones CALM	26
Espesor de la capa activa	27
Temperatura del techo del permafrost	27
Temperatura superficial distribuída.....	28
Espesor de cubierta nival distribuída	28

Otros instrumentos	29
Cámaras fenomenológicas	29
Estación nivométrica	29
Humedad del terreno	31
Movimientos del terreno	32
Campaña antártica 2023-24	35
Desarrollo de la campaña	35
Desarrollo general	35
Personal investigador	35
Calendario de campaña	36
Condiciones meteorológicas	37
Desarrollo de las tareas	37
Consecución de objetivos	39
El estado de las estaciones y mantenimientos realizados	40
Cambios de instrumentación	41
Retirada de instrumentación	41
Instalación de nuevos instrumentos	41
Incidencias	42
Datos del año 2023	43
Generalidades	43
Disponibilidad de datos	44
Temperatura del Aire	47
Temperatura de la nieve	48
Espesor de la nieve	49
Temperatura de la superficie	50
Temperatura del terreno	51
Espesor de la capa activa	52
Temperatura del techo del permafrost	53

PERMATHERMAL

Parámetros nivométricos	54
Movimiento del terreno	59
Imágenes fenomenológicas	60
Otros datos	62
Planes de futuro.....	63
Mantenimiento de las estaciones	63
Plan de mejora	64
Agradecimientos	67
Referencias	69
Anexo I: Acrónimos	73

Introducción

Mirando al futuro

La campaña antártica 2023-2024 ha supuesto un punto de inflexión en la historia de la red PERMATHERMAL para la monitorización térmica de los suelos congelados en las islas Livingston y Decepción de la Antártida, ya que en ella se han dado dos hitos: por un lado, y a punto de cumplir 25 años en operación, se ha completado la reinstrumentalización de la red, y por el otro se ha continuado con la instalación de dispositivos para la medida de nuevos parámetros asociados a los procesos de congelación/descongelación que marcará la nueva época que se inicia en la red, como es el flujo térmico y los movimientos del terreno. Con estos nuevos parámetros se mira al futuro de la investigación de los suelos congelados para un mejor entendimiento de los procesos que ocurren en los suelos de las zonas libres de hielo de la Antártida y cómo el calentamiento global los está afectando.

En la pasada campaña antártica 2022-23 se completó prácticamente la reinstrumentalización de las estaciones térmicas PT (*Permafrost Temperature*) (Streletskiy et al., 2021) asociadas a la Red Terrestre Global para Permafrost (GTN-P), auspiciada por la Asociación Internacional del Permafrost (IPA), con la instalación de sensores para el estudio del espesor de la cubierta nival que sustituyeran a los termonivómetros tradicionalmente utilizados. Sin embargo, quedaron pendientes la instalación de algunos de estos sensores para la medida del espesor de nieve, así como la instrumentalización completa de alguna estación de nueva incorporación. Esas tareas han sido completadas durante la campaña antártica 2023-2024 (a excepción de una de ellas por complicaciones debidas a la presencia de hielo y nieve), y los sensores de nieve que fueron instalados de forma experimental han sido ya testados tras pasar una invernada funcionando de forma correcta. En esta campaña también se han descargado por primera vez, y con total éxito, los datos de los sensores de humedad del terreno a distinta profundidad instalados en colaboración con investigadores de la Universidad de Masaryk (Chequia) y Universidad de Lisboa (Portugal). Todos estos nuevos instrumentos, aunque solo están instalados en algunas estaciones, marcarán el rumbo de la monitorización de los suelos congelados en los próximos años en las estaciones de la red PERMATHERMAL.

Esta rápida transición en el cambio de instrumentación llevada a cabo entre los años 2022 y 2024 ha sido posible gracias a la importante financiación mantenida durante los últimos años, que ha permitido no dilatar en el tiempo la necesaria modernización de la instrumentación, y la reducción de los tiempos de trabajo requeridos sobre el terreno. De esta forma se termina una primera época, de unos 22 años de duración, en la que se ha establecido la red, se ha estandarizado la instrumentación y los métodos de trabajo, y se ha estudiado, además, el efecto de la nieve sobre los suelos congelados (Figura 1), abriéndose así una nueva época con nuevos retos y objetivos científicos por alcanzar.

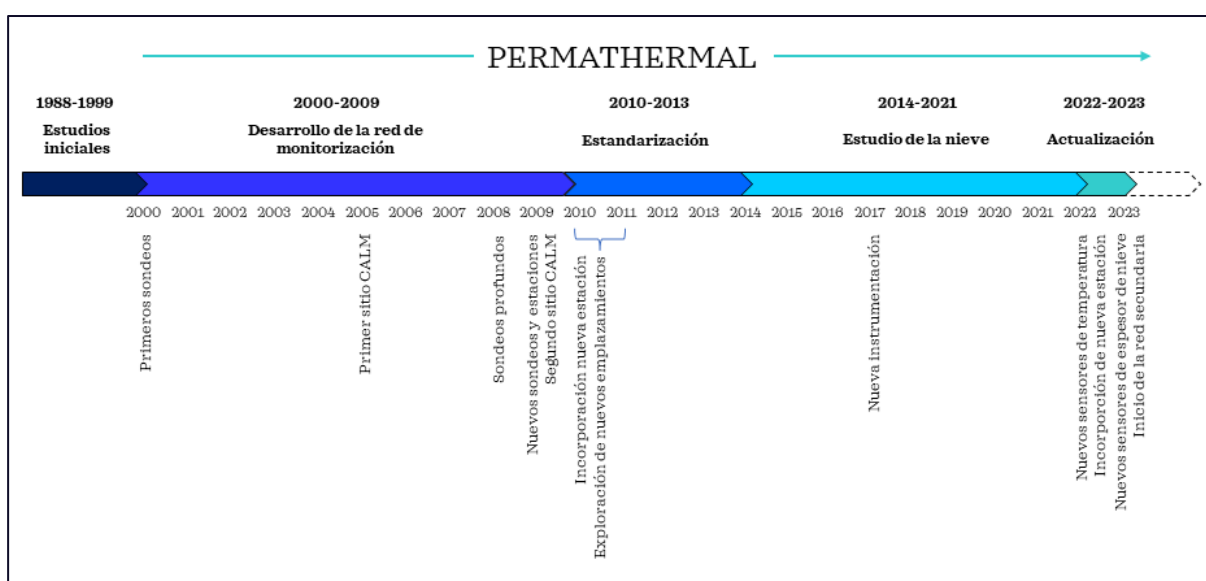


Figura 1: Evolución e hitos en la historia de la red PERMATHERMAL para el control térmico de los suelos congelados en las islas Livingston y Decepción, Antártida (Modificado de de Pablo et al., 2022).

Los inicios de la red

Los estudios iniciales por parte de nuestro grupo de investigación fueron llevados a cabo en las islas Livingston y Decepción de la Antártida desde finales de los años 80 (Figura 1) por el hoy Catedrático de Física Aplicada el profesor Dr. Miguel Ramos, de la Universidad de Alcalá. Esos trabajos estaban enfocados a la micrometeorología de la capa límite entre la atmósfera y el suelo, primero en la isla Decepción, y luego en la isla Livingston. Esos primeros años se realizaron trabajos experimentales de verano, aunque en algunas ocasiones se dejaban instalados algunos sensores de temperatura que estuvieron midiendo a lo largo del invierno (ej., Ramos et al., 1994, 2002; Ramos, 1995, 1997, 1998).

En el año 2000 es cuando se comienza un nuevo tipo de estudio con la monitorización continua del régimen térmico de los suelos estacional y permanentemente congelados en las Shetland del Sur. Para ello, en enero de ese año se realizan las primeras perforaciones en las proximidades de la Base Antártica Española Juan Carlos I, en la isla Livingston (Ramos and Vieira, 2003, 2004, 2009), gracias a la financiación por parte del Programa Antártico Español del Plan Nacional de I+D+I (proyecto ANT98-057 y REN2001-5082-E/ANT). Estas perforaciones son las que marcan el inicio de la red de monitorización térmica de los suelos estacional y permanentemente congelados en las islas Livingston y Decepción, hoy denominada red PERMATHERMAL. Estas primeras perforaciones, se realizaron, una en la loma Incinerador, situada cerca de la BAE Juan Carlos I, y la otra en lo alto del monte Reina Sofía, siendo instrumentalizados con sensores a distintas profundidades que median la temperatura a lo largo de todo el año con una frecuencia de una hora. En la realización de estas perforaciones participó un joven estudiante de doctorado de Portugal, el hoy Profesor Dr. Gonçalo Vieira, de la Universidad de Lisboa (Ramos y Vieira, 2003).

Los siguientes años continuaron realizándose trabajos de investigación experimentales de verano, y algunos otros de monitorización térmica de los suelos a lo largo del invierno, pero no de forma sistemática, aunque se ubicaron en emplazamientos donde hoy se encuentran algunas de las actuales estaciones de la red PERMATHERMAL. En el año 2006 comienza la expansión de los puntos de monitorización, ya no solo en la isla Livingston, sino también en la cercana isla Decepción, gracias a la financiación de varios proyectos de investigación (PERMAMODEL POL2006-01918 y CGL2007-28729-E), en colaboración con la Universidad de Lisboa y la Universidad de Zurich. Distintos investigadores de la Universidad de Alcalá participaron en el establecimiento de estas estaciones de monitorización permanente y sistemática, que trataban de seguir los protocolos de las redes internacionales establecidas por la Asociación Internacional del Permafrost (*International Permafrost Association, IPA*): Control térmico del permafrost (*Thermal State of Permafrost, TSP*, actualmente *Permafrost Temperature, PT*; Streletskiy et al., 2022) y Monitorización circumpolar de la capa activa (*Circumpolar Active Layer Monitoring, CALM*), dirigidas ambas a entender cual es el estado del permafrost y de la capa activa, y cómo evoluciona en el tiempo en estas regiones circumpolares (aunque luego se ha extendido a otros lugares con condiciones periglaciares del planeta). Ambas redes internacionales,

vuelcan sus datos en una base de datos común de la IPA denominada Red terrestre global-permafrost (*Global Terrestrial Network – Permafrost*, GTN-P).

Poco después, en 2008, se realizan las perforaciones más profundas con las que cuenta la red de estaciones de este grupo de investigación, de 25 y 15 m de profundidad en la isla Livingston (Ramos et al., 2009, 2010a). Estas perforaciones también se realizaron en colaboración del equipo del Dr. Gonçalo Vieira, ya profesor de la Universidad de Lisboa, y responsable de su propio grupo de investigación y de su propia red de monitorización, también en las Shetland del Sur, y otros puntos del sector occidental de la península antártica, denominada red PERMANTAR. Estas perforaciones profundas se realizaron gracias a la financiación por la *Fundação Calouste Gulbenkian* de Portugal.

También en el año 2008 se incorpora al equipo de investigación el actual Profesor Titular de Geodinámica Externa Dr. Miguel Ángel de Pablo, de la Unidad de Geología, de la Universidad de Alcalá, quien en los siguientes años toma las riendas de la homogeneización y sistematización de las estaciones existentes, creado también una estación PT y otra CALM en la península Byers de la isla Livingston en el año 2009 (de Pablo et al., 2010). Ese mismo año se realizan 3 perforaciones nuevas en la isla Decepción, en colaboración con el equipo del Dr. Gonzalo Vieira (Universidad de Lisboa) y Dr. David Gilichinsky† (Academia Rusa de Ciencias), e investigadores de la Universidad de Madison (Estados Unidos) (Ramos et al., 2010b).

Con estas perforaciones queda definitivamente establecida la red de monitorización de los suelos congelados en las islas Livingston y Decepción, PERMATHERMAL, dentro de las redes y protocolos internacionales del estudio del permafrost y la capa activa PT y CALM.

La estandarización

En el año 2010 comienza una segunda fase de trabajo en torno a estas estaciones, con su estandarización, en cuanto a instrumentación, sensores, periodos de medida, etc., bajo la responsabilidad del Profesor Dr. Miguel Ángel de Pablo y con la colaboración del joven estudiante Antonio Molina, actualmente Investigador Titular en el Centro de Astrobiología (CSIC-INTA).

En los siguientes años se procede, por tanto, a cambiar de posición (algunos metros) algunas de las estaciones que no tenían sondeos asociados,

para asegurar una mejor representatividad de los datos adquiridos, así como a instalarse sensores de espesor de nieve (termonivómetros), aire y suelo en todas las estaciones, usando para ello el mismo tipo de sensor para cada una de las mediciones, de tal manera que pudiesen ser comparados. Este proceso de estandarización fue posible gracias a la financiación de los proyectos CGL2008-02042-E/ANT, PERMAPLANET (CTM2009-10165) y ANTARPERMA (CTM2011-15565-E), de la Agencia Estatal de Investigación (AEI).

El final del proceso de homogeneización y estandarización coincide en 2015 con la disolución del Grupo de Investigación de Física Ambiental, dirigido hasta ese momento por el profesor Dr. Miguel Ramos. Ese año el Dr. Miguel Ángel de Pablo comienza a responsabilizarse de la serie temporal y de las estaciones de medida, tomando el actual nombre de red PERMATHERMAL (PERMAforst THERMAL monitoring stations), dentro del Grupo de Investigación de Alto Rendimiento de la Universidad de Alcalá “Agua, Clima y Medio Ambiente”. El mantenimiento de las estaciones se realiza desde este momento con financiación del Comité Polar Español a través de encomiendas y convenios con el Instituto Geológico y Minero de España en primer lugar, y con la Unidad de Tecnología Marina desde 2021.

Concluida la estandarización, se compatibiliza el mantenimiento de las estaciones con el desarrollo del proyecto de investigación PERMASNOW (CTM2014-52021-R) centrado en el estudio, entre 2015 y 2019, del efecto de la nieve en el régimen térmico del permafrost en estas islas antárticas. Como consecuencia de ello se incorporan nuevos instrumentos a la red y se amplían los experimentos temporales, algunos de los cuales se mantienen como parte de la red PERMATHERMAL (de Pablo et al., 2016, 2021).

La red

Tras más de 20 años de trabajo en las islas Livingston y Decepción de la Antártida estableciendo, estandarizando y manteniendo las estaciones de la actual red PERMATHERMAL para el control térmico del permafrost y de la capa activa, así como para la medida del espesor de esta última, el resultado son 2 estaciones CALM y 13 estaciones PT (anteriormente TSP; Streletskiy et al., 2021), además de una estación nivométrica, 3 cámaras fenomenológicas, y algunos otros instrumentos tomando datos en las duras y complejas condiciones

antárticas, en muy diversos emplazamientos. Todas estas estaciones y la amplia distribución de instrumentos en tan solo dos islas pretende permitir la realización de una variedad de estudios, incluyendo: 1) la variabilidad del régimen térmico de los suelos congelados en un gradiente altitudinal mediante las estaciones situadas en la península Hurd de la isla Livingston; 2) el régimen térmico en materiales sedimentarios en condiciones peri- y paraglaciaras mediante las estaciones situadas en la península Byers de la misma isla; 3) la variabilidad espacial de corto alcance mediante las estaciones situadas en la isla Decepción; y 4) el régimen térmico general de los suelos en ambas islas. Pero sobretodo, contribuir a la base de datos GTN-P, de la que se alimentan los modelos climáticos, considerando que tanto la temperatura del permafrost, como el espesor de la capa activa son dos variables climáticas esenciales (ecv), tal y como establece, desde 2016, el Sistema de Observación Global del Clima (GCOS) de las Naciones Unidas (UN).

El desarrollo de esta red también ha sido posible gracias a la estrecha colaboración con el equipo de estudio de permafrost del Dr. Gonçalo Vieira de la Universidad de Lisboa, con el apoyo mutuo para el mantenimiento de las estaciones y el análisis de los datos, lo que se refleja en la participación en proyectos del programa portugués como PERMANTAR-2 (FCT/3599-PPCDT/98885/PT), HOLOANTAR (PTDC/CTE-GIX/119582/2010), PERMANTAR-3 (PTDC/AAG-GLO/3908/2012) y THAWIMPACT (2022.06628.PTDC) entre otros, así como en las publicaciones realizadas. Así mismo, el proceso de mantenimiento de las estaciones ha sido realizado por diversos investigadores y colaboradores del equipo, pertenecientes a distintos departamentos de la Universidad de Alcalá, y al apoyo de las dotaciones y técnicos de las Bases Antárticas Españolas “Juan Carlos I” y “Gabriel de Castilla”.

La reinstrumentalización

Durante los primeros 20 años de vida de las estaciones PERMATHERMAL, se constató que los instrumentos y sensores empleados requerían mucho tiempo para el volcado de datos y resultaban en grandes pérdidas de éstos debido a los daños que sufrían los sensores e instrumentos como consecuencia de las duras condiciones ambientales de la Antártida. Por ello, en la campaña 2021-22, y tras varios años de grandes problemas para financiar el

mantenimiento de la red, se plantea el objetivo de realizar la completa renovación de la instrumentación, sustituyendo los dispositivos empleados hasta el momento por otros nuevos con mayor resolución, precisión, y autonomía, y menores requisitos de mantenimiento. De esta forma, la red PERMATHERMAL entraría en una nueva época con actividades de campo más sencillas y cortas en duración que permitirá al grupo de investigación enfrentarse a nuevos retos de estudio de los suelos congelados, e incluso la expansión de la red, en las propias islas Livingston y Decepción, o en otros puntos de la zona occidental de la Península Antártica.

Originalmente, las estaciones han estado dotadas de sensores de tipo Tinytag (de la empresa Gemini) para la medida de la temperatura del aire y, en algunos casos, de la temperatura del terreno a distintas profundidades, así como de miniregistradores de datos térmicos de tipo iButton (de la empresa Maxim), para el resto de medidas: temperatura de la superficie del suelo, y del terreno a distintas profundidades en el resto de los casos, y de temperaturas a distintas alturas sobre el suelo para poder derivar el espesor de nieve (termonivómetros). Además, algunas estaciones disponían de sondas termométricas con termopares que requerían de registradores de datos tipo CR1000 (de la empresa *Campbell Scientific*) en el interior de cajas estancas, con baterías de 12V y la instalación de paneles solares. Esto resultaba en una gran variedad de tecnologías, cada una de las cuales, con sus requisitos de software, cables, y variedad de tareas de mantenimiento, que tomaban una gran cantidad de tiempo de campaña.

Así, en la campaña 2021-22 se inicia el proceso de reinstrumentalización de la red, con un nuevo tipo de dispositivos de mayor memoria, mayor resolución de los datos, y menores requisitos de mantenimiento, para la toma de datos de temperatura (aire, suelo y terreno). Esta reinstrumentalización continúa durante la campaña 2022-23, en la que se siguen dotando a las estaciones de sensores de temperatura, pero también se comienza a instalar en pruebas unos dispositivos especialmente desarrollados para la red PERMATHERMAL cuyo objetivo es derivar el espesor de nieve. En la campaña 2023-24 concluye la reinstrumentalización de la red quedando todas las estaciones PT dotadas de sensores para la medida de la temperatura del aire, la superficie y el terreno (en las que se dispone de sondeo) y de un sensor para la medida del espesor de la nieve mediante sensores de ultrasonido, y eliminándose definitivamente los termonivómetros usados hasta el momento.

Nuevos retos

Con la red PERMATHERMAL prácticamente reinstrumentalizada, durante la campaña 2022-23 se aprovecha para planear nuevos retos de investigación asociados al estudio de los suelos congelados. Así, durante esa campaña se instalan nuevos sensores que permitirán estudiar nuevas variables y que, a la luz de los resultados que se obtengan en los siguientes años, se procederá a la instalación en más puntos de la red.

Por un lado, y como consecuencia de la colaboración de nuestro equipo con la red PERMATHERMAL y del grupo portugués de la red PERMANTAR, con el proyecto GACR dirigido por el joven investigador Filip Hrbacek de la Universidad Marsaryk de la República Checa, se realiza la instalación de 4 instrumentos para la toma de datos de humedad del suelo a distintas profundidades. Éste es un parámetro escasamente monitorizado en las estaciones de la red GTN-P a nivel internacional, sin embargo, es un parámetro de gran importancia para poder realizar la adecuada interpretación de los datos térmicos y de conocer qué está ocurriendo en el terreno a medida que los suelos se congelan y descongelan, y que la nieve se va acumulando y fundiendo (ej., Hrbacek, et al., 2021). Estos instrumentos se instalan en esta campaña en 3 estaciones de la isla Livingston, y 1 de la isla Decepción pertenecientes a la red PERMATHERMAL, más 1 estación también en isla Decepción, pero de la red PERMANTAR.

Por el otro, en esta campaña se realiza la instalación de 2 instrumentos de construcción artesanal, siguiendo los diseños existentes en la bibliografía (Gruber, 2019), para la medida de los procesos de levantamiento y subsidencia del terreno como consecuencia de los procesos de congelación/descongelación que ocurren en terreno con sedimento y presencia de humedad. Estos dos instrumentos se instalan en las estaciones CALM Crater Lake en la isla Decepción y Limnopolare Lake en la isla Livingston.

Los datos de estos instrumentos contribuirán a un mejor entendimiento de los procesos que ocurren en los suelos de la Antártida, además de ayudar en la realización de las modelizaciones térmicas que ya se habían iniciado por parte del grupo de investigación (de Pablo and Jafarov, 2017), en los que se usaban datos de temperatura, pero se carecían de otros tan necesarios como estos. En los siguientes años, la extensión de estos instrumentos a otras estaciones de la red supondrán el primer reto a completar.

La campaña 2023-24

En el citado contexto, la campaña 2023-24 para el mantenimiento de las estaciones PT y CALM de la red PERMATHERMAL ha pretendido (1) completar el proceso de reinstrumentalización de la red con la instalación de algunos de los sensores esenciales de las estaciones que no fueron instalados en las campañas anteriores, (2) el establecimiento de una estación nueva en el emplazamiento Cerro Caliente de Isla Decepción, y (3) la instalación de los primeros sensores de flujo térmico en algunas estaciones. Esto ha sido posible gracias a la financiación del Comité Polar Español a través de la Unidad de Tecnología Marina (UTM) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), mediante un contrato para el desarrollo de actividades técnicas y especializadas con la Universidad de Alcalá, de acuerdo con el artículo 83 de la Ley Orgánica de Universidades (Ley 6/2001 de 21/12/2001). En el citado contrato se establecieron que los objetivos de la campaña son los siguientes:

- Volcado de datos de temperatura del aire, el suelo y el terreno de las estaciones PT, tomados en el año 2023.
- Volcado de datos de los termónivómetros y sensores de espesor de nieve tomados durante el año 2023.
- Volcado de datos de los sensores de movimiento del terreno y humedad del suelo, tomados en el año 2023, en las estaciones que disponen de ellos.
- Completar la reinstrumentalización de todas las estaciones con los sensores.
- Establecimiento de una nueva estación en la zona de Cerro Caliente, en Isla Decepción.
- Instalación de los primeros sensores de flujo térmico en algunas de las estaciones PT de la red.
- Mantenimiento de los sistemas de soporte y alimentación de energía.
- Mantenimiento de las cámaras fotográficas automáticas.
- Toma de datos *in situ* sobre espesor de la capa activa y datos adicionales (temperatura y humedad del suelo) en el periodo de descongelación por medios mecánicos manuales, en función de las condiciones existentes.
- Preprocesado de los datos y su preparación para incorporación en las bases de datos internacionales
- Envío de los datos al Centro Nacional de Datos Polares.

Alcanzar estos objetivos ha sido posible gracias a la participación en la Campaña Antártica Española 2023-24 organizada por el Programa Polar Español de la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del Gobierno de España, con el auspicio del Comité Polar Español y con la logística organizada por la Unidad de Tecnología Marina del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, con la participación del Ejército de Tierra y Armada Española, así como el Hospital Central de la Defensa Gómez Ulla, del Ministerio de Defensa, Gobierno de España.

Estaciones

Localización

En la actualidad, la red PERMATHERMAL está actualmente constituida por 14 estaciones para el control térmico de los suelos (PT) en 10 ubicaciones (Tabla 1) y 2 estaciones para el control del espesor de la capa activa (CALM) (Tabla 2), repartidas por las penínsulas Hurd y Byers de la isla Livingston, y en el entorno de Crater Lake en la isla Decepción (Fig. 2). Además de éstas, existen una estación en fase de pruebas en isla Decepción (Colina Sísmica) instalada en colaboración con la Universidad de Granada (Tabla 1), así como estaciones para el estudio de los suelos congelados en el emplazamiento de la BAE Gabriel de Castilla con fines del control de la estabilidad del emplazamiento y el efecto de la infraestructura sobre los suelos congelados (de Pablo et al., 2017). Otras estaciones secundarias han sido instaladas entre las campañas 2022-23 y 2023-24 en Punta Hannah, Punta Barnard, y Punta Siddins en la isla Livingston.

Tabla 1: Localización de las estaciones PT de la red PERMATHERMAL en las islas Livingston y Decepción, Antártida (modificado de de Pablo, 2021). [*] Estación establecida en la campaña 2023-24; [**] Estación experimental cuya continuidad e incorporación a la red está pendiente de estudio.

ESTACIONES PT	CÓDIGO	LOCALIZACIÓN	ALTITUD	NOTA
Isla Livingston:				
Península Byers:				
Limnopolar Lake	LL	62°38'59.100"S 61°06'16.900"W	75 m	ZAEP n° 126
Domo	DO	62°37'17.049"S 60°58'32.098"W	45 m	ZAEP n° 126
Península Hurd:				
BAE Juan Carlos I	JC	62°39'48.815"S 60°23'26.484"W	11 m	
Nuevo incinerador	NI	62°39'50.744"S 60°23'09.061"W	19 m	
Incinerador	IN	62°39'52.980"S 60°23'08.079"W	34 m	
Collado Ramos	CR	62°40'03.063"S 60°23'31.504"W	117 m	
Morrena	MO	62°40'01.671"S 60°22'31.430"W	145 m	
Glaciar	GL	62°40'09.339"S 60°22'50.949"W	267 m	
Reina Sofía	SO	62°40'15.657"S 60°22'46.468"W	271 m	
Isla Decepción:				
Crater Lake 1	CL1	62°59'07.900"S 60°40'43.000"W	85 m	
Crater Lake 2	CL2	62°59'07.400"S 60°40'47.900"W	85 m	
Crater Lake 3	CL3	62°59'08.000"S 60°40'48.200"W	84 m	
Crater Lake 4	CL4	62°59'09.000"S 60°40'34.700"W	85 m	
Cerro Caliente [*]	CC	62°58'27.200"S 60°42'38.700"W	107 m	
Colina sísmica [**]	SI	62°58'40.100"S 60°40'44.000"W	28 m	

Tabla 2: Localización de las estaciones CALM en las islas Livingston y Decepción, Antártida (modificado de de Pablo, 2021).

ESTACIONES CALM	CÓDIGO	LOCALIZACIÓN	ALTITUD	NOTA
Isla Livingston: Península Byers: Limnopolar Lake	A25	62°38'59.100"S 61°06'16.900"W	75 m	ZAEP n° 126
Isla Decepción: Crater Lake	A16	62°59'06.845"S 60°40'45.225"W	85 m	

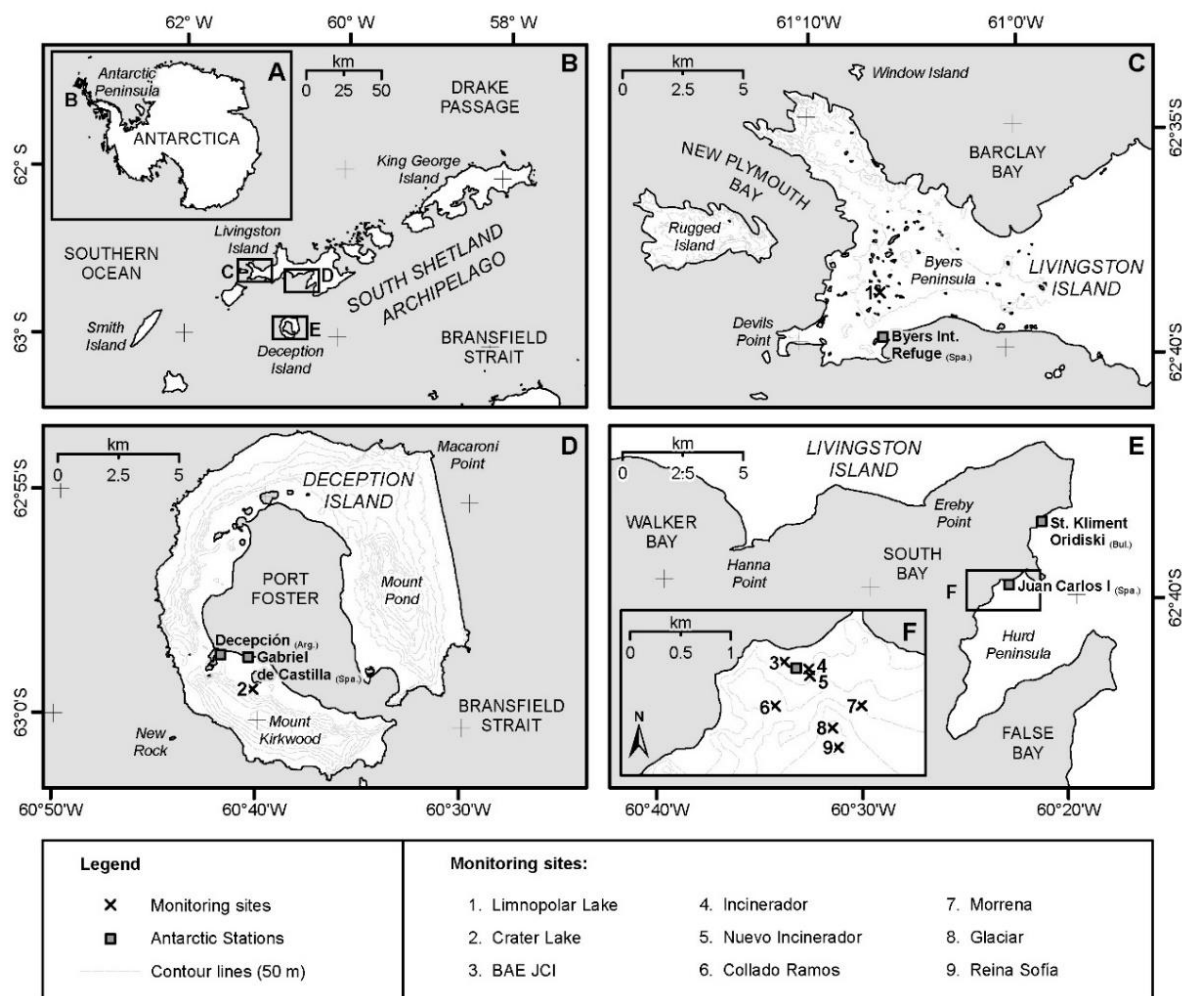


Figura 2: Mapa de localización de los emplazamientos de monitorización del estado térmico del permafrost y el espesor de la capa activa que constituyen la red PERMATHERMAL en las islas Livingston y Decepción, Antártida (Tomado de de Pablo et al., 2016).

Todos estos emplazamientos (Fig. 3) se ubican en zonas venteadas para evitar, en la medida de lo posible, la sobreacumulación de nieve con el consiguiente efecto aislante (Tabla 3). Además, se ubican en distintos lugares de acuerdo con distintos objetivos: las estaciones situadas en la península Hurd permiten realizar un estudio altitudinal, desde el nivel del mar hasta la cima del

PERMATHERMAL

monte Reina Sofía (271 msnm); las estaciones situadas en la península Byers, un estudio de la variabilidad con la distancia al frente del glaciar; y las estaciones en isla Decepción, un estudio del efecto sitio en un emplazamiento con similares características litológicas, además de la comparativa con los emplazamientos de isla Livingston.

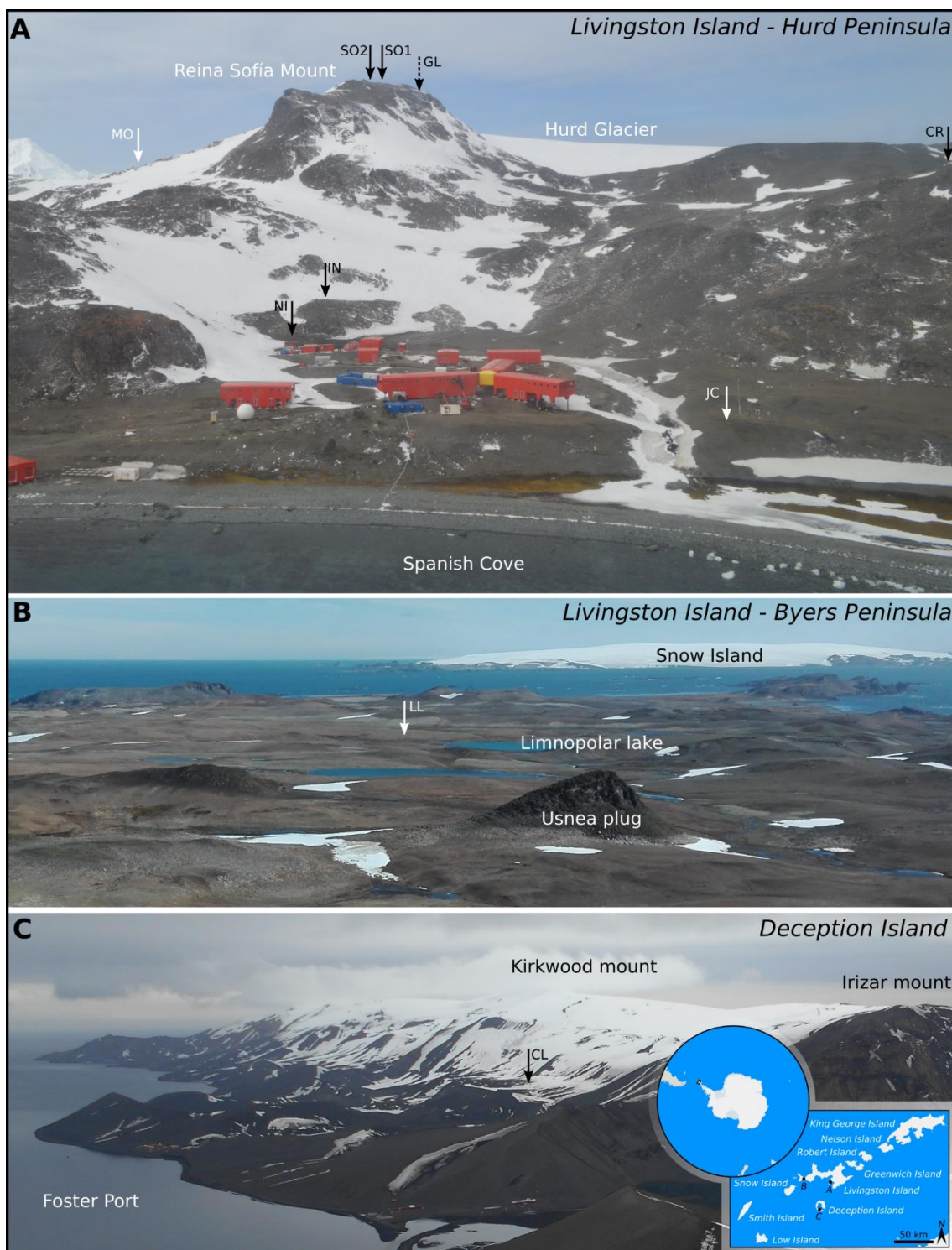


Figura 3: Localización de los emplazamientos de monitorización del estado térmico del permafrost y el espesor de la capa activa que constituyen la red PERMATHERMAL en las islas Livingston y Decepción, Antártida (Tomado de de Pablo et al., 2023).

Cada emplazamiento se caracteriza por materiales sedimentarios de distinta naturaleza: de laderas, glaciares y volcánicos (Tabla 3), y con diferentes granulometrías. La presencia de vegetación es muy escasa, limitándose a líquenes de distintas especies, si bien en otros puntos no monitorizados se puede encontrar pequeñas plantas basculares (Tabla 3).

Tabla 3: Principales características de los emplazamientos de las estaciones en península Hurd (H) y península Byers (B) en isla Livingston (LIV), y en isla Decepción (DEC) (modificado de Ferreira et al., 2017; de Pablo et al., 2023, 2024). (MAAT: temperatura media anual del aire)

Área	Lugar	Inst.	Elev. (m)	MAAT (°C)	Geomorfología	Geología	Partículas	Viento	Vegetación	
LIV	H	JC	2010	12	-1.6	Playas levantadas	Arcilla/arena/cantos	Grueso	Bajo	Líquenes
		NI	2007	19	-1.3	Pie de pendiente	Arcilla/arena/cantos	Fino	Muy bajo	---
	B	IN	2009	34	-1.3	Ladera pedregosa	Cuarcita	Fino	Bajo	---
		CR	2007	117	-2.4	Interfluvio	Till	Grueso	Alto	Líquenes
		MO	2009	145	-2.7	Morrena lateral	Till	Bloques	Alto	Líquenes
		SO	2009	274	-3.6	Llano en cumbre	Till	Grueso	Muy alto	Líquenes
DEC	B	LL	2009	80	-2.2	Pendiente suave	Arcilla/arena/cantos	Fino/medio	Alto	---
	CL	2009	85	-2.2	Pendiente suave	Piroclastos	Medio	Muy alto	---	

Parámetros

Cada una de estas estaciones PT cuenta con instrumentos para la medida de la temperatura de terreno y de parámetros ambientales, mientras que las estaciones CALM tienen instrumentos complementarios que ayudan a la interpretación de los datos térmicos y de espesor de la capa activa. Aunque no todas las estaciones disponen de los mismos instrumentos (Tabla 4) debido al interés científico y/o complejidad logística, en las últimas dos campañas se han estandarizado y reinstrumentalizado las estaciones con el fin de mejorar la calidad de la red de datos, a la vez que facilitar la comparativa entre estaciones de medida en este entorno.

En general, las estaciones PT (Fig. 4) cuentan comuna serie estandarizada de instrumentos (Tabla 4) que incluyen: [A] un sondeo para la medición de la temperatura del terreno a distintas profundidades, para realizar un seguimiento del régimen térmico de la capa activa o del permafrost, cuando este es interceptado por la perforación; [B] una placa metálica enterrada a unos 2 cm de profundidad con un sensor para la medida de la temperatura de la superficie, necesaria, no solo como referencia para los datos de la temperatura del terreno, sino también para el estudio de la presencia y/o espesor de la cubierta nival y del régimen de temperaturas del aire y del suelo; [C] un mástil con un sensor

para registrar la temperatura del aire, y [D] un mástil horizontal con el sensor de espesor de nieve instalado en la presente campaña, y que, de forma definitiva en esta campaña 2023-24, ha sustituido a los mástiles de madera con sensores de temperatura del aire a distinta altura sobre el terreno (termonivómetro) utilizados para aproximar el espesor de nieve.

Las estaciones CALM (Tabla 5), por su parte, pueden tener una serie de instrumentos adicionales como son la medida de la temperatura del aire, el espesor de la cubierta de nieve o la medida de la temperatura de la superficie de forma distribuida con el fin de facilitar datos que permitan la interpretación de la variabilidad espacial y temporal del espesor de la capa activa, que es el parámetro medida en las mallas CALM. Otros instrumentos, no establecidos en los protocolos PT ni CALM, han sido añadidos en algunos emplazamientos para mejorar a variedad de datos disponibles que ayuden a la interpretación de los datos fundamentales de la red, como pueden ser cámaras fenomenológicas, una estación nivométrica o sensores para la medida de los movimientos verticales debido a los procesos de congelación/descongelación (Tabla 5).

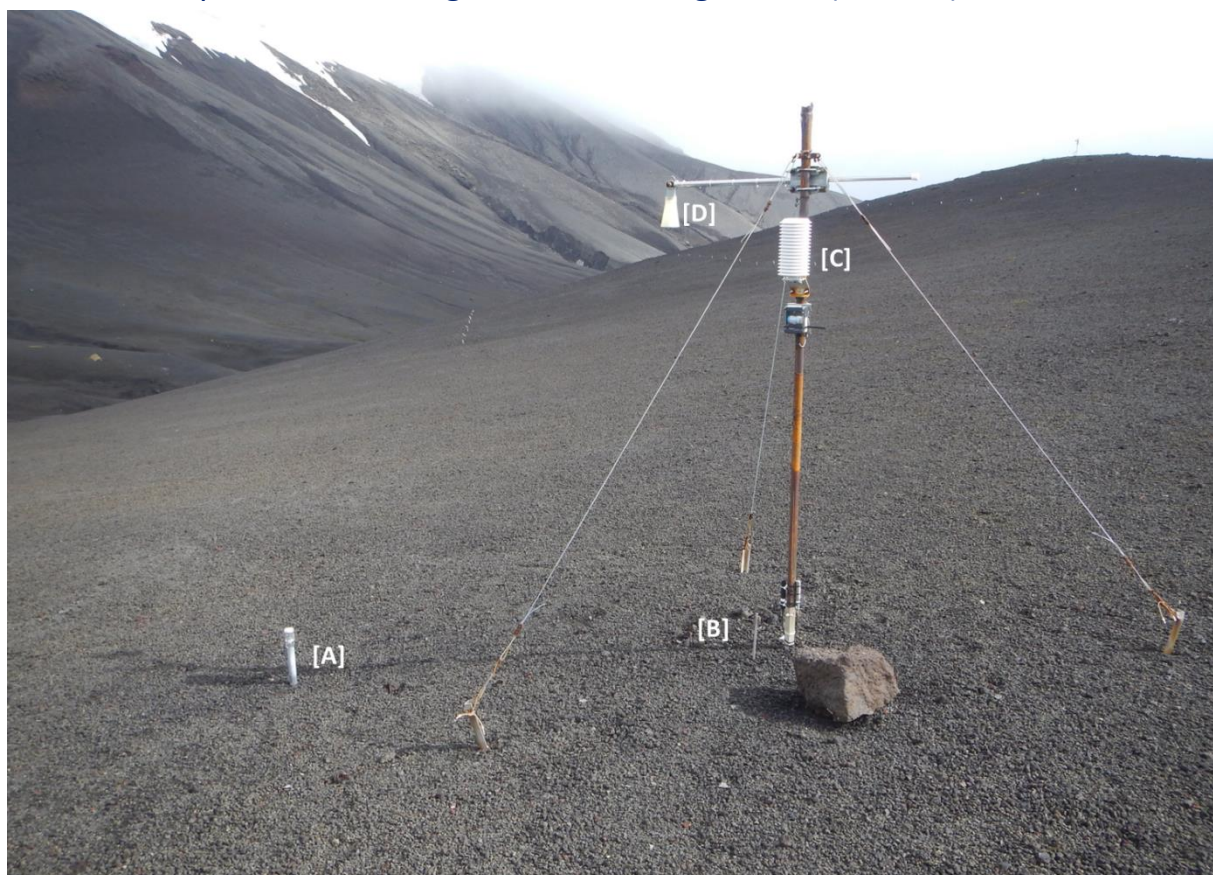


Figura 4: Ejemplo de una estación PT de la red PERMATHERMAL con la instrumentación usual que incluye dispositivos para la medida de la temperatura de los suelos congelados a distinta profundidad [A], de la superficie [B], y del aire [C], además de espesor de la cubierta de nieve [D], este último instalado en la campaña 2022-23.

Campaña Antártica 2023-24

Tabla 4: Instrumentos de las estaciones PT de monitorización de la red PERMATHERMAL en las islas Livingston y Decepción de la Antártida. AIR: Temperatura del aire.; SNO: Espesor de nieve; SUR: Temperatura de la superficie; BOR: Temperatura del terreno; GHF: Flujo térmico; TDR: Humedad del terreno. [X]: preexistentes; [□] instalado en la campaña 2023-24; [○] temporalmente inoperativo (Modificado de de Pablo et al., 2020 y de Pablo, 2021).

LUGAR	ZONA	ESTACIÓN	CÓDIGO	INSTRUMENTACIÓN						
				AIR	SNO	SUR	BOR	GHF	TDR	
Isla Decepción	Crater Lake	Crater Lake	CL-1	X	X	X	X	□		
			CL-2	X	X	X	X	□		
			CL-3	X	X	X	X	□		
			CL-4	X	□	X	X			
			CL-33		X	X	X		X	
			CL-77		X	X	X			
			CC	□	□	□	□			
Isla Livingston	Península Byers	Limnopolar Lake	LL-1	X	X	X	X	□		
			LL-2						X	
			Domo	DO	X	□	X	X		
	Península Hurd	BAE-Juan Carlos I	JC	X	X	X				
			Nuevo incinerador	NI	X	X	X	X		
			Incinerador	IN	X	X	X	X		
			Collado Ramos	CR	X	X	X	X	□	X
			Morrena	MO	X	X	X			
			Glaciar	GL	X	X	○	X		
			Sofia	SO-1	X	X	X	X	□	X
	SO-2				X					

Tabla 5: Instrumentos de las estaciones CALM de monitorización de la red PERMATHERMAL en las islas Livingston y Decepción de la Antártida. AIR: Temperatura del aire.; SNO: Espesor de nieve; SUR: Temperatura de la superficie; TOP: Temperatura del techo del permafrost; CAM: Cámara time-lapse; SPA: Estación nivométrica; GSH: Movimientos del terreno; [X]: preexistentes; [□] instalado en la campaña 2023-24; [○] temporalmente inoperativo (Modificado de de Pablo et al., 2020 y de Pablo, 2021).

LUGAR	ZONA	ESTACIÓN	CÓDIGO	INSTRUMENTACIÓN						
				AIR	SNO	SUR	TOP	CAM	SPA	GSH
Isla Decepción	Crater Lake	Crater Lake	A16	X	○	○	X	X	X	□
Isla Livingston	Península Byers	Limnopolar Lake	A25					X		□

Mediciones

Durante la visita a las zonas de estudio se realizan, además, mediciones *in situ* de distintos parámetros, siendo el más importante la medida del espesor de la capa activa en las mallas CALM. Adicionalmente, se toman otra serie de medidas, que varían de unos años a otros, y que van dirigidas a la toma de datos puntuales o distribuidos para conocer otros parámetros que permitan entender e interpretar, tanto las medidas realizadas de espesor de la capa activa, como de temperaturas de la superficie o del terreno o el espesor de la cubierta nival.

Estas medidas, que van desde la temperatura o humedad superficial, a la toma de fotografías infrarrojas, se realizan de forma complementaria a las medidas sistemáticas, mediante el empleo de otros tipos de sensores e instrumentos.

Mantenimiento

El mantenimiento de las estaciones PT y CALM requieren de visitas anuales a las mismas y la realización de tareas que permitan, por un lado, (1) la recuperación de los datos registrados por los sensores en los distintos instrumentos de cada una de las estaciones y por el otro (2) la adecuación de las instalaciones que se hayan podido ver dañadas durante el invierno por las duras condiciones ambientales.

Con la reinstrumentalización de las estaciones, las tareas de obtención de datos y programación de los sensores han quedado reducidas de forma muy importante gracias a las características de los nuevos dispositivos instalados, quedando únicamente algunos dispositivos que aún requieren una mayor cantidad de tareas de volcado de datos, borrado de memoria, reprogramación, etc., y que serán sustituidos de forma definitiva en las próximas campañas. Con los nuevos dispositivos, es posible realizar la descarga de datos de forma rápida y sin necesidad de manipular los dispositivos sensores de sus emplazamientos, lo que asegura la invariabilidad de las condiciones de contorno de los puntos de medida.

Por otro lado, las duras condiciones ambientales en la zona de estudio de la Antártida también requieren hacer tareas dirigidas a, (1) sustituir los instrumentos que hayan podido verse dañados en el año anterior a la visita, (2) a reparar los daños sufridos tanto en los instrumentos como en las instalaciones de soporte, como a (3) asegurar la integridad de los instrumentos durante el periodo que pasarán abandonadas trabajando de forma autónoma durante los siguientes meses hasta la próxima visita. Los daños existentes y las tareas necesarias para realizar estas reparaciones son muy variables de unas campañas a otras, y requieren de mayor o menor tiempo y material.

Datos

Los datos registrados por los instrumentos de las distintas estaciones PT y CALM son, en general, almacenados en ficheros de texto plano en formato ASCII, con valores separados por comas (CSV), cuyo nombre está codificado con la siguiente estructura:

<p><i>Localización_Sitio_instrumentación_identificador_Altura/profundidad_año.extensión</i> <i>XXX_XX_XXX_XXXXX_XXXXcm_XXXX.XXX</i></p>
--

donde cada elemento de la estructura tiene unos códigos preestablecidos que se vienen utilizando desde el año 2010:

Localización:	
LIV	Isla Livingston
DEC	Isla Decepción
Sitio:	
JC	BAE Juan Carlos I
NI	Nuevo Incinerador
IN	Incinerador
CR	Collado Ramos
MO	Morrena (anteriormente Motos)
GL	Glaciar
SO	Sofía
LL	Limnopolar Lake
DO	Domo
PH	Punta Hannah
PB	Punta Barnard
PS	Punta Siddins
CL	Crater Lake
CC	Cerro Caliente
GC	BAE Gabriel de Castilla
Instrumentación:	
AIR	Temperatura del aire
SNO	Temperatura de la nieve
SUR	Temperatura de la superficie
BOR	Temperatura del terreno
GHF	Flujo térmico del suelo
GSH	Movimientos del terreno
SPA	Estación nivométrica multiparamétrica
TOP	Temperatura del techo del permafrost
CAM	Fotografías fenomenológicas
ALT	Espesor de capa activa
Identificador:	
SXXXX	Sitio XXXX numerados por número de experiencia del mismo tipo en dicho punto
NXXYY	Nodo de coordenadas relativas (XX,YY) en los sitios CALM
Altura/Profundidad:	
XXXXcm	Altura o profundidad en cm y cuatro dígitos
Año:	
XXXX	Año de los datos recogidos, con cuatro cifras
Extensión:	
txt	datos brutos
csv	metadatos y datos procesados
jpg	imágenes
XXX	Otros formatos específicos de cada instrumento

Debido a la renovación de los instrumentos, cuando hay varios sensores en el mismo experimento, todos quedan registrados en el mismo fichero de forma automática, por lo que se está trabajando en el cambio de nomenclatura de los datos, que ahora tendrían una estructura parecida, de la siguiente forma:

<p><i>Localización_Sitio_instrumentación_identificador_año.extensión</i> <i>XXX_XX_XXX_XXXXX_XXXX.XXX</i></p>

en el que se ha eliminado la referencia a la altura/profundidad, ya que no habrá distintos ficheros de datos para un mismo experimento, y todos los datos, de los sensores situados a distintas alturas o profundidades, quedarán reflejados en el interior del fichero. En todo caso, con este sistema de nomenclatura es posible mantener en todo momento la trazabilidad de los datos y conocer el contenido exacto de cada fichero, así como la ubicación del sensor e instrumento que lo tomó, y el periodo anual en el que lo hizo.

Estos datos brutos son almacenados en el servidor de datos de la red PERMATHERMAL y enviados al Centro Nacional de Datos Polares. Los datos pasan posteriormente por distintos niveles de preprocesado dirigido a dejarlos listos para su explotación. Estos niveles de preprocesado son:

- Nivel 0: Datos brutos, tal y como son recuperados de los sensores e instrumentos.
- Nivel 1: Datos formateados, ajuste de formato a estructura de datos concreta.
- Nivel 2: Datos agregados, unión en un solo fichero de los datos registrados por distintos sensores para una misma medición
- Nivel 3: Datos limpios, eliminación de datos erróneos y espurios
- Nivel 4: Datos corregidos, con ajustes de offset, correcciones de deriva, etc.
- Nivel 5: Datos agrupados, en el que se unen los datos de distintos años

No todos los datos requieren de todos los niveles de ajuste, por lo que pueden ser exactamente iguales los de un nivel y otro, pero todos pasan el escalonado de preprocesado, asegurando de esta forma la calidad de los datos que se divulgarán y explotarán.

Los datos finales son los enviados a la base de datos de GTN-P y CALM. Algunos datos son también volcados en otras bases de datos de carácter internacional como, por ejemplo, en la red SoilTemp o PhenoCam, en el que se suben datos de temperatura del suelo o fotografías de cámaras fotográficas automáticas, respectivamente.

Instrumentación

Estaciones PT

Las estaciones PT están, generalmente, dotadas de instrumentos que permiten la medida de temperatura del aire, temperatura de la superficie, y temperatura del suelo a distintas profundidades, así como de espesor de nieve. Hasta la campaña 2022-23, este espesor se obtenía de forma indirecta a través de la medida de la temperatura del aire a distintas alturas con sensores montados sobre un mástil de madera, denominados termonivómetros.

No todas las estaciones están dotadas de todos estos instrumentos, en función de las complejidades técnicas del lugar y condicionantes logísticas. En otros casos, algunas contaban con medios técnicos más avanzados, existiendo, en la actualidad una homogeneidad en las estaciones, salvo en las dos excepciones existentes debido a cuestiones logísticas. Esta homogeneidad se ha conseguido a lo largo de los años de estandarización de la red y de la renovación de los instrumentos llevados a cabo entre las campañas 2021-22 y 2023-24.

Dispositivos de medida

La renovación de la red ha implicado la sustitución de distintos tipos de sensores y dispositivos, desarrollados por distintas empresas, por un mismo tipo de dispositivo, desarrollado por *Geoprecision GmbH*, con distintos tipos y número de sensores adosados (propios o no) que le permiten adquirir datos con una frecuencia horaria durante 1 a más de 15 años, según la configuración, y con una fuente de alimentación simple (una pila de litio) que igualmente puede durar múltiples años. Estos dispositivos, del modelo M-Log5W (Tabla 6), disponen de tecnología inalámbrica de comunicación vía radio 433 MHz, que permite el volcado de datos de forma remota con un software específico (FG2) para sistema operativo Windows desarrollado por la propia empresa.

Estos dispositivos han sido conectados a distintos tipos de sensores (Fig. 5) que permiten la toma de datos de temperatura del aire, del suelo, o del terreno a distinta profundidad, así como de espesor de nieve y de medida de la inclinación del terreno para establecer procesos de levantamiento y subsidencia del suelo (Tabla 6). Con ellos se sustituyen a los distintos dispositivos y sensores empleados hasta la presente campaña.



Figura 5: Dispositivos de medida de distintos parámetros en las estaciones PT y CALM de la red PERMATHERMAL en Antártida: [A] Geoprecision Cable (AIR, SUR, TOP); [B] Geoprecision String con cadena termométrica (BOR); [C] Geoprecision String con sensor de flujo térmico (GHF); [D] Geoprecision snowbox (SON); [E] Geoprecision Tilt (GSH); y [F] MicroLog SDI-MP con sensores de humedad del suelo (TDR).

PERMATHERMAL

Tabla 6: Características de los instrumentos y sensores empleados en la red PERMATHERMAL, tanto en las primeras décadas de funcionamiento de las mismas (iButton y Tinytag), como desde la campaña 2021-22 tras la reinstrumentalización de la misma (M-Log5W). AIR: Temperatura del aire; SNO: Temperatura/espesor de la nieve; SUR: Temperatura de la superficie; BOR: Temperatura del terreno.; TOP: Temperatura del techo del permafrost; GSH: Movimientos del terreno; GHF: Flujo térmico. (Modificado de de Pablo, 2023)

Marca	Dispositivo	Modelo	Sensor	Resolución	Precisión	Medidas
Maxim	iButton	DS1922L	Digital	0,0625 °C	±0,5 °C	SNO, SUR, BOR, TOP
Gemini	Tinytag	Plus 2	PT100	0,01 °C	±0,04 °C	AIR
Geoprecision	M-log5W	Cable	PT1000	0,01 °C	±0,1 °C	AIR, SUR, TOP
Geoprecision	M-log5W	String	TNode	0,01 °C	±0,1 °C	BOR
Geoprecision	M-log5W	String	TNodeEx	0,001 °C	±0,1 °C	BOR
Geoprecision	M-Log5W	SnowBox	Maxbotic	1 mm	±1%	SNO
Geoprecision	M-Log5W	Tilt		0.005 °	0.1 °	GSH
Geoprecision	M-Log5W	String	HFP01	60x10 ⁻⁶ v/(W/m ²)	±3%	GHF

Temperatura del aire

Desde la renovación de la instrumentación durante la campaña 2021-22, para la medida de la temperatura del aire se emplean registradores inalámbricos (433 MHz) *Geoprecision* modelo M-Log5W-Cable, dotados de un sensor PT1000 que le confiere una resolución de 0,01°C y una precisión de ±0,1°C a las más de 400.000 medidas capaces de ser almacenadas en su memoria de 2.048 Kb, alimentados con una batería AA de Litio de 3.6V por más de 10 años.

Estos sensores están insertados en el interior de un protector de radiación solar que evita el calentamiento directo, e incluso su enfriamiento por el contacto con el hielo durante el invierno. El protector de radiación está instalado a unos 160 cm sobre el suelo en un mástil de madera o metálico anclado al terreno con vientos de cuerda o de acero.

Temperatura de la superficie

A unos 2 cm de profundidad, y cubierto con material del suelo para evitar el calentamiento directo del sensor, se sitúa un dispositivo de toma de datos de temperatura, adosado a una placa de acero de 20x20x0,2 cm. El objetivo de esta

placa metálica de alta conductividad térmica es permitir al sensor registrar temperaturas más homogéneas que las que podría medir en un único punto.

En la campaña 2021-22 también fueron sustituidos los antiguos dispositivos por registradores inalámbricos (433 MHz) *Geoprecision* modelo M-Log5W-Cable, dotados de un sensor PT1000 que le confiere una resolución de 0,01°C y una precisión de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ a las más de 400.000 medidas capaces de ser almacenadas en su memoria de 2.048 Kb, alimentados con una batería AA de Litio de 3.6V por más de 10 años.

Temperatura del terreno

Para la medida de temperatura del terreno se instalan sensores de temperatura en el interior de un tubo de PVC sellado en ambos extremos e introducido en el terreno en perforaciones previas realizadas para tal fin. No todas las estaciones cuentan con estas perforaciones (Tabla 4), y, en las que existen, la profundidad total es diferente, desde los 80 cm hasta los 25 m, predominando las perforaciones someras, de menos de 2 m de profundidad.

Entre las campañas 2021-22 y 2023-24 se ha completado la sustitución de todos los sensores y cadenas termométricas por los nuevos dispositivos. La única excepción es la de la estación Glaciar en la isla Livingston, por encontrarse aún bajo el hielo. Esta estación mantiene su cadena termométrica y el registrador de datos CR1000. En el resto de las estaciones se han instalado registradores inalámbricos (433 MHz) *Geoprecision* modelo M-Log5W-String, dotados de cadenas de sensores, bien modelo TNode (resolución 0,01°C y precisión $\pm 0,1^\circ\text{C}$) o TNodeEx (resolución 0,001°C y precisión $\pm 0,1^\circ\text{C}$), con los que tomar hasta 500.000 medidas que es la capacidad de su memoria de 2.048 Kb, alimentados con una batería AA de Litio de 1.5V por más de 5 años.

Estas cadenas termométricas son de fabricación específica, y los sensores se encuentran situados a profundidades estandarizadas según el protocolo GTN-P (Harris et al., 2001; Streletskiy et al., 2022), de 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 160, 200, 250, 300 350, 400,450, 500, 600, 800, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, y 2500 cm, según la profundidad de cada sondeo. En algunas ocasiones se han instalado algún sensor a profundidades fuera de este estándar, para alcanzar la profundidad máxima del sondeo.

Espesor de nieve

Durante la campaña 2022-23 se inició la sustitución de los termonivómetros usados tradicionalmente para la aproximación del espesor de nieve a través del análisis de la temperatura a distintas alturas sobre el suelo (ej., [Lundquist and Lott, 2008](#); [Lewkowicz, 2008](#)). En la actualidad se mide directamente el espesor mediante dispositivos M-Log5W con sensores de ultrasonidos Maxbotic MB7574, capaces de tomar medidas de distancia al suelo de entre 500 y 5000 mm, alimentados con una pila D de litio de 3.6V, que le alimenta por un periodo aproximado de 3 años, tomando datos de forma horaria. De esta manera se obtienen datos de altura de nieve, y no es necesario derivarlo a partir de datos térmicos.

Para evitar el efecto del hielo que se pueda formar en la membrana del dispositivo, están configurados para realizar vibraciones antes de la toma de datos, de tal forma que se rompan los posibles cristales de hielo y que las medidas que tomen sean correctas. Si bien este dispositivo no mide espesor, sino distancia al suelo, el cálculo del espesor es sencillo a partir de la diferencia con la máxima distancia media al suelo. La ventaja principal es que se aumenta de forma importante, tanto la resolución temporal y la resolución en espesor de nieve que se puede obtener con estos dispositivos. Durante la campaña 2023-24 se ha completado la instalación de sensores de este tipo en las estaciones restantes.

Para su instalación se han adosado los sensores, en forma de cono, al extremo de un tubo de aluminio de 1 m de longitud, que, a su vez, se ha sujetado con abrazaderas metálicas a los mástiles en los que se encuentran instalados los sensores de temperatura del aire (Fig. 4). El objetivo de este diseño es reducir, cuando sean retirados de forma definitiva los termonivómetros, el número de mástiles instalados en cada una de las estaciones, haciendo además que el impacto visual y el mantenimiento sea más sencillo en los siguientes años.

Flujo térmico

Para el estudio del balance energético en las estaciones, desde la campaña 2023-24, se ha comenzado la instalación de sensores de flujo térmico. Estos sensores, modelo HFP01 de Hukseflux, están conectados a un registrador inalámbrico (433 MHz) *Geoprecision* modelo M-Log5W-String con el que se podrán tomar hasta 500.000 medidas horarias en su memoria de 2.048 Kb,

gracias a su alimentación mediante una batería AA de Litio de 1.5V de más de 5 años de duración estimada. Los sensores permiten la toma de datos con una resolución de $60 \times 10^{-6} \text{ V}/(\text{W}/\text{m}^2)$, y una incertidumbre de $\pm 3\%$. El sensor se encuentra enterrado a unos 5 cm de la superficie, siguiendo las especificaciones del fabricante, en un terreno sin alterar.

Estaciones termométricas automáticas

Solo en un caso, y de forma circunstancial (estación Glaciar) debido a la permanente presencia de nieve desde el año 2011, no ha sido posible la sustitución de una estación termométrica automática por los nuevos dispositivos *Geoprecision*. Esta estación está dotada de instrumentación más compleja dotada de un sistema de adquisición de datos modelo *CR1000* de *Campbell Scientific* alimentado mediante panel solar y batería, y al que está conectada una sonda termométrica dotada de sensores de temperatura a distinta profundidad. Esta sonda se encuentra en el interior de un sondeo de 15m en península Hurd de la isla Livingston. Todos los demás sistemas similares que existían anteriormente fueron desmantelados de forma definitiva en la campaña 2022-23.

Estaciones CALM

Las estaciones CALM han sido establecidas en la zona de estudio entre los años 2005 y 2009, siguiendo los protocolos que establece la propia red, optando por redes de 100x100m que permiten el conocimiento puntual del estado de la capa activa, frente a otras configuraciones que permiten estudiar la variabilidad regional. El protocolo permite estudiar el espesor de la capa activa, tanto mediante sondeos mecánicos manuales, como mediante la medida de la temperatura del terreno, optándose en nuestras estaciones por el primer método.

En el caso de las estaciones CALM de la red PERMATHERMAL, se han incorporado otros experimentos que permiten un conocimiento más profundo de los factores que influyen en los espesores de la capa activa medidos anualmente (Tabla 5).

Espesor de la capa activa

La medida del espesor de la capa activa se realiza de acuerdo con los protocolos establecidos por la propia red CALM. Para ello se han establecido las mallas de control de 100x100m, balizadas en su perímetro cada 10 metros con estacas de madera y/o metal corrugado clavados en el terreno. Como la malla está marcada solo en el perímetro, para determinar la posición de los demás nodos, para la toma de medidas se extiende una cuerda, previamente marcada cada 10 m, sujetándose en las estacas de lados opuestos de la malla y cruzando la misma. Tras completarse las medidas en los 11 nodos que cubre, dicha cuerda se va desplazando a los siguientes pares enfrentados de estacas, hasta completar la medición en la totalidad de la malla.

La toma de datos del espesor de la capa activa se realiza una vez cada verano austral, durante el periodo de descongelación del suelo, mediante la introducción en el terreno de una sonda manual consistente en una barra de acero de 1 m de longitud y 1 cm de diámetro, terminada en punta y con un mango de sujeción. Esta sonda se introduce en repetidas ocasiones en cada uno de los 121 nodos de cada malla CALM, estableciéndose como espesor de la capa activa, la longitud de la barra que ha entrado en el terreno hasta tocar el techo del permafrost.

Es necesario considerar que cuando se realiza la visita a la malla CALM, fijada por el calendario logístico de la campaña, no siempre coincide con el máximo espesor de la capa activa, por lo que en muchas ocasiones nos referiremos a las medidas realizadas como profundidad descongelada y no como espesor de capa activa (Guglielmin, 2006).

Temperatura del techo del permafrost

La medida de la temperatura del techo del permafrost a lo largo del año se realizan únicamente en el CALM de Crater Lake, en 16 nodos regularmente distribuidos de la malla. Actualmente se usan registradores inalámbricos (433 MHz) *Geoprecision* modelo M-Log5W-Cable instalados para medir la temperatura del aire y de la superficie, dotados de un sensor PT1000 que le confiere una resolución de 0,01°C y una precisión de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ a las más de 400.000 medidas capaces de ser almacenadas en su memoria de 2.048 Kb, alimentados con una batería AA de Litio de 3.6V por más de 10 años. encontrándose

Temperatura superficial distribuída

Actualmente este tipo de medida está descontinuada por cuestiones presupuestarias. En todo caso, el objetivo de esta monitorización es estudiar la evolución de la temperatura superficial, y la determinación de la presencia de nieve en las mallas CALM. Para ello se instalaron 36 sensores de temperatura repartidos de forma regular por los nodos pares de la red. Los sensores de temperatura utilizados eran tipo *iButton Thermochron DS1922L* capaces de registrar la temperatura cada 3 horas. Estos dispositivos se encontraban en el interior de una cápsula de plástica estanca, enterradas a unos 2-3 cm de profundidad con el fin de evitar el calentamiento por radiación solar.

La sustitución de estos sensores por dispositivos *Geoprecision* modelo M-Log5W-Cable es el objetivo de las siguientes campañas, de tal manera que toda la instrumentación, principal y adicional, esté basada en el mismo tipo de tecnología.

Espesor de cubierta nival distribuída

Actualmente este tipo de medida, complementaria a la anterior, está descontinuada por cuestiones presupuestarias. Y es que, aunque con los datos de temperatura superficial es posible determinar la presencia o no de una cubierta nival sobre el terreno, no es posible establecer su espesor, por lo que usualmente se usan termonivómetros. Para conocer cómo este varía entre los distintos puntos de las mallas CALM, entre 2017 y 2022 se instalaron 3 termonivómetros en los extremos y centro de una de las diagonales de cada malla CALM.

Estos dispositivos, consistente en un mástil de madera con sensores de temperatura a distinta altura sobre el suelo, en lugar de los 7 sensores normalmente instalados en los termonivómetros de las estaciones PT, contaban con 15 sensores de temperatura miniaturizados tipo *iButton Thermochron DS1922L* registrando datos cada 3 horas (en lugar de los 7 usados en los termonivómetros de las estaciones PT). Los sensores estaban situados a 2,5, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140 y 160 cm sobre la superficie, acoplados a un soporte plástico *DS9093DR+* anteriormente descrito, y atornillado a un mástil de madera en el que se perforaron unas cavidades que permitían proteger los dispositivos de las inclemencias ambientales, pero seguir en contacto con la atmósfera para registrar su temperatura.

Otros instrumentos

Con el fin de facilitar la interpretación de los datos de temperatura del aire, el suelo y el terreno, objetivo principal de la instrumentación de las estaciones PT, en el contexto local, se han instalado una serie de instrumentos adicionales que toman datos de diverso tipo. Aunque estos instrumentos no están considerados en los protocolos PT o CALM, son de gran interés para el entendimiento de la variabilidad de los procesos ambientales que ocurren en la superficie y que condicionan la evolución térmica de los suelos temporal o permanentemente congelados.

Cámaras fenomenológicas

Tras la reinstrumentalización de la red, en la actualidad se emplean cámaras fotográficas automáticas diseñadas para la intemperie del modelo *CC5MPX* de *Campbell Scientific*, que toman imágenes con una resolución de 2592x1984 píxeles (5MPíxeles). Estas imágenes son almacenadas en una tarjeta de memoria interna SD de 2 Gb, que puede ser accesible mediante conexión FTP, sin necesidad de la apertura de la cámara. Estas cámaras han sido programadas también para la toma de datos a las 11, 12 y 13h GMT, y son alimentadas con baterías de 12V cargadas con un panel solar de 30W instalado sobre el mismo mástil sobre el que se encuentra anclada la cámara y la caja estanca que contiene la batería y el regulador de carga.

Estación nivométrica

Desde principios de 2017, en el sitio CALM de Crater Lake, se encuentra instalada una estación nivométrica multiparamétrica (Fig. 6), consistente en 6 sensores desarrollados por *Sommer GmbH* para la medida de parámetros ambientales, de temperatura y de propiedades de la nieve. A esta estación se le ha acoplado un sensor de radiación IR y total, incidente y reflejada, *CRN10* de *Campbell Scientific*. El conjunto de sensores es capaz de medir hasta 32 parámetros ambientales y de la nieve (Tabla 7), incluyendo temperatura y humedad del aire, temperatura de la superficie, temperatura de la nieve, espesor, peso, densidad, o contenido en agua y en hielo del paquete de nieve, y a distintas alturas sobre el terreno. Los datos de estos sensores son almacenados en un registro de datos MD1 de *Sommer GmbH*, y son alimentados por una

batería de 12V cargada con un panel solar de 30W, que permite la toma de datos de forma horaria sin interrupción a lo largo del año.

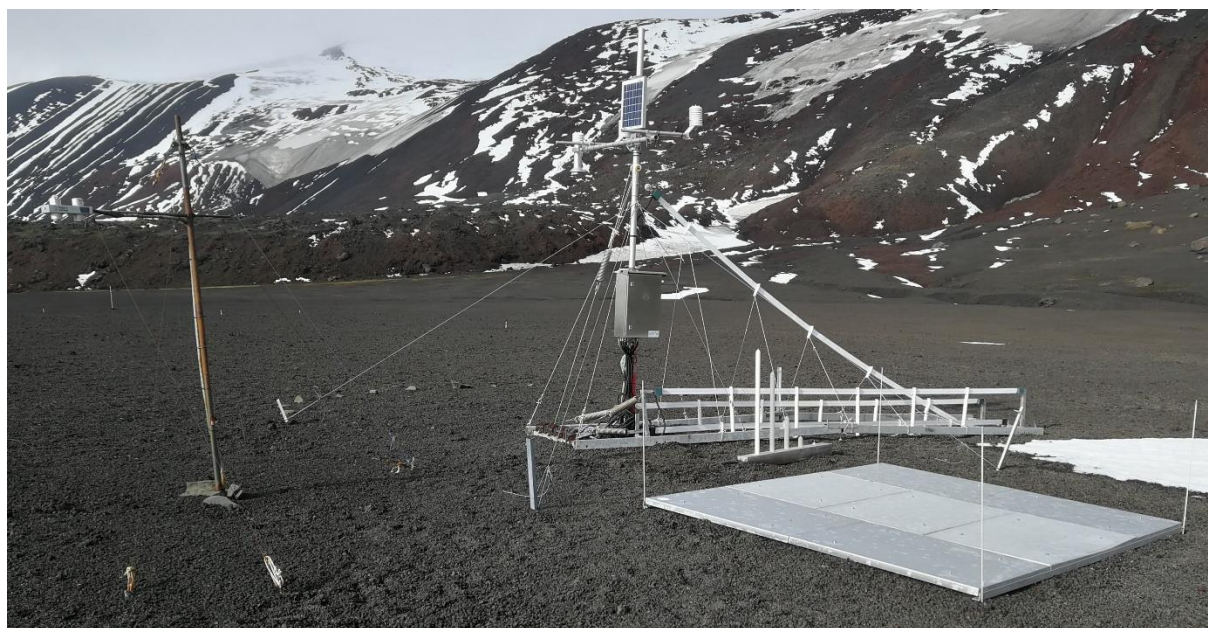


Figura 6: Vista de la estación nivométrica instalada en 2017 junto a la malla CALM Crater Lake en isla Decepción.

Si bien es una única estación, permite obtener datos de gran precisión que pueden ser comparados y correlacionados con los medidos por los termónivómetros repartidos por la malla CALM anteriormente descritos, así como disponer de datos adicionales para el entendimiento de las variables ambientales más importantes.

Tabla 7: Parámetros (y unidades) medidos por los distintos instrumentos integrados en la estación nivométrica situada en isla Decepción, Antártida (Modificado de de Pablo et al., 2020).

AMBIENTAL	TEMPERATURAS	PROPIEDADES DE LA NIEVE
Fecha y hora	Temperatura interna (°C)	Contenido en hielo total (%)
Temperatura del aire (°C)	Temperatura superficial IR (°C)	Contenido en agua total (%)
Humedad relativa (%)	Temperatura superficial (°C)	Densidad total (kg/m ³)
Piranómetro incidente (W/m ²)	Temperatura a 10 cm (°C)	SWE total (mm)
Piranómetro reflejado (W/m ²)	Temperatura a 20 cm (°C)	Contenido en hielo a 10 cm (%)
Pirgeómetro incidente (W/m ²)	Temperatura a 40 cm (°C)	Contenido en agua a 10 cm (%)
Pirgeómetro reflejado (W/m ²)	Temperatura a 80 cm (°C)	Densidad a 10 cm (kg/m ³)
	Temperatura a 100 cm (°C)	SWE a 10 cm (mm)
		Contenido en hielo a 30 cm (%)
		Contenido en agua a 30 cm (%)
		Densidad a 30 cm (kg/m ³)
		SWE a 30 cm (mm)
		Contenido en hielo a 50 cm (%)
		Contenido en agua a 50 cm (%)
		Densidad a 50 cm (kg/m ³)
		SWE a 50 cm (mm)
		Peso de la nieve (kg/m ²)
		Espesor de nieve (cm)

Humedad del terreno

Como resultado de una colaboración internacional, y con el fin de evaluar la importancia de las medidas de la humedad del terreno a distintas profundidades para la interpretación de los datos de temperaturas del terreno, en la campaña 2022-23 se realizó la instalación de varios dispositivos de medida de este parámetro, 4 de ellas en estaciones PT de la red PERMATHERMAL.

Estos dispositivos, MicroLog SDI-MP fabricados por EMS-Brno, se basan en la técnica de la reflectometría de dominio de tiempo (*Time Domain Reflectometry*, TDR). Para ello están equipados con 3 o 4 sensores de medición de humedad CS650 (*Campbell Scientific*) de 10 cm de longitud (Tabla 8). Cada uno de estos sensores se ha instalado horizontal o verticalmente según el caso, para registrar datos a una profundidad específica o en un rango de 10 cm de profundidad, respectivamente. En general, cada dispositivo ha sido configurado para la medición del contenido volumétrico del agua (en %), aunque en dos casos la configuración se ha ajustado para registrar también la Conductividad Eléctrica (CE). Estos casos están relacionados con la presencia de dispositivos AERT para el monitoreo geofísico de suelos congelados que tiene instalado en las estaciones de la red PERMATHERMAL, investigadores del programa polar portugués PROPOLAR, como resultado de una colaboración internacional.

Los dispositivos cuentan con una memoria de 256 Kb, que le permite almacenar hasta 100.000 registros, todo ello alimentado con una pila AA de litio de 3.6V que le confiere una autonomía de más de dos años. La descarga de datos se realiza por medio de pulsos infrarrojos mediante el cable específico adosado al dispositivo (no requiere por tanto conexión directa), y conectado a un equipo con sistema operativo Windows y el software Mini32 desarrollado por la misma empresa.

Las estaciones PT en las que se ha instalado estos instrumentos son, debido al reducido número de dispositivos disponibles, aquellas (1) más representativas del entorno y (2) en las que las condiciones del suelo permitían su instalación en profundidad, quedando descartadas inicialmente estaciones situados en terrenos más rocosos. Así, se ha instalado en las estaciones CL33 del CALM Crater Lake en isla Decepción, en la estación LL de la red PT, pero también asociada a la malla CALM Limnopolar Lake de isla Livingston. En esta misma isla se ha instalado en las estaciones SO y CR (Tabla 8).

Tabla 8: Síntesis de las características de la instalación de dispositivos TDR para la medición de la humedad del terreno a distintas profundidades en las islas Livingston Y Decepción, Antártida.

DISPOSITIVO	CÓDIGO	PARÁMETROS	SENSOR	POSICIÓN	PROFUNDIDAD (cm)
A22040732	LL	VWC	1	Horizontal	5
			2	Vertical	20-30
			3	Vertical	50-60
			4	Horizontal	80
A22040728	SO	VWC & EC	1	Horizontal	5
			2	Vertical	20-30
			3	Horizontal	50
A22040729	CR	VWC	1	Horizontal	5
			2	Vertical	20-30
			3	Horizontal	50
A22040737	CL	VWC & EC	1	Horizontal	5
			2	Horizontal	20
			3	Horizontal	30
			4	Horizontal	50

Movimientos del terreno

De forma experimental, en la campaña 2022-23 se realizó la instalación de 2 dispositivos medidores de la inclinación que, adosados a un aparato de construcción casera, permitiría establecer la existencia de movimientos en la vertical asociados a los procesos de congelación-descongelación que ocurren en los suelos antárticos. Para ello, también se han utilizado dispositivos de la misma tecnología que los sensores de temperatura instalados en toda la red (Tabla 6). En esta ocasión se han empleado los del modelo M-Log5-Tilt de *Geoprecision*, dotados de un inclinómetro triaxial capaces de medir inclinaciones con una resolución de 0.0055 grados y una precisión de 0.1 grados. Además, mide temperaturas con una resolución de 0.06 °C, y una precisión de 1 °C. Estos dispositivos también se alimentan con una pila AA de litio de 1.5V que le proporciona autonomía para más de 5 años, mientras que su memoria, de 2 Mb, le permite registrar 400.000 valores, o lo que es lo mismo, 100.000 medidas, suficiente para registrar datos de forma horaria durante más de 11 años. Su descarga de datos se hace igualmente a través del software Flexgate 2 de *Geoprecision*, bajo un sistema operativo Windows.

Cada dispositivo (Fig. 7) se ha adosado de forma horizontal a un instrumento construido según las indicaciones establecidas en la bibliografía (Gruber, 2020), consistente en un brazo horizontal de 96,5 cm de longitud sujeto en un extremo, y mediante una rótula móvil, a un mástil anclado en profundidad en el permafrost de tal manera que se asegura que ese extremo permanece siempre a la misma altura. En el otro extremo del brazo horizontal en el que se

sitúa el sensor, se encuentra sujeto a un pie vertical de 9,5 cm de altura, mediante una pieza de doble rótula. El pie se encuentra apoyado directamente sobre la superficie del terreno con una base de madera, moviéndose arriba o abajo a medida que el terreno se congela o descongela, respectivamente. Ese movimiento del pie genera que el brazo horizontal y, por tanto, el sensor, dejen de estar horizontales y se inclinen, quedando dicho movimiento registrado por el sensor. Siguiendo las recomendaciones del propio autor del dispositivo (Gruber, 2020), se ha empleado acero inoxidable en lugar de madera para soportar mejor las condiciones ambientales y humedad del territorio polar.

Estos dos dispositivos han sido instalados en dos estaciones en las que por las condiciones del terreno se podrían esperar dichos procesos de levantamiento y subsidencia: La estación LL en la península de Byers de isla Livingston, y en la estación CL3 de isla Decepción. En ambos emplazamientos, por el carácter granular de los materiales del terreno, y la abundante presencia de agua en el subsuperficial, cabría esperar que los procesos de congelación-descongelación produzcan los cambios en el nivel del terreno. En el caso de la estación LL, se han observado en el área lóbulos de gelifluxión, por lo que es altamente probable que se den dichos movimientos.

En función de los resultados, se plantea extender este tipo de instrumentos a otras de las estaciones de la red PERMATHERMAL.



Figura 7: Vista de uno de los instrumentos de construcción artesanal para, con un sensor de inclinación, medir el levantamiento y hundimiento del suelo como consecuencia de los procesos de congelación/descongelación.

Campaña antártica 2023-24

Desarrollo de la campaña

Desarrollo general

La Campaña Antártica Española 2023-24 se ha desarrollado en un escenario de reducida complejidad debido a las mínimas restricciones relacionadas con la pandemia mundial causada por la expansión de la infección por coronavirus SARS-CoV2 (COVID-19), y que en España supuso el establecimiento de un estado de Alarma del 11 de marzo de 2020 al 8 de mayo de 2021, con las consiguientes complejidades logísticas y sanitarias en las consiguientes campañas. En esta campaña no existían inicialmente restricciones o cuarentenas más allá de los necesarios certificados de vacunación COVID y pruebas diagnósticas (antígenos) negativas previas al embarque en los buques/vuelos hacia la Antártida.

Durante la campaña se han realizado movimientos hacia/desde/en la Antártida mediante el uso de los buques Hespérides (Armada Española – UTM/CSIC), Santos Cirilo y Metodio (Armada Búlgara), y Betanzos (Empresa DAP), además de mediante vuelo chárter de la empresa DAP para la salida desde Antártida a Punta Arenas (Chile).

La campaña, con una duración de puerto a puerto de 44 días, ha permitido realizar trabajos de campo en la isla Livingston (emplazamientos en Península Hurd y en Península Byers) y en isla Decepción, haciendo uso de las instalaciones científicas técnicas singulares (ICTS) de las bases antárticas españolas “Juan Carlos I” y “Gabriel de Castilla”, además del campamento internacional Byers.

Personal investigador

En la campaña 2023-24 ha participado un solo investigador para realizar el mantenimiento de las estaciones PT y CALM en la zona Antártica. Esta persona fue el investigador responsable del mantenimiento fue Dr. D. Miguel Ángel de Pablo Hernández, profesor Titular de Universidad, adscrito al área de Geodinámica Externa de la Unidad Docente de Geología, del Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Alcalá, responsable de la red de estaciones PERMATHERMAL, y con 15 campañas antárticas de experiencia previa.

Calendario de campaña

El calendario de la campaña ha resultado similar al de otros años en cuanto a número de días de campaña, incluyendo los movimientos entre las islas Decepción y Livingston donde se encuentran las estaciones de la red PERMATHERMAL, con tiempo suficiente en cada emplazamiento para el desarrollo de las actividades de mantenimiento de dichas estaciones.

En este tiempo se ha podido realizar una campaña de trabajo normal en los emplazamientos de isla Decepción y de las penínsulas Byers y Hurd en isla Livingston, con el fin de cubrir los objetivos planteados.

De esta forma, la campaña se desarrolló entre los días 12 de enero y 3 de marzo de 2024, con los siguientes hitos:

- 12 de enero: Salida de España
- 13 de enero: Llegada a Buenos Aires (Argentina) y vuelo a Ushuaia.
- 16 de enero: Embarque en BIO Hespérides e inicio de la navegación hacia la Antártida.
- 19 de enero: Desembarco en isla Livingston. Acomodación en BAE Juan Carlos I, e inicio de tareas en zona de península Hurd.
- 7 de febrero: Tránsito en B/O “Santos Hermanos San Cirilo y San Metodio” hacia península Byers de isla Livingston. Desembarco en Península Byers, isla Livingston, e inicio de tareas.
- 13 de febrero: Cierre del Campamento Byers y tránsito en BIO Hespérides a isla Decepción.
- 14 de febrero: Desembarco en isla Decepción. Acomodación en BAE Gabriel de Castilla, e inicio de tareas.
- 26 de febrero: Embarque en buque Betanzos y tránsito a Isla Rey Jorge.
- 29 de febrero: Vuelo entre isla Rey Jorge (Antártida) y Punta Arenas (Chile). Alojamiento en Hotel a la espera de iniciar viaje de regreso
- 3 de marzo: Salida en avión de Punta Arenas (Chile) y finalización de la campaña.

En estas circunstancias, la campaña ha tenido una duración de 53 días, siendo 4 días de viaje desde/hacia territorio nacional, 6 días de espera en puertos de entrada/salida de Antártida, 8 días de navegación hacia/desde Antártida o en tránsitos locales, 18 días de estancia de la BAE Juan Carlos I, 5 días de estancia en campamento Byers, y 12 días de estancia en la BAE Gabriel de Castilla.

Condiciones meteorológicas

La campaña 2023-24 no se ha caracterizado por las malas condiciones climáticas, aunque sí por las lluvias persistentes, aunque no demasiado molestas para la realización del trabajo de campo. Cabe destacar que se han dado muchos días de viento durante la primera fase de los trabajos, coincidiendo con la estancia en la isla Livingston. No es de destacar muchos días de nevadas abundantes o ventiscas que impidieran la realización de las salidas de campo requeridas, pero sí abundantes días de fuertes vientos que, junto con la lluvia, limitaban las tareas a realizar considerando lo delicado de algunos de los instrumentos o la necesidad de usar equipos informáticos portátiles en el campo para el volcado de datos. Esto condicionó, por ejemplo, el acceso a zonas como Punta Hannah y Punta Barnard en isla Livingston. En isla Decepción, al no requerirse desplazamientos por mar, las condiciones meteorológicas no tuvieron implicaciones en el desarrollo de las tareas. Así, las condiciones no han producido retrasos o complicaciones importantes en las tareas de mantenimiento de las estaciones PT o la toma de datos in situ en las estaciones CALM, por lo que han podido cumplirse los objetivos marcados para la campaña.

Desarrollo de las tareas

El equipo investigador desplazado a la zona de estudio pudo realizar el mantenimiento de las estaciones PT y CALM situadas en la isla Decepción, y en la isla Livingston, incluyendo en el emplazamiento de península Byers. En todas las fases de la campaña se contó, cuando así fue necesario, con el apoyo de personal técnico de las bases antárticas para poder realizar algunas de las tareas necesarias. Un ejemplo de ello es la toma de datos de espesor de capa activa/espesor de suelo descongelado en la malla CALM Crater Lake, que se contó con el apoyo de varios miembros de la dotación. En el caso de la medida en el CALM Limnopolar Lake, se contó con la colaboración de investigadores del proyecto PARANTAR (I.P. Jesús Ruíz, Universidad de Oviedo). Investigadores de este proyecto también colaboraron con el mantenimiento de las estaciones PT de isla Livingston, así como con la instalación de algunos de los nuevos sensores de espesor de nieve y flujo térmico.

Durante la estancia en la isla Decepción, además de la medida del espesor de la capa activa en la malla CALM, se realizó el mantenimiento de todas las estaciones situadas en la misma, incluyendo algunas estaciones PT

pertenecientes a la red PERMANTAR, de la Universidad de Lisboa, Portugal, con quien se colabora estrechamente desde el año 2000. Durante esta fase de la campaña se procedió a retirar algunos sensores e instrumentos pertenecientes, a instrumentos obsoletos (termonivómetros) al concluirse la reinstrumentalización de la red. También se realizó la desmantelación de la estructura de soporte de una de las cámaras fotográficas y se empleó este material para renovar la instalación de la otra cámara existente en la zona.

Por otro lado, y debido a la falta de sensores, no pudo realizarse la reinstalación de algunas experiencias, como los termonivómetros de alta resolución o la temperatura del suelo distribuida en el sitio CALM de Crater Lake. Se trataba de instrumentaciones secundarias, y se había priorizado la renovación de los instrumentos principales de las estaciones PT y CALM. De especial importancia en esta fase ha sido la instalación de una nueva estación, Cerro Caliente, aprovechando un sondeo existente desde 2010. Además, se procedió a la instalación de sensores de flujo térmico en varias estaciones.

En la fase de trabajo en península Byers de la isla Livingston, se procedió a la renovación del mástil de la estación Domo, y a la instalación del sensor de espesor de nieve, quedando la estación completamente instrumentada. Queda pendiente la retirada de las baterías y el panel solar de la antigua cámara fotográfica instalada en la zona del CALM Limnopolar Lake. Se realizó la medición del espesor de la capa activa sin novedad.

Finalmente, en la fase de trabajo en península Hurd de la isla Livingston, se tuvieron días suficientes de trabajo para la realización de todo el mantenimiento de las estaciones, incluyendo la instalación de sensores de flujo térmico en algunas de las estaciones, y la desmantelación de los termonivómetros existentes. No se pudo realizar la reinstrumentalización de la estación Glaciar por encontrarse el sondeo cubierto de hielo y nieve.

En los tres emplazamientos de trabajo, además de los citados mantenimientos y tomas de datos in situ, se procedió a la recuperación de los datos de los dispositivos para la medida de la humedad del terreno a distintas profundidades instalados en la anterior campaña como colaboración con investigadores de la República Checa y de Portugal, y también a los de medida de los movimientos de levantamiento y subsidencia del terreno.

Consecución de objetivos

Con todas las actividades realizadas, se ha conseguido alcanzar el 90% de los objetivos marcados para la campaña 2023-24 (Tabla 9), realizándose la toma de datos de los dos sitios CALM con los que cuenta la red PERMATHERMAL; el volcado de datos de todas las estaciones PT; la recuperación de imágenes de las cámaras fenomenológicas instaladas, y de la estación nivométrica de la red. Además, se realizó la instalación de los nuevos sensores de medida de espesor de nieve que quedaban pendientes, y los nuevos sensores de flujo térmico. También se instaló una nueva estación (Cerro Caliente). Quedó pendiente únicamente la instalación de sensores de temperatura del suelo y del terreno en la estación GL, que resultó imposible por la presencia de hielo.

Además, se pretendía instalar una serie de estaciones auxiliares en distintos puntos de la isla Livingston, con el fin de crear una red perimetral. De los 6 puntos planteados para las nuevas instalaciones, 2 se instalaron en la pasada campaña y 1 más ha sido instalado en la campaña 2023-24 (Punta Siddins), si bien ésta fue realizada por técnicos de la BAE Juan Carlos I.

Tabla 9: Síntesis de los principales objetivos marcados para la campaña antártica 2022-23, y grado de consecución de estos.

	PRIORIDAD	OBJETIVO	% COMPLETADO
1	Volcado de datos	Recuperar los datos adquiridos por los sensores en los distintos emplazamientos durante el año 2023	100%
2	Medida del espesor de la capa activa	Medición del espesor de la capa activa en los sitios CALM de Byers y Decepción, y otras medidas auxiliares	100%
3	Mantenimiento de las estaciones	Realizar las reparaciones y mejoras necesarias en las estaciones para permitir su funcionamiento durante el año 2024	100%
		Renovación/reemplazo de sensores de temperatura para estimar espesor de nieve, por sensores de espesor de nieve.	100%
4	Instrumentalización de 3 estaciones	Realizar la instalación inicial de sensores en 3 estaciones de la red PERMATHERMAL pendientes de instalar de campañas anteriores.	80%
5	Instalación de sensores de flujo térmico	Instalación, en 5 de las estaciones de la red PERMATHERMAL, de sensores para la medida del flujo térmico en el terreno.	100%
6	Ampliación de la red PERMATHERMAL	Instalación de 4 nuevas estaciones para medida de la temperatura del aire y de la superficie del suelo en el entorno de la isla Livingston (Punta Elefante, Cabo Shirref, y Punta Siddins, Punta Williams).	25%

El estado de las estaciones y mantenimientos realizados

En general, el estado en el que se han encontrado las estaciones de la red PERMATHERMAL durante la visita realizada a ellas durante la campaña antártica ha sido muy bueno.

En isla Livingston, en la península Byers no se observaron problemas en los instrumentos, por lo que no fueron necesarios mantenimientos importantes. Por otro lado, en península Hurd, tampoco se encontraron problemas especiales, salvo dos soportes de sensores de nieve rotos en las estaciones SO y GL, que fueron repuestos. El protector de dicho sensor de la estación SO estaba roto, pero se mantuvo en ese estado a la espera de un diseño que permita reponerlo en la siguiente campaña. En la estación CR, el sensor de humedad del suelo estaba roto debido a que le entró agua, siendo necesario proceder a su reposición. También cabe destacar que la sonda termométrica de la estación GL no tomó datos durante todo el año, si bien no se han detectado fallos en la electrónica. En cualquier caso, esta estación será retirada, probablemente, en la siguiente campaña, cuando se retire el hielo que cubre el sondeo y pueda hacerse el cambio de sensores.

En isla Decepción, solo cabe destacar la existencia de problemas en uno de los instrumentos, la sonda de temperatura del terreno debido a la rotura del conector de la sonda con el registrador de datos. Fue retirada para su futura sustitución, al no disponerse de repuestos. Por un lado, la estación nivométrica tenía la batería completamente agotada y no había tomado datos en todo el año. Fue reemplazada la batería y recalibrados los sensores de espesor de nieve y la balanza de nieve, pero será necesario recalibrar el sensor de propiedades de la nieve. En el resto de las estaciones, se ha retirado el termonivómetro cuando no servía de sujeción a otros instrumentos.

En este lugar se procedió también a la completa desmantelación de la estructura de una de las cámaras, usándose ese material para reemplazar la estructura de la única cámara que queda en la zona, y que estaba fuertemente deteriorado tras su instalación en 2008.

El resto de las estaciones visitadas, no mostraron problemas y sólo se requirió el tensado de los vientos para su afianzamiento.

Cambios de instrumentación

Retirada de instrumentación

Durante la presente campaña se ha procedido a la retirada de varios experimentos, tanto en isla Decepción como en isla Livingston.

En la zona de Crater Lake se procedió a la completa desmantelación de la estructura de la cámara fenomenológica 2, y el material fue empleado para la reposición de la estructura de la cámara fenomenológica 1B, que había sido instalada en 2008 y se encontraba fuertemente deteriorada.

El experimento de temperatura superficial distribuida en la malla CALM de Crater Lake, tampoco ha podido ser reinstalado por falta de sensores para ello, pero se plantea volver a instalarlo en el futuro. Esta retirada no implica eliminación de elementos del terreno, pues ya habían sido retirados dos campañas atrás. Igualmente, se retiraron diversos mástiles de los termónivómetros de las estaciones PT, que ya han sido reemplazados por los nuevos sensores. Igualmente, en la isla Livingston, tanto en la península Hurd como en península Byers, se han retirado los mástiles de madera de los termónivómetros.

Instalación de nuevos instrumentos

Durante la campaña 2023-24 se ha realizado la instalación de algunos elementos, con el fin de complementar la instrumentación existente. Así, se instalaron sensores de espesor de nieve CL-4 en Crater Lake de Isla Decepción. En ese emplazamiento también se realizó la instalación de sensores de flujo térmico en las estaciones CL-1, CL-2 y CL-3.

En isla Decepción también se realizó la instalación de un mástil con sensores de temperatura del aire, espesor de nieve, y temperatura de la superficie en la estación CC. Además, se introdujeron sensores de temperatura en su sondeo.

Por su parte, en la península Hurd de isla Livingston, se instalaron sensores de flujo térmico en las estaciones SO y CR. Aunque estaba planeado realizarlo en la presente campaña, debido a la presencia de hielo y nieve, no se ha podido completar la reinstrumentalización de la temperatura de la superficie ni la temperatura del terreno en la estación GL de isla Livingston por encontrarse

cubierta por aproximadamente 1 m de hielo, quedando pendiente para la siguiente campaña.

En la península Byers de la misma isla se instaló un sensor de espesor de nieve (con la consiguiente reposición del mástil que lo soporta) en la estación DO, y un sensor de flujo térmico en la estación LL.

Además de estas cuestiones, cabe destacar que en la presente campaña se ha procedido a realizar la instalación de 1 nuevas estaciones para la red, si bien no se trata de estaciones PT en sentido estricto, pues solo se ha instalado instrumentación para la medida de la temperatura del aire y de la superficie del suelo, asociados a un mástil metálico con vientos de cuerda. Esta estación ha sido ubicada en Punta Siddins de la isla Livingston, quedando pendientes para otros años la instalación de estaciones similares en Cabo Shirref, Punta Williams, y Punta Elefante.

Estas 6 estaciones configurarán una red perimetral a la isla Livingston que, junto con las estaciones PT establecidas, permitirán conocer cuál es la variabilidad de estos parámetros (temperatura del aire y del suelo) en la isla. Este tiene por objeto empezar a establecer estudios a escala más regional dentro de la propia isla Livingston, además de localizar posibles emplazamientos para extender la red PERMATHERMAL por la isla, ya que el uso de los nuevos dispositivos permite una mayor autonomía y, por tanto, la toma de datos en lugares más remotos y menos visitados.

Incidencias

Sin incidencias que destacar en la realización de la campaña Antártica 2023-24 para el mantenimiento de las estaciones PT y CALM en las islas Livingston y Decepción, Antártida.

Datos del año 2023

Generalidades

Durante la campaña antártica 2023-24 se han recuperado un total de 4,55 Gb de datos en un total de 3785 archivos relacionados con 70 mediciones, 92 dispositivos y unos 100 instrumentos en las zonas antárticas de estudio de la red PERMATHERMAL, incluyendo las fotografías de las cámaras fenomenológicas y la estación nivométrica.

Cabe destacar, por un lado, la reducción en el número de archivos, debido a la reducción del número de dispositivos de tipo *iButton* como consecuencia del proceso de renovación iniciado las campañas anteriores, en el que se instalaron una gran cantidad de dispositivos con múltiples sensores acoplados al mismo registrador de datos. Esta evolución continuará la próxima campaña ya que durante la actual se ha completado la renovación de dispositivos, retirándose definitivamente todos los termónivómetros existentes en las estaciones PT.

Todos los dispositivos renovados han funcionado correctamente, excepto un sensor de temperatura de la superficie (en estación CR), y de temperatura del terreno (en estación CL-77), si bien dos sensores de espesor de nieve no han fallado, pero al romperse su soporte han generado datos no válidos (en estaciones SO y GL). El resto han devuelto datos horarios en todos los parámetros en los que se instalaron, tal y como fueron programados, no habiéndose detectado inconsistencia de datos ni problemas de alimentación de ningún tipo.

Respecto a los sensores no renovados, se han registrado algunas pérdidas de datos, como solía ser normal debido a fallos individuales de los dispositivos, o a fallos en la electrónica (registrador de datos o alimentación, principalmente). Estos fallos, causados por la antigüedad de los instrumentos y su exposición a las duras condiciones ambientales reinantes en la zona de estudio de la Antártida, hacen que siga habiendo pérdida de datos que afectan a la calidad de la serie temporal. Sin embargo, esto solo ha afectado a medidas auxiliares, no a los instrumentos principales de la red, por lo que la continuidad del estudio del régimen térmico del permafrost y la capa activa no peligran. La renovación de la instrumentación llevada a cabo en la presente campaña pretende terminar definitivamente con estos problemas y reducirlo a casos esporádicos y aislados.

Disponibilidad de datos

La disponibilidad de datos es alta en todos los instrumentos independientemente de su emplazamiento (Tabla 10) si bien los datos en algún caso podrían no ser válidos por distintas circunstancias relacionadas con el fallo de sensores, las condiciones meteorológicas u otras circunstancias.

Tabla 10: Síntesis general de la disponibilidad de datos de los distintos sensores e instrumentos de las estaciones de monitorización de la red PERMATHERMAL en las islas Livingston y Decepción de la Antártida. AIR: Temperatura del aire.; SNO: Temperatura/espesor de la nieve; SUR: Temperatura de la superficie; BOR: Temperatura del terreno; GSH: Movimientos del terreno; TDR: Humedad del suelo; TOP: Temperatura del techo del permafrost; CAM: Cámara time-lapse; SPA: Estación nivométrica; [●]: con datos; [◐]: datos parciales; [○] sin datos o con datos no válidos; [□] instrumento temporalmente sin sensores; [] No existe dicha instrumentación.

LUGAR	ZONA	ESTACIÓN	CÓDIGO	TIPO	INSTRUMENTACIÓN											
					AIR	SNO	SUR	BOR	GSH	TDR	TOP	CAM	SPA	ALT		
Isla Deception	Crater Lake	Crater Lake	A16	CALM-S	●	□	□		●		●	●	●	●		
			CL-1	PT	●	●	●	●								
			CL-2	PT	●	●	●	●								
			CL-3	PT	●	●	●	●								
			CL-4	PT	●	●	●	●								
			CL-33	PT		●	●	●		●						
			CL-77	PT		●	●	○								
Isla Livingston	Península Byers	Limnopolar Lake	A25	CALM-S		□	□		●		●		●			
			LL-1	PT	●	●	●	●		●						
			LL-2	PT				●								
	Península Hurd	Domo	BAE-Juan Carlos I	DO	PT	●		●	●							
				JC	PT	●	●	●								
		Sofia	Nuevo incinerador	Incinerador	NI	PT	●	●	●	●						
					IN	PT	●	●	●	●						
					CR	PT	●	●	○	●		●				
					MO	PT	●	●	●	●						
					GL	PT	●	◐	□	○						
					SO-1	PT	●	◐	●	●		●				
					SO-2	PT				●						

Así, los dispositivos *Geoprecision* M-Log5W empleados para la medida de la temperatura del aire (AIR), del espesor de nieve (SNO), de la superficie (SUR), del terreno a distintas profundidades (BOR), y del techo del permafrost (TOP) han demostrado una importante robustez y buen funcionamiento en todas las estaciones. En los emplazamientos donde se han producido fallos en la medida del espesor de nieve (estaciones SO y GL), no se ha debido a un fallo del sensor, sino del soporte en el que se encontraban, resultando en la obtención de datos parciales. Los fallos en los sensores de temperatura de superficie y del terreno (estaciones CR y CL-77) se han debido a fallos en la manipulación y a la pérdida de estanqueidad. El fallo a mitad de año en la alimentación de la estación nivométrica en el CALM Crater Lake ha supuesto la pérdida parcial de datos.

A continuación, se describen los datos disponibles de cada tipo de medición en las estaciones PT:

Temperatura del aire (AIR): Todos los sensores para la medida de la temperatura del aire han funcionado de forma correcta en todas las estaciones no registrándose ninguna incidencia en ellos.

Temperatura/Espesor de la nieve (SNO): En el caso de los termónivómetros, y como cabría esperar debido a la exposición de los sensores al ambiente, se han producido pérdida de sensores y sus datos. Sin embargo, estas pérdidas en general son menos graves que las de años pasados, a pesar del envejecimiento de los sensores y la no posibilidad de renovarlos. La pérdida de datos de temperatura de la nieve debido a los fallos de los sensores individuales (7) que constituyen cada uno de los 7 termónivómetros que quedaban en la red, ha sido bastante reducida, fallando, en general, un único sensor (4 dispositivos), o ninguno (2 dispositivos). Solo en uno de ellos se han perdido datos en 4 sensores haciendo difícil su uso para el cálculo del espesor de nieve. En el caso de los sensores de espesor de nieve que reemplazan a los termónivómetros, todos los disponibles han funcionado perfectamente, aunque, en las estaciones SO y GL, debido a la rotura de su soporte, a pesar de que se han recuperado los datos de todo el año, éstos no nos válidos para la totalidad del periodo.

Temperatura de la superficie (SUR): Todos los sensores para la medida de la temperatura de la superficie del suelo en todas las estaciones han funcionado de forma correcta, excepto en la estación CR, que, debido a una pérdida de estanqueidad, ha supuesto el fallo del dispositivo y la pérdida de datos.

Temperatura del terreno (BOR): En general, se ha podido recuperar datos de todos los dispositivos instalados en los sondeos de todas las estaciones, excepto en la estación CL-77 debido a un fallo en el conector de la cadena termométrica. Otra excepción es la estación GL, donde aún se encuentra instalada una cadena termométrica con un registrador de datos de tipo CR1000 de *Campbell Scientific*, y que ya desde el año pasado presenta problemas, pero no es posible reemplazar la sonda debido a la presencia de nieve.

Humedad del terreno (TDR): Los distintos 4 sensores instalados en las estaciones CR, SO, LL y CL-33 han funcionado de forma correcta, devolviendo datos de temperatura y humedad del terreno a distintas profundidades.

En el caso de las estaciones CALM, la disponibilidad de datos de las distintas medidas e instrumentos ha sido la siguiente:

Espesor de la capa activa (ALT): Se ha podido realizar la medición del espesor de la capa activa tanto en la estación CALM Crater Lake (A16) de la red PERMATHERMAL en isla Decepción, como en la estación CALM Limnopolar Lake (A25), situada en península Byers de la isla Livingston. Hay que destacar que la fecha de la medición en ambos casos es similar a la de otras campañas.

Movimientos del terreno (GSH): Los dos sensores instalados para la medida del levantamiento y subsidencia del terreno debido a los procesos de congelación/descongelación han funcionado de forma correcta devolviendo datos del año completo.

Temperatura del techo del permafrost (TOP): Se han podido recuperar los datos de los 16 sensores instalados en el CALM de Crater Lake, en isla Decepción, el único de los dos sitios CALM donde está instalado este tipo de medida. No se ha detectado ningún problema en los mismos.

Temperatura superficial distribuida (SUR): No se habían instalado los sensores en la campaña anterior, por lo que no había datos que recuperar.

Espesor de nieve distribuida (SNO): No se habían instalado los sensores en la campaña anterior, por lo que no había datos que recuperar.

Parámetros nivométricos (SPA): La estación nivométrica ha sufrido la pérdida parcial de datos por fallos de alimentación, dejando menos de medio año de datos hasta su desconexión a principios de junio.

Fotografías fenomenológicas (CAM): En la actualidad se tienen 3 cámaras modernas instaladas (1 en el CALM Crater Lake y 2 en el CALM Limnopolar Lake), y se han podido recuperar imágenes de todas ellas, sin interrupciones ni cortes en la secuencia esperada. En una revisión preliminar se han observado cambios de encuadre en la cámara de Crater Lake, debido a los efectos del viento en su soporte. A pesar del cambio del campo de visión, no ha habido interrupciones en la secuencia de imágenes.

Temperatura del Aire

Las temperaturas del aire registradas durante el año 2023 (Fig. 8) alcanzan valores mínimos ligeramente inferiores a los del año anterior, con $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ alcanzados a mediados del mes de septiembre, aunque hay otros mínimos alcanzados también en ligeramente inferiores a los -15 a mediados de junio y de julio. Las temperaturas máximas, de algo más de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, son alcanzadas a finales de enero de 2024, y se observan varios episodios de temperaturas algo inferiores a esa en abril y en junio, registrado en todas las estaciones. A diferencia de los años 2020 y 2021, no cabe destacar picos de calor importantes, ya que las temperaturas más altas nunca llegan a los 10°C en los veranos. Temperaturas más bajas registran repetidas mínimas puntuales a lo largo del otoño, de entre -5°C y -10°C .

Entre las estaciones, cabe destacar una gran similitud en su evolución térmica, siendo las diferencias entre estaciones debido a sus diversas ubicaciones y altitudes, menor a aproximadamente $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. En todas ellas se observa que las variabilidades térmicas a corto plazo son más importantes durante el invierno que el verano, registrándose por ejemplo cambios de hasta 14°C durante el invierno, y de apenas 3 o 4°C durante los veranos.

En verano las temperaturas son menos variables que durante el invierno y las temperaturas medias rondan los $3^{\circ}\text{-}4^{\circ}\text{C}$, mientras que durante la primavera las temperaturas medias se posicionan en rangos positivos de entre $1\text{-}2^{\circ}\text{C}$. Este año el final del verano podría establecerse térmicamente a finales de marzo.

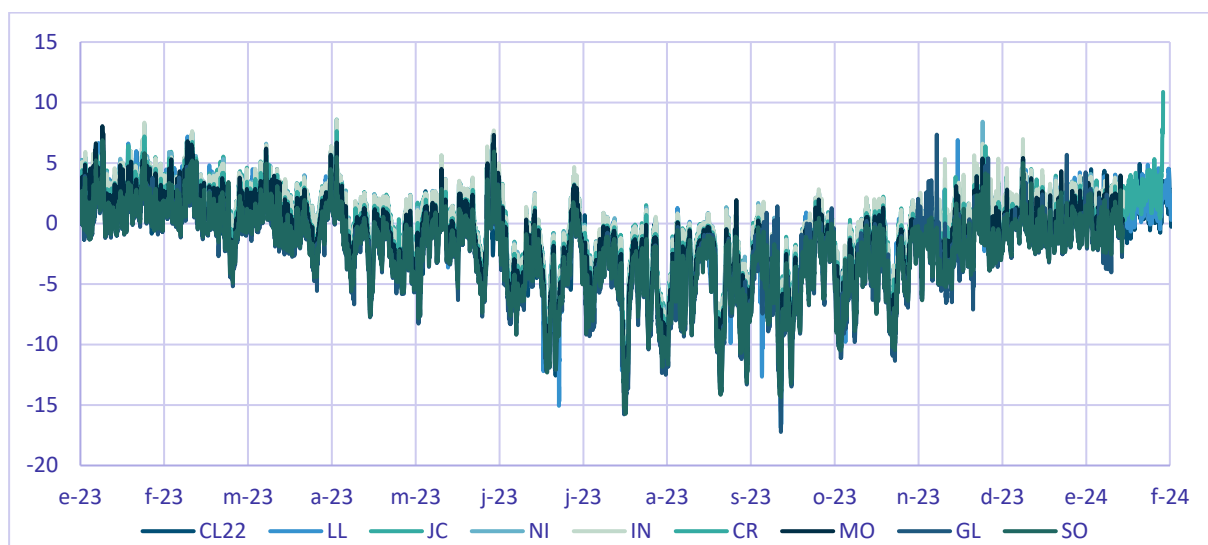


Figura 8: Temperaturas del aire (en $^{\circ}\text{C}$) registradas en las distintas estaciones de la red PERMATHERMAL en las islas Livingston y Decepción, Antártida, a lo largo de 2023.

Temperatura de la nieve

Los datos de temperatura del aire a distintas alturas utilizado para derivar los espesores de nieve muestran una desigual cobertura nival en función de las estaciones, como cabría esperar, ya que las distintas ubicaciones y su nivel de exposición facilitan la acumulación en puntos más protegidos, o la dificultad para acumularse la nieve en zonas más venteadas. En general, se observa que las temperaturas del aire a distintas alturas (Fig. 9) tienen un comportamiento similar, como cabe esperar, a los datos de temperatura del aire (Fig. 8).

Estos datos permiten determinar la presencia de nieve, cuando la variabilidad térmica registrada en los sensores inferiores es menor que la de los sensores situados por encima. En los casos en los que se ha podido recuperar más datos es posible ver cómo la cubierta nival se acumula a partir del mes de abril, y empieza a ser importante a partir del mes de mayo y junio (Fig. 9). El espesor máximo alcanzado en las estaciones debe ser superior a los 80 cm en las estaciones donde más nieve se acumula.

Los datos térmicos también permiten observar cómo el inicio de la fusión ocurre a mediados de septiembre, si bien la nieve no desaparece por completo hasta finales de noviembre, dejando el suelo descubierto antes incluso del inicio de verano meteorológico.

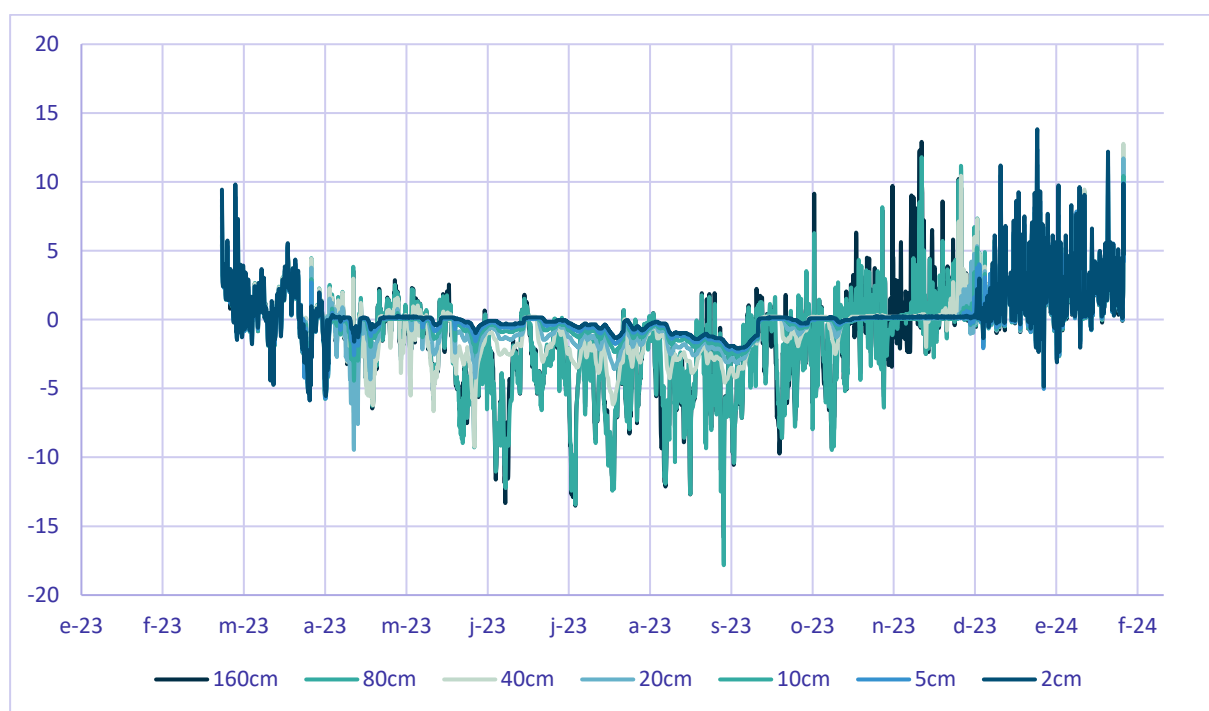


Figura 9: Temperatura de la nieve (en °C) en una de las estaciones de la isla Decepción, mostrando el distinto comportamiento de la temperatura del aire a distintas alturas sobre el suelo cuando existe una cubierta de nieve.

Espesor de la nieve

Por primera vez se han obtenido datos de espesor de nieve en la mayor parte de las estaciones PT de la red PERMATHERMAL (Fig. 10) gracias al uso de la instalación de nuevos sensores de medida de la distancia al suelo. Tras el procesado de los datos es posible derivar este espesor de nieve con una resolución aproximada de 1 cm. Gracias a estos datos es posible realizar un análisis muy detallado de la evolución de la cubierta nival en cada emplazamiento y de forma general.

Así, se observa que los espesores máximos registrados son de alrededor de 1 m a mediados de octubre, si bien la nieve acumulada es muy dispar en las estaciones, pues en otras, situadas en lugares más venteados no superan los 200 cm. La acumulación de nieve comienza de forma clara a mediados de marzo, si bien hay algunas nevadas ligeras con anterioridad que apenas dejan unos mm de espesor. Mientras en algunas estaciones van acumulando nieve de forma progresiva, otras lo hacen de forma episódica mostrando una tendencia más escalonada (Fig. 10). Es de destacar que la mayor acumulación de nieve se produce desde mediados de julio en el año 2023, y con episodios importantes en el mes de octubre antes de que comience la rápida fusión de la cubierta nival desde principios de noviembre.

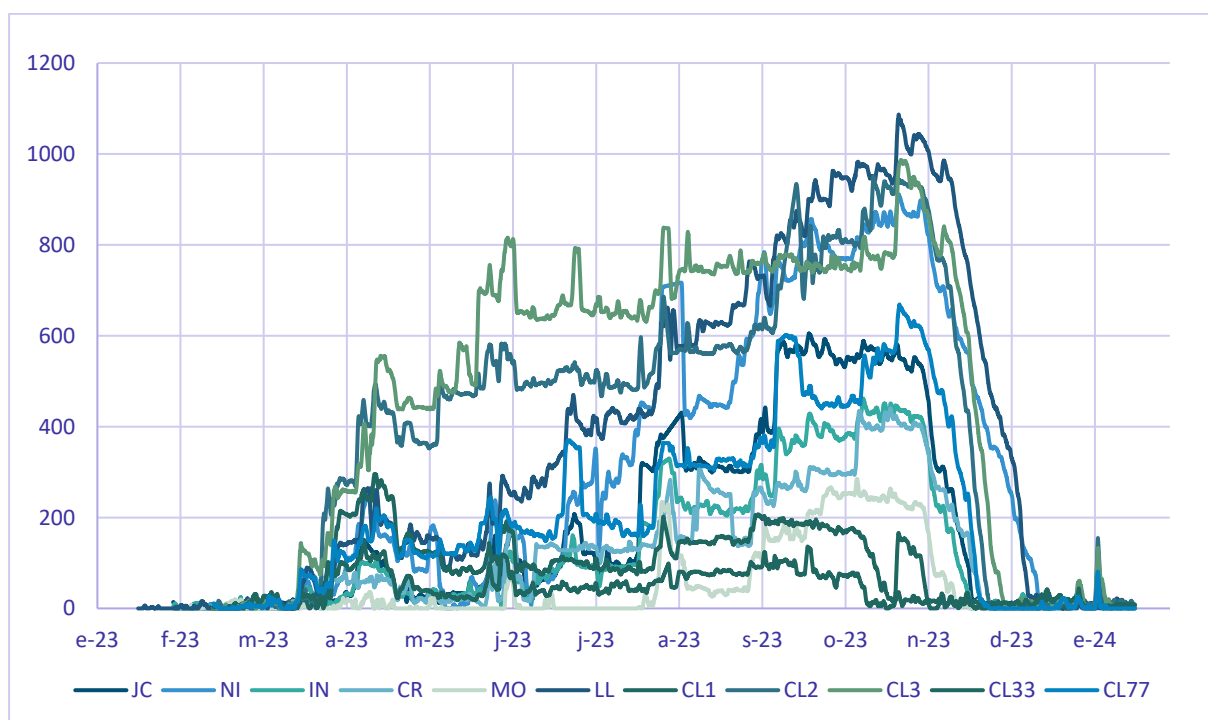


Figura 10: Espesor de la cubierta nival (en mm) a lo largo del año 2023 medido por primera vez de forma continua en la mayor parte de las estaciones de la red PERMATHERMAL.

Temperatura de la superficie

La temperatura de la superficie del suelo registrada en todas las estaciones de la red de monitorización (Fig. 11) muestran patrones de comportamiento similar, si bien con distintas amplitudes térmicas, y periodos de descongelación de distinta longitud, relacionado con la distinta duración de la cubierta nival sobre el terreno.

Cabe destacar que mientras en las temperaturas del aire las diferencias entre estaciones son mínimas (Fig. 8), en la temperatura de la superficie del suelo se ve una clara variación del comportamiento de unas a otras. Es en la estación del Monte Reina Sofía donde la amplitud térmica es más reducida que en las estaciones situadas a menor altitud, y donde el periodo de congelación tiene una mayor duración. Destaca la distinta duración del periodo de efecto cortina (ej., [Outcalt et al., 1990](#)), de apenas 1-2 semanas en algunas estaciones, a dos meses y medio en otras. El final del periodo de descongelación del suelo ocurre entre a lo largo del mes de diciembre. El inicio del periodo de congelación a principio de abril de 2023 es brusco en todas las estaciones. Esto indica una rápida acumulación de nieve en ese momento, si bien el espesor de esta nieve debe ser inferior al de años anteriores, pues se registran temperaturas más bajas durante el invierno, causado por un menor efecto aislante de esta cubierta nival. Las temperaturas máximas durante el verano de 2024 son claramente inferiores a las registradas en el verano de 2023 y repitiéndose picos de más de 25°C en enero de 2023. Las más bajas (unos -10°C) se alcanzaron en el invierno de 2023.

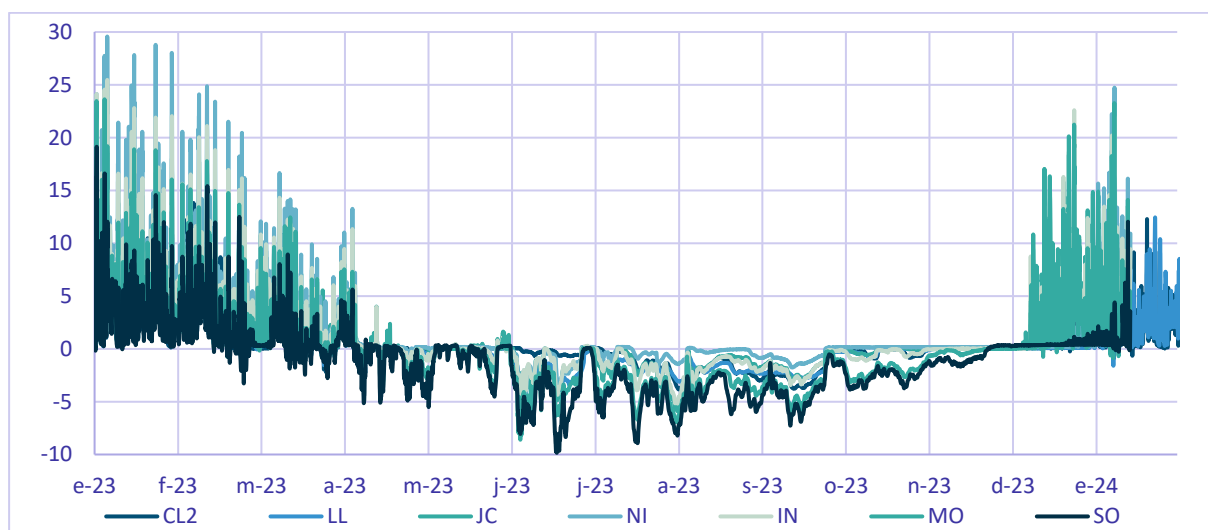


Figura 11: Temperaturas de la superficie del suelo (en °C) registradas en 10 estaciones de monitorización de la red PERMATHERMAL en las Livingston y Decepción de la Antártida, a lo largo del año 2023.

Temperatura del terreno

Los datos de temperatura del terreno a distintas profundidades medidos por los sensores instalados en el interior de perforaciones que se adentran hasta los 25 m, permiten conocer el estado térmico de la capa activa e incluso del permafrost, cuando la perforación se adentra en él. Los datos de temperatura registrados (Fig. 12) más cerca de la superficie tienen un comportamiento similar a los de la temperatura de la superficie (Fig. 11), registrándose temperaturas de hasta 8 °C en el verano de 2023 y de hasta 11 °C en el de 2024, mucho mayores que los registrados en el verano de 2020 durante la ola de calor que afectó a la zona. Además, la cobertura nival que se puede deducir que comenzó en torno a principios de abril y hasta finales de diciembre, si bien esta fecha es variable de unos emplazamientos a otros, al igual que la fecha de desaparición de ésta.

El registro de temperaturas muestra que en muchas estaciones la capa activa finaliza en torno a los 50 cm de profundidad, y que el permafrost se extiende hasta profundidades variables de hasta 5m en las estaciones de isla Decepción, y más de 25 m en las estaciones de península Hurd en isla Livingston. Estos datos también permiten establecer que, en algunos emplazamientos, especialmente en isla Decepción, el permafrost se encuentra a temperaturas muy altas muy cercanas a los 0 °C y poco variables (Fig. 12). Esto pone de manifiesta que ese permafrost se encuentra en su límite de estabilidad.

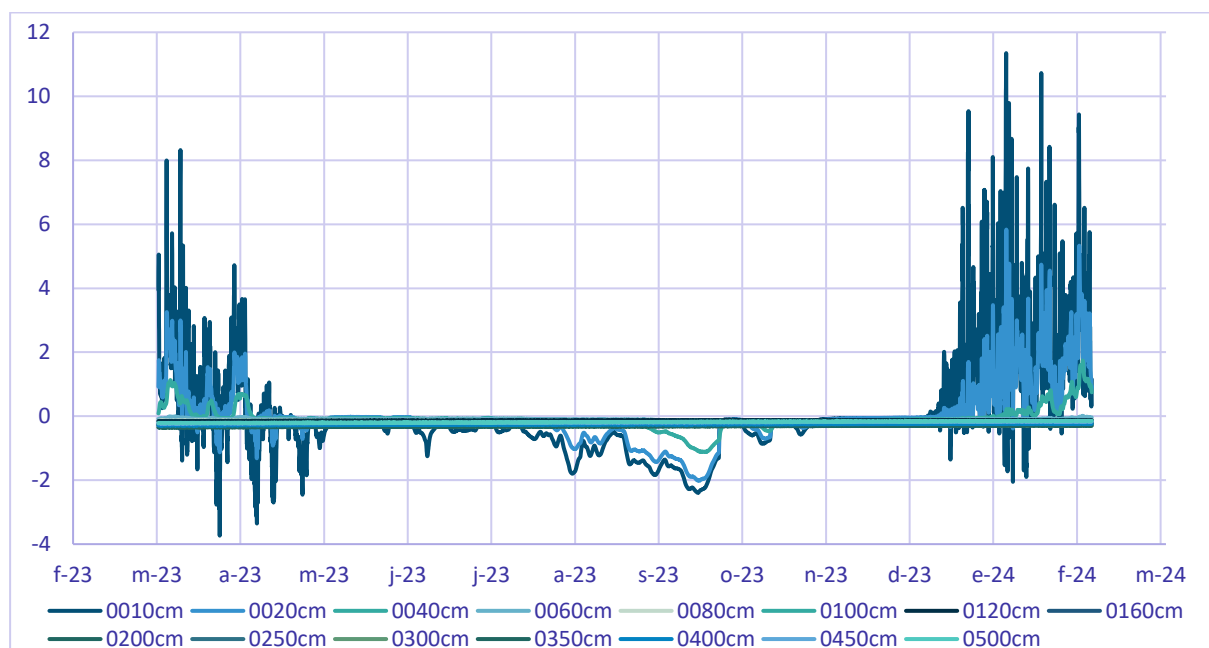


Figura 12: Datos de temperatura del terreno (en °C) registrados a distintas profundidades hasta 5 m en el sondeo DEC_CL-3 en isla Decepción, a lo largo del año 2023.

Espesor de la capa activa

Medido mediante el uso de una sonda mecánica manual, se realizó la toma de datos del espesor de la capa activa en ambos sitios CALM. Primero en el sitio CALM Limnopolar Lake (A25) el 10 de febrero de 2024, y posteriormente el sitio CALM Crater Lake (A16), en isla Decepción, el 20 de febrero de 2024 (Fig. 13). Estas fechas son muy similares a las del año anterior, con 3 días de diferencia en el primer CALM, y 15 en el segundo. De esta forma se continúa tomando datos de forma ininterrumpida en el sitio CALM de Cráter Lake, y con únicamente 2 años sin datos en el CALM de Limnopolar Lake.

Al igual que en años previos, los datos el CALM Limnopolar Lake muestran una cierta variabilidad a lo largo de una de las diagonales de la malla, pasando desde los 10-20 cm de espesor en un sector, a los más de 100 cm en el otro, si bien estos puntos de alto espesor de la capa activa son más escasos que en años anteriores. En cambio, en el CALM Crater Lake, se muestra una importante homogeneidad en toda la malla, con espesores de entre 30 y 45 cm, siendo solo superior o inferior en puntos muy concretos, con un rango y patrón similar al del año anterior. Aunque dentro de este rango, los valores menores se localizan a lo largo del eje Y, en una banda central al eje X de coordenadas relativas, de la misma forma que ocurriera en años anteriores.

Los patrones observados en ambos sitios CALM confirman la no aleatoriedad de los valores, la no existencia de artefactos en los datos, y/o la no existencia de errores sistemáticos en la toma de medida.

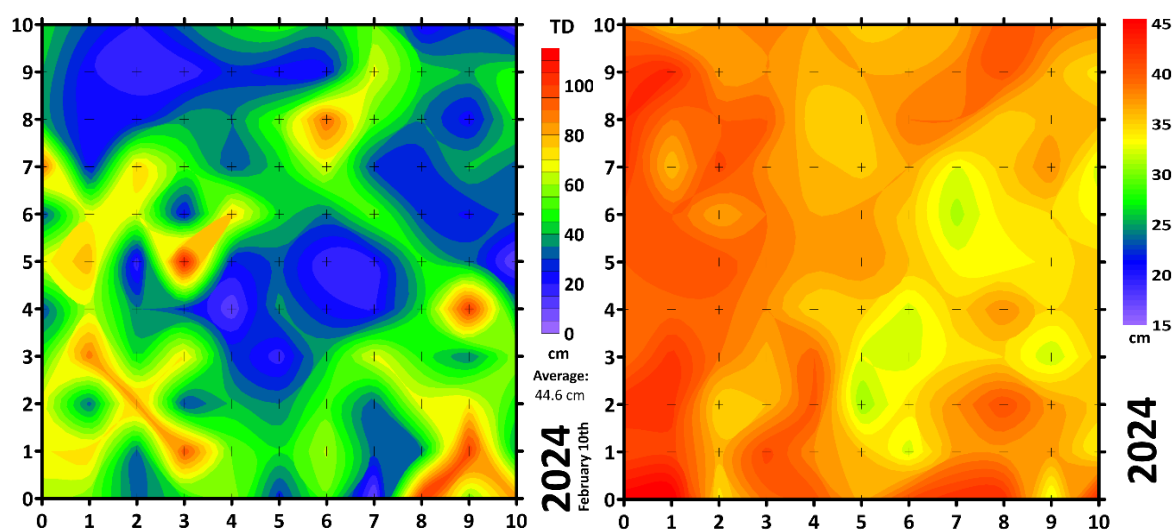


Figura 13: Mapa de espesor de la capa activa medido en los sitios CALM Limnopolar Lake (izquierda) y Cráter Lake (derecha), en Livingston e isla Decepción, el 7 de febrero y el 6 de marzo de 2023, respectivamente.

Temperatura del techo del permafrost

La Temperatura del Techo del Permafrost (TTOP) se mide de forma continuada en 16 nodos de la malla CALM Crater Lake en isla Decepción. En esos datos se puede observar temperaturas próximas a los 0°C durante 5 meses al año (Fig. 14), excepto en los meses de invierno, entre abril y noviembre. En este periodo la temperatura del techo del permafrost desciende hasta alcanzar mínimas de algo menos de -4°C en muchos de los nodos, claramente más frías que el año 2022 que se alcanzaron los -3 °C.

A pesar de que el comportamiento térmico en los nodos es muy similar, se puede observar que hay diferencias en algunos de los puntos, donde el periodo de temperaturas cercanas a los 0°C se prolonga hasta bien entrado el invierno, descendiendo muy poco durante el invierno (casi 4 °C menos) y menos variables que en el resto. Éste es el caso de los nodos (4,2) y (6,6), indicando que estos nodos se han cubierto antes de nieve que ha impedido una transmisión rápida de las temperaturas atmosféricas. En el resto de los nodos esta atenuación de la variabilidad se produce a partir de mediados de septiembre, indicando un incremento de la cubierta nival al final del invierno. El proceso de descongelación del suelo comienza a partir de mediados de septiembre en la mayoría de los nodos, cuando se observa que sus curvas de temperatura inician el camino al periodo de estabilidad térmica a 0°C. Estas diferencias se asocian a distinta cobertura de nieve en los distintos nodos de la malla CALM.

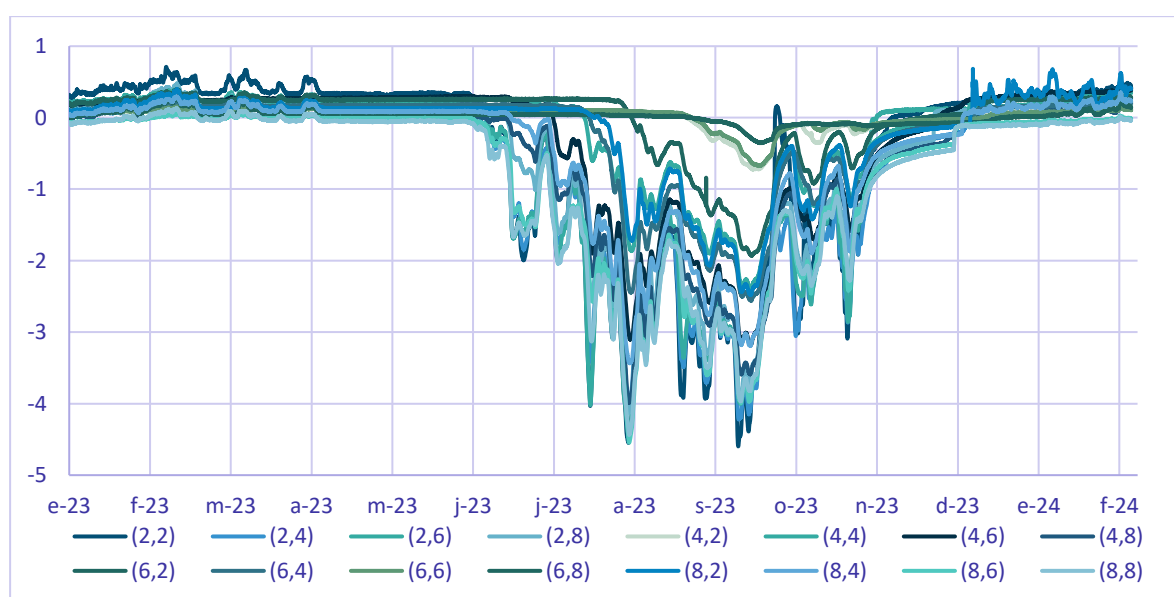


Figura 14: Evolución temporal de las temperaturas del techo del permafrost (en °C) en los nodos de la malla CALM Cráter Lake en isla Decepción, Antártida, entre enero de 2022 y febrero de 2023.

Parámetros nivométricos

Tras el cambio de batería en la pasada campaña, se ha vuelto a producir un fallo de alimentación en el dispositivo, que ha perdido la alimentación a principios de junio, impidiendo la toma de datos desde ese momento. En todo caso, hasta esa fecha, hay datos continuos que permiten estudiar la evolución de la cubierta nival y sus parámetros en el otoño.

Así, los datos de temperatura del aire (Fig. 15) son similares a los medidos en la zona de Crater Lake por los sensores de las estaciones PT (Fig. 8), con temperaturas dentro del rango de ± 10 °C. Es importante resaltar que aún a principios de junio no se ha producido un claro descenso de las temperaturas, que se mantienen positivas durante numerosos días del otoño, algo poco frecuente. Tanto es así, que a finales de mayo aún se registran temperaturas máximas similares a las de los meses de marzo y abril, mientras que las mínimas, de alrededor de -5 °C se alcanzan en varias ocasiones también en este periodo, sin destacar una época más fría durante el otoño. Por otra parte, los valores de humedad por su parte son variables entre 60 % y 100 %.

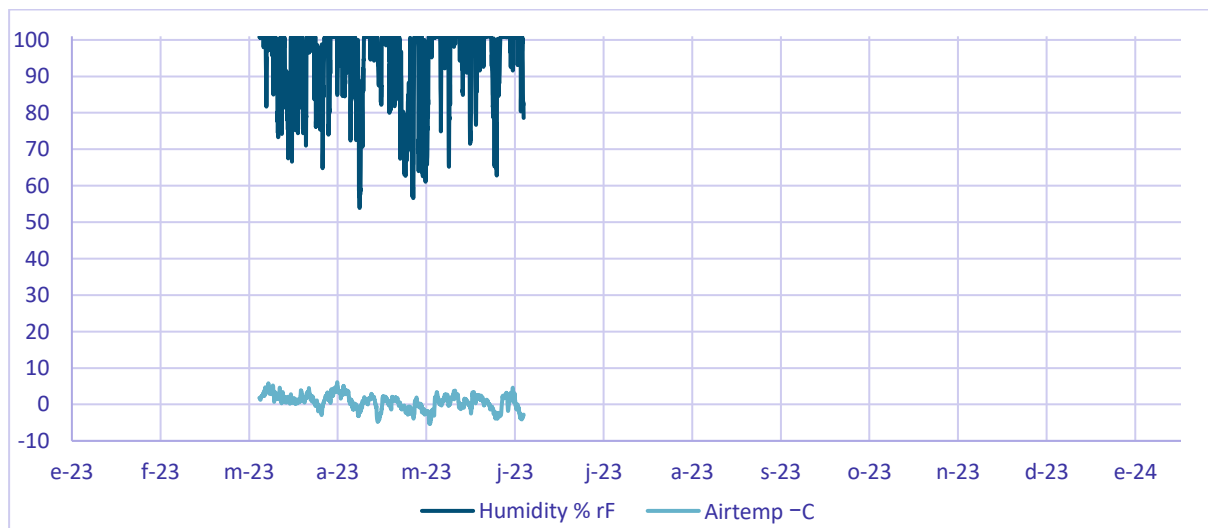


Figura 15: Datos de temperatura (en °C) y humedad relativa del aire (en %) registrados en la estación nivométrica a lo largo del año 2023 en isla Decepción.

La radiación total e infrarroja, tanto incidente como reflejada (Fig. 16), muestra el comportamiento típico a lo largo del año relacionado con más horas de luz en el verano austral, que se va reduciendo a medida que se acerca el invierno. Si bien no se dispone de datos de dicho periodo, se observa la paulatina

reducción durante el otoño, quedando ya en valores bajos a principios de mayo, y teniendo un comportamiento estable en ese mes.

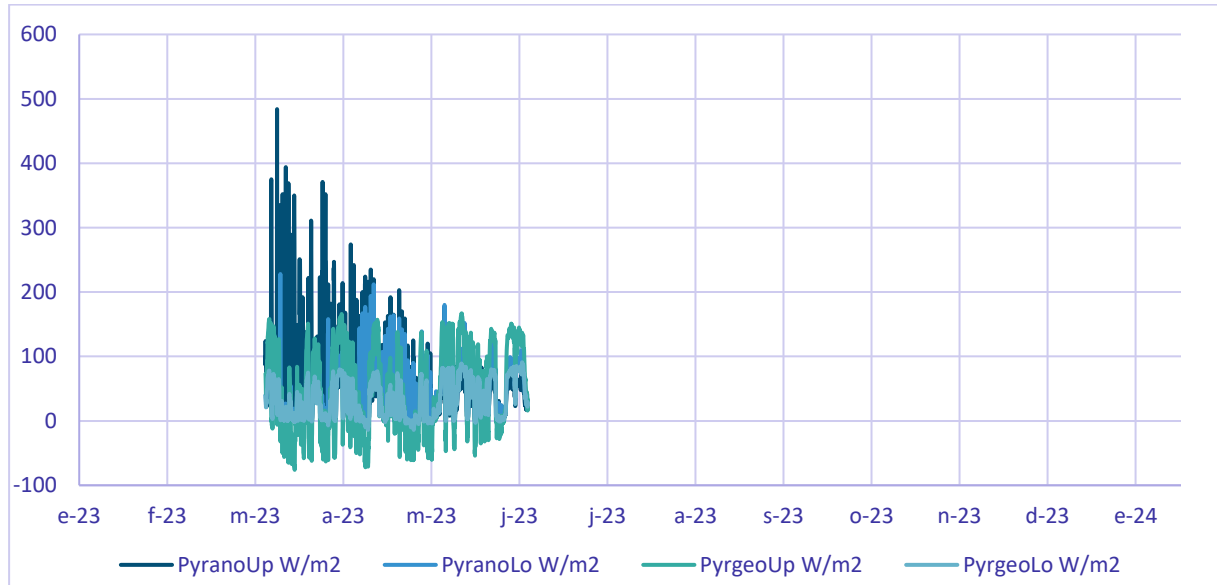


Figura 16: Datos de radiación solar incidente y reflejada (en W/m^2) medidos por los sensores piranómetro y pirgeómetro instalados en la estación nivométrica.

Por su parte, la temperatura del suelo y de la nieve (Fig. 17) muestran un comportamiento similar al registrado en los sensores de los termonivómetros (Figs. 9), si bien la falta de datos empezado el otoño no permite establecer el espesor aproximado de la cubierta de nieve, y tan solo confirmar la llegada de las nieves a mediados de abril, si bien su espesor es de menos de 40 cm cuando se llega al mes de junio.

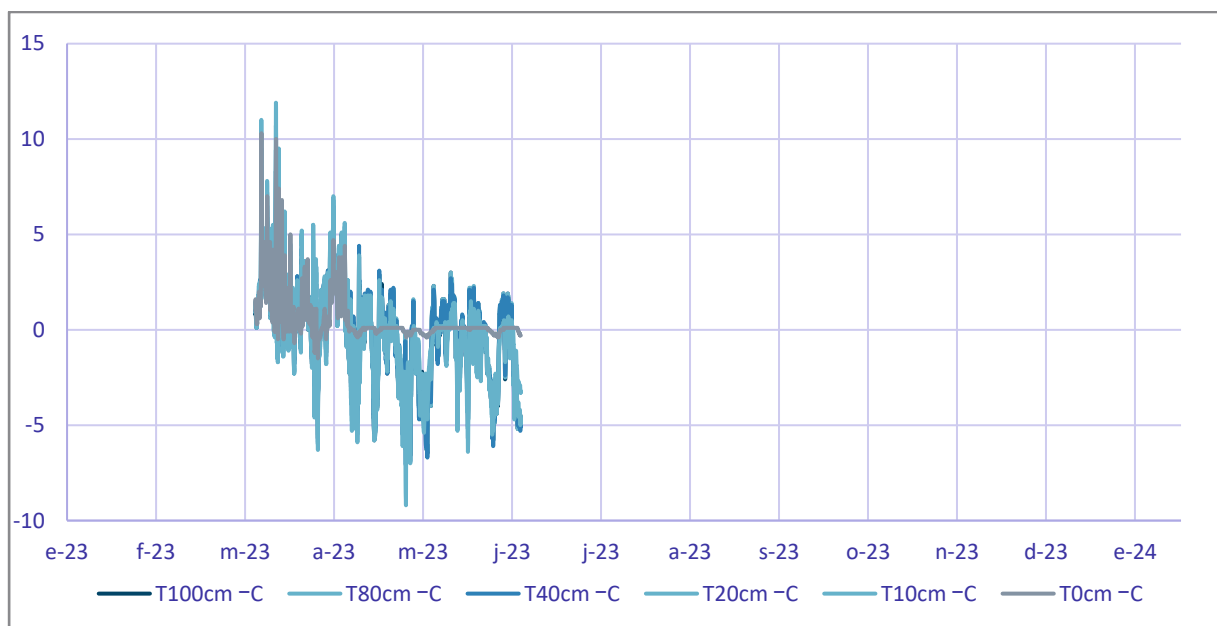


Figura 17: Temperatura del suelo y temperatura de la nieve (en $^{\circ}C$) en los sensores instalados a distinta altura sobre el suelo (en cm) en la estación nivométrica en el CALM Crater Lake, isla Decepción.

Los sensores para la obtención de parámetros de la nieve funcionaron perfectamente, con menos ruido que en los años anteriores, por lo que se pueden observar cambios de forma mucho más clara. Los escasos datos de equivalencia en agua del paquete de nieve (Fig. 18) muestran de forma clara el incremento de la equivalencia en agua de la capa de nieve acumulada en cuanto ésta comienza a aumentar su espesor desde principios de abril, indicando la llegada de las nieves en ese momento. Incluso es posible observar el efecto de las nevadas menores del verano. Los valores máximos alcanzados en el corto registro disponible superan los 3500 mm como en años anteriores, si bien el valor medio en el otoño es de unos 800 a 1000 mm hasta que se interrumpe la toma de datos.

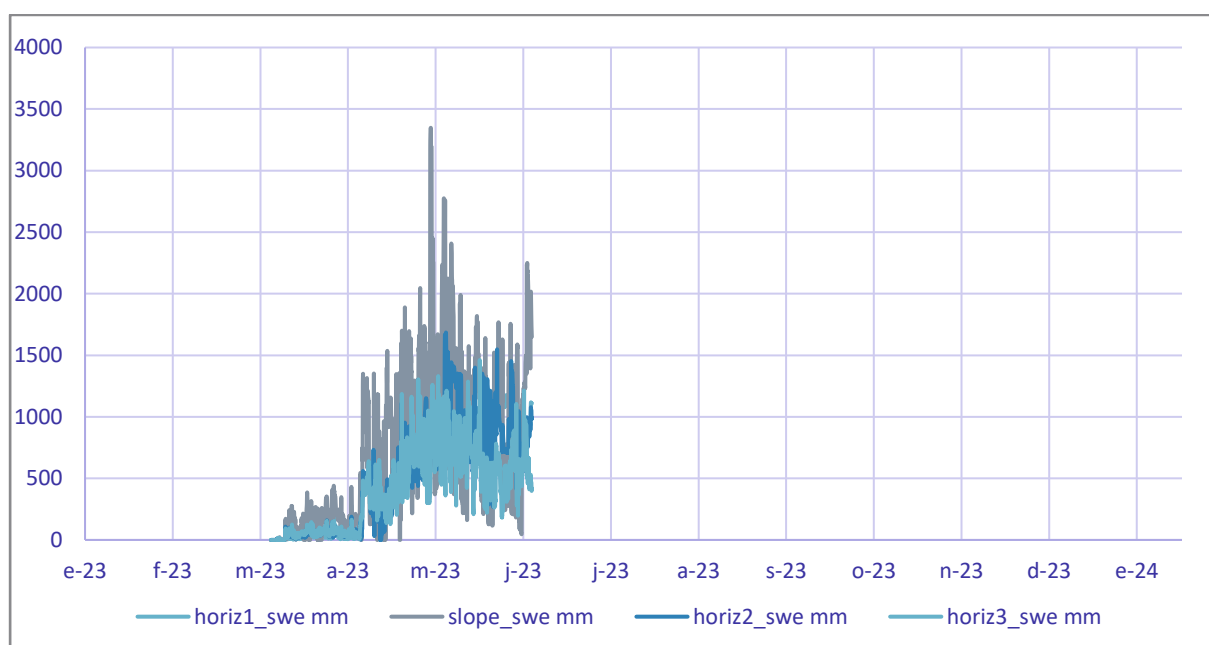


Figura 18: Medidas de equivalente en agua (SWE, en mm) de la nieve medidos en 2023 a distintas alturas sobre el terreno.

Por su parte, los datos de densidad de la nieve medidos por la estación nivométrica, aunque con mucho más ruido que los anteriores, especialmente la banda que mide la globalidad del paquete de nieve, muestran cómo, de forma general, la mayor densidad se alcanza en las zonas profundas del manto de nieve, alcanzándose valores en torno a los 200 kg/m³ a 10 cm de altura sobre el suelo, tras las primeras nevadas permanente en el mes de abril (Fig. 19). Estos valores son inferiores a los registrados en los años anteriores, en los que de forma general se alcanzaban densidades de hasta 350 kg/m³ a 10 cm de altura por las mismas fechas, indicando una menor acumulación y compactación de la cubierta nival en el otoño de 2023.

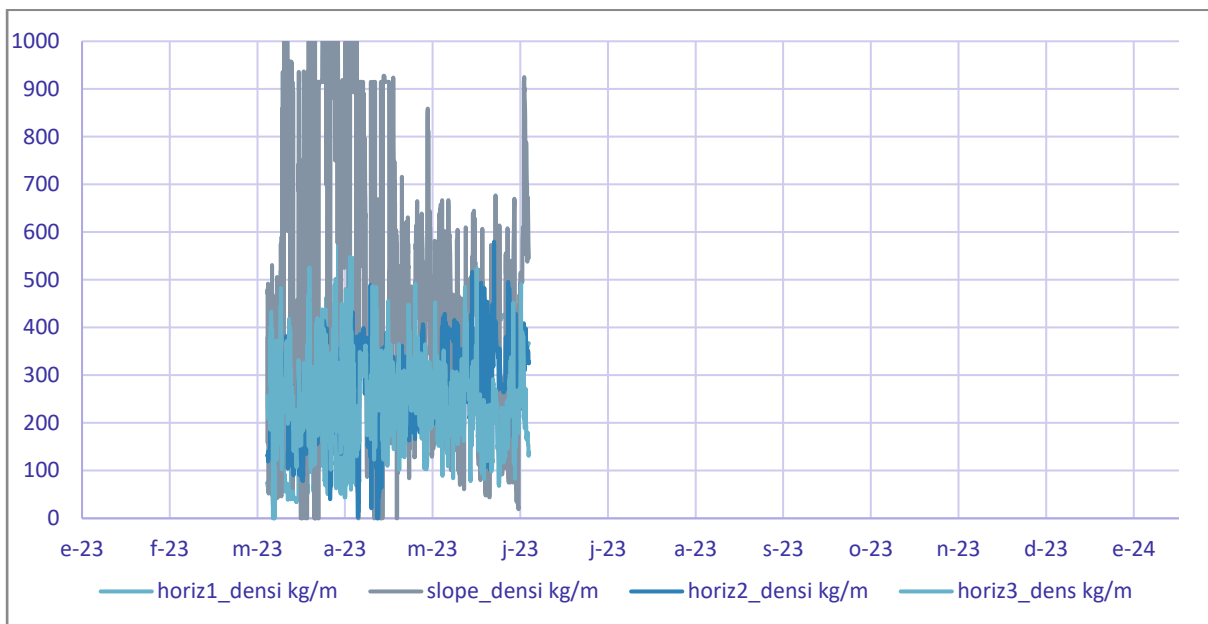


Figura 19: Densidad del manto de nieve (en kg/m³) medido a distintas alturas en isla Decepción durante el año 2023.

Los datos de contenido en hielo (Fig. 20) y en agua (Fig. 21) del paquete de nieve (que también requieren un tratamiento previo para eliminar el ruido, especialmente en alguna de las bandas de medición) muestran las variaciones en las condiciones de dicho manto de nieve, destacando claramente como a medida que se acumulan las primeras nieves, el contenido en hielo (Fig. 20) va aumentando de forma significativa, mientras que el contenido en agua lo hace de forma mucho más reducida (Fig. 21).

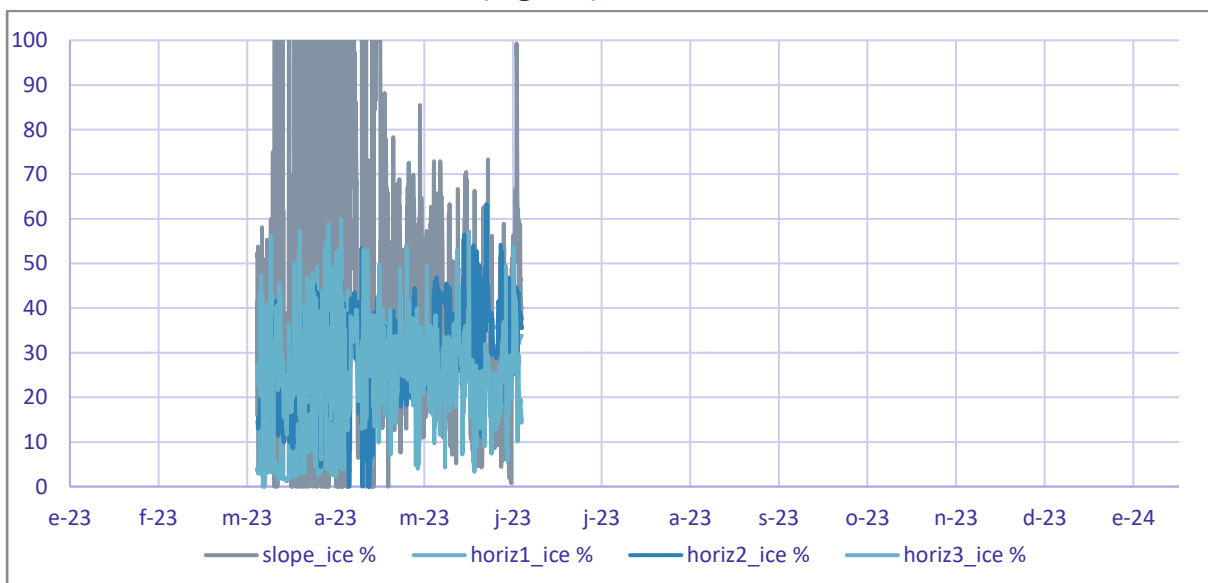


Figura 20: Contenido en hielo del manto de nieve (en %) registrado a distintas alturas por la estación nivométrica en isla Decepción en el año 2023.

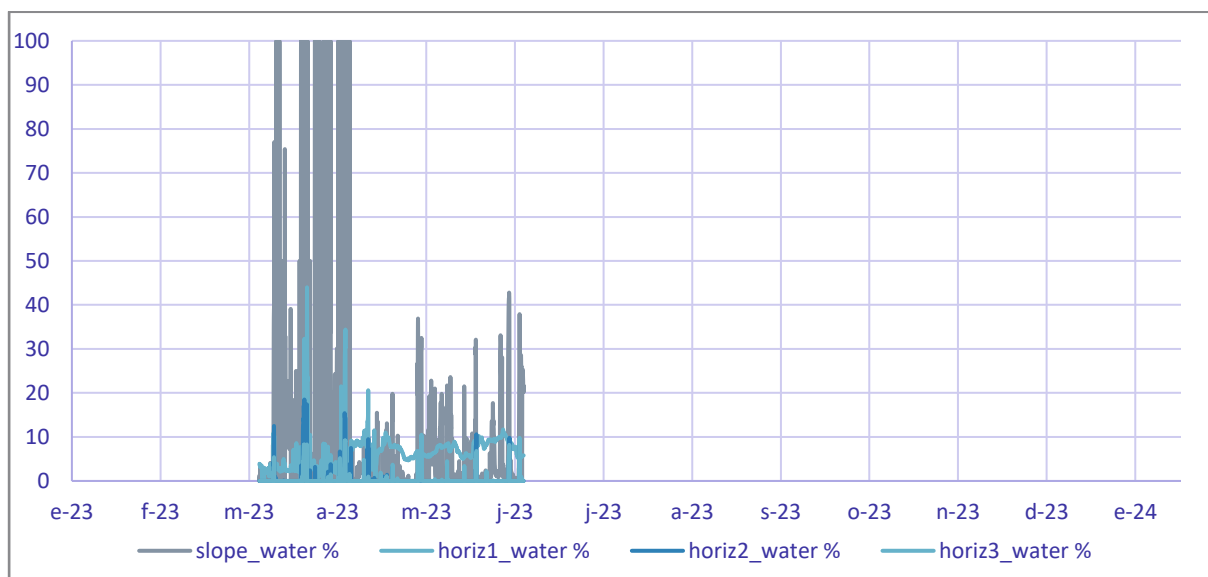


Figura 21: Contenido en agua (en %) del manto de nieve a distintas alturas registrado a lo largo del año 2023 en la zona de estudio en isla Decepción.

Finalmente, la balanza de nieve fue capaz de detectar claramente el incremento el peso de la nieve a medida que aumentaba el espesor a finales de marzo (Fig. 22). También es posible determinar los distintos eventos que ayudan al incremento rápido de la cubierta nival a mediados de abril y principios de mayo, hasta alcanzar un máximo de 40 cm. Posteriormente, a mediados de mayo se produce un periodo de compactación o fusión que reduce el espesor hasta algo menos de 30 cm. A pesar de las interrupciones en la toma de datos, se puede comprobar el buen funcionamiento de estos instrumentos para la detección de estos eventos en la acumulación de nieve (Fig. 22).

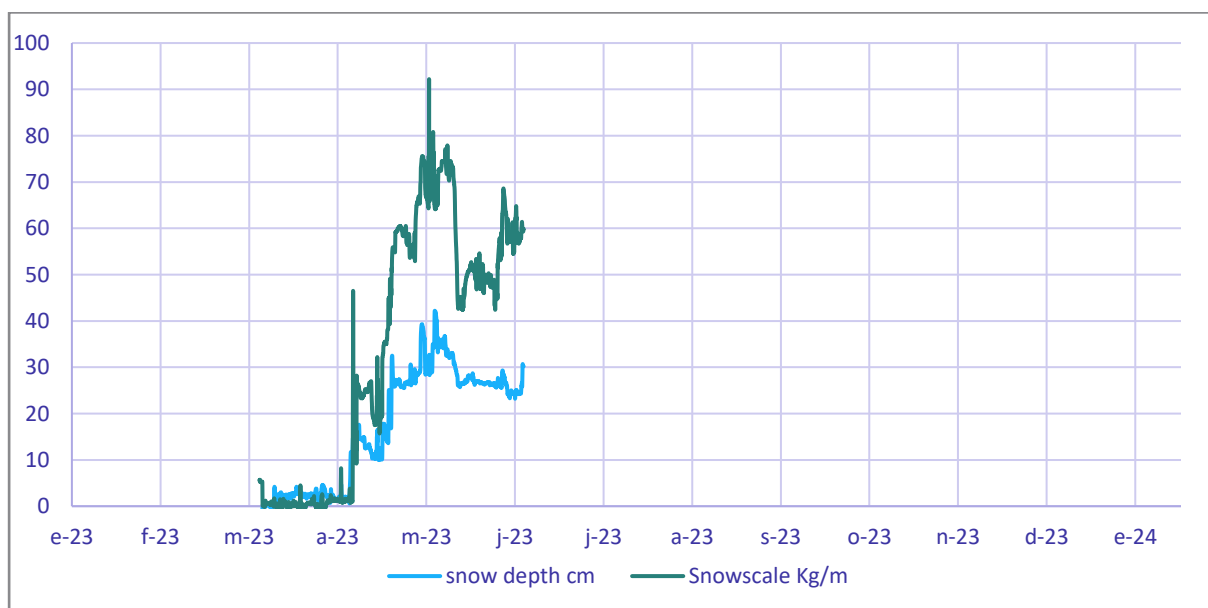


Figura 22: Datos de espesor (cm) y peso (kg/m^2) de la cubierta nival registrado por la estación nivométrica a lo largo de 2023.

Movimiento del terreno

En el año 2023 se han registrado por primera vez el movimiento de levantamiento y hundimiento del terreno debido a los procesos de congelación/descongelación ocurridos en los emplazamientos CALM Crater Lake y CALM Limnopolar Lake, mediante el uso de un inclinómetro adosado a un dispositivo consistente en un brazo horizontal de libre movimiento apoyado en el terreno y anclado en un mástil integrado en el permafrost (Gruber, 2020).

Los datos brutos (en grados) (Fig. 23) muestran la presencia de movimientos en el terreno de levantamiento y subsidencia en ambas estaciones. Estos movimientos son más variables de forma previa a la llegada de la nieve a principios de abril, posiblemente debido a micromovimientos debidos al viento. Una vez llegada la nieve, se observa un levantamiento del terreno causado por la congelación del terreno causado por la congelación del agua de fusión de las primeras nieves del otoño. En ambos emplazamientos se observa un levantamiento similar. Sin embargo, el hundimiento es distintos en ambos lugares, posiblemente causado por una mayor compactación en el CALM de isla Livingston (Fig. 23), donde los materiales son más finos y la capa activa más profunda. Durante el siguiente verano, se vuelve a observar una mayor variabilidad al quedar el instrumento despojado de la sujeción de la nieve.

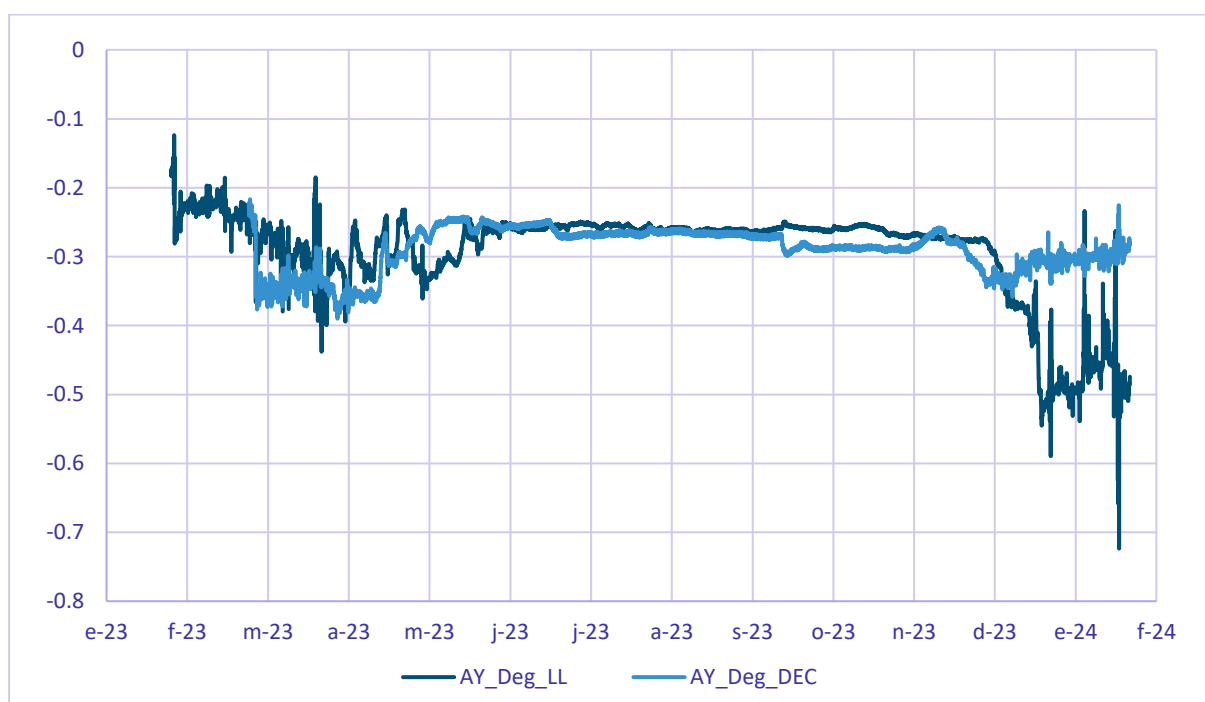


Figura 23: Evolución del cambio de posición de los inclinómetros (en grados) situados en los sitios CALM de la red PERMATHERMAL a lo largo del año 2023.

Imágenes fenomenológicas

De las 3 cámaras fenomenológicas que han estado instaladas en el entorno de los sitios CALM en las islas Livingston y Decepción durante el año 2023, ninguna de ellas ha presentado problemas, ni de las propias cámaras, ni de la infraestructura de alimentación ni soporte, por lo que sus imágenes (Fig. 24) permiten estudiar la evolución de las condiciones y fenómenos meteorológicos día a día, sin interrupción. Solo en la cámara de Crater Lake se ha podido observar una variación del campo de visión debido a que el viento ha movido la dañada estructura de soporte que ha sido reemplazada durante esta campaña.

El uso de estas imágenes permite observar la evolución de la cubierta de nieve a lo largo del año determinando que, en Crater Lake en ningún momento se ha formado una capa estable de nieve en todo el campo de visión. Si bien la zona del CALM ha estado cubierta desde principios del otoño, incluso en pleno invierno siempre ha habido extensas áreas libres de nieve. Ni siquiera las nevadas importantes de la primavera han llegado a formar un manto duradero en toda el área de estudio (Fig. 10). En cambio, en las imágenes de Península Byers si se puede observar cómo la nieve ha cubierto la zona con un manto permanente desde mediados de mayo en la mayor parte de la zona de estudio.

En estas imágenes, aunque se toman 3 fotografías cada día a las 14, 15 y 16h GMT, correspondientes a las horas centrales del día solar, no siempre es posible ver el terreno debido a la presencia de hielo en la lente, debido a las fuertes tormentas de nieve del invierno antártico, en ambos emplazamientos. Aunque en estos casos no es posible observar el terreno, si lo es conocer el tipo de condiciones ambientales que se dan en esos días. En el año 2023 se han detectado muchos días en los que esto ocurre, si bien son menos numerosos que los registrados en el año 2022.

Por otro lado, y aunque no es objeto de investigación de estas estaciones, es posible observar en las fotos de la cámara de Crater Lake, el estado de Puerto Foster y su caleta Balleneros, no detectándose la formación de banquisa o de fragmentos de hielo superficial marino, indicando condiciones menos frías que en los años anteriores.



Figura 24: Imágenes tomadas por las cámaras fenomenológicas instaladas en la zona del CALM Crater Lake en isla Decepción (arriba) y en el CALM Limnopolar Lake en península Byers de isla Livingston (en medio y abajo).

Otros datos

Además de los datos tomados en las estaciones PT (temperatura del aire, de la nieve, del suelo y del terreno), de las estaciones CALM (espesor de la capa activa, y movimientos del terreno), y de los instrumentos adicionales (estación nivométrica y cámaras fenomenológicas), durante la campaña antártica se ha realizado la toma de una serie de datos adicionales con el fin de apoyar la interpretación de los anteriores. Estos datos se han tomado en el CALM Crater Lake, en isla Decepción.

- **Temperatura superficial por infrarrojos:** medido con un dispositivo *IR thermometer Fluke 62 mini*, se tomaron datos de temperatura de la superficie en los nodos de la malla CALM de Crater Lake (Fig. 25) para correlacionar a posteriori con los datos de espesor de la capa activa (Fig. 13). Cabe destacar, que si bien las temperaturas son ligeramente más altas que las registradas en la campaña anterior, existe un patrón muy claro que divide la malla en dos secciones a partir de la línea Y=5, además de otros patrones en dirección Y.

Este comportamiento de las temperaturas no había sido observado en años anteriores y no guarda ninguna relación con la estructura del suelo, por lo que es posible que estos datos estén afectados por un error instrumental que invalide por completo los mismos.

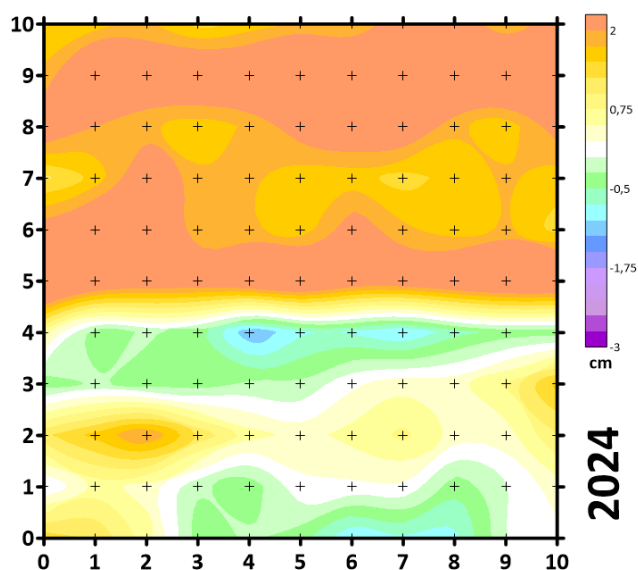


Figura 25: Temperatura superficial por infrarrojos medida en febrero de 2023 en los nodos de la malla CALM Crater Lake en isla Decepción, Antártida.

Planes de futuro

Mantenimiento de las estaciones

Tras la realización de la campaña 2023-24, se prevén las siguientes necesidades de mantenimiento en las estaciones PT y CALM:

Limnopolar Lake:

- Retirada de la infraestructura de la antigua cámara fotográfica automática CC640 ya no existente.
- Reinstalar las piquetas que delimitan el perímetro del sitio CALM, midiendo las diferencias de distancia.

Juan Carlos:

- Perforación de un sondeo

Nuevo incinerador:

- Perforación de un sondeo alternativo al ya existente, con evidencias de tener agua en su interior. Alternativamente, drenar el agua e intentar sellar el sondeo en su base

Glaciar:

- Revisión o retirar la electrónica de la estación registradora de datos.
- Revisar el estado del sondeo para establecer si existe hielo en su interior tras varios años sin acceso al mismo.
- Sustitución de la cadena nivométrica *Geoprecision*
- Instalación del sensor de temperatura de la superficie *Geoprecision*

Sofía:

- Reparar el protector de nieve del sensor de espesor de nieve roto en la pasada invernal.

De forma general, se plantea además:

- Diseño de un sistema de reparación en campo de los protectores de los sensores de espesor de nieve.
- Realizar un equipamiento básico de mantenimiento de estaciones que incluya: antena de comunicaciones, software FG2_Shell, pilas de repuesto, Instrucciones de mantenimiento y repuestos de los distintos modelos de los dispositivos *Geoprecision* M-Log5W (Cable, String, Tilt y SnowBox).

Plan de mejora

Una vez completamente finalizada la fase de reinstrumentalización de la red PERMATHERMAL con el cambio de tipo de dispositivos registradores de temperatura en las medidas de temperatura del aire, del suelo y del terreno en los sondeos, además de la medida de la temperatura del techo del permafrost, y del espesor de la nieve, quedan pendientes los siguientes experimentos, por orden de prioridad:

- Sensores de flujo térmico en las estaciones PT sin ellos.
- Sensores de medida de la humedad del terreno en el resto de estaciones.
- Nivómetros distribuidos en sitios CALM
- Temperatura superficial distribuida en sitios CALM
- Nuevos emplazamientos para el movimiento de la capa activa

Por cuestiones presupuestarias, no podrán abordarse todas estas mejoras en una sola campaña. Los sensores de flujo térmico continuarán instalándose, posiblemente en la siguiente campaña mediante el uso de dispositivos M-Log5W-String de *Geoprecision* con sensores HFP01. Los nivómetros distribuidos de las estaciones CALM podrían también instalarse en las siguientes campañas mediante el uso de dispositivos M-Log5W-SnowBox de *Geoprecision GmbH*, al igual que los nivómetros distribuidos por los sitios CALM.

Para la medida de la temperatura de la superficie del suelo distribuida por los nodos pares de cada malla CALM, se plantea el uso de 36 dispositivos M-Log5W-Cable por cada sitio CALM, marcado con una estaca, ya que, aunque se requiere más tiempo para la descarga de datos y su postprocesado, su instalación es más sencilla y con menor impacto ambiental que si se realizara únicamente con la instalación de 6 dispositivos M-Log5W-String, con 100 m de cable y 11 sensores cada uno.

Por otro lado, se plantean extender la medida de la humedad del terreno a las estaciones de la red PERMATHERMAL, empleando para ello los sensores específicos de la empresa *EMS-BRNO* instalados la pasada campaña en algunas de ellas, o bien solicitar el desarrollo de un tipo similar de sensores asociados a dispositivos inalámbrico de *Geoprecision*. En el último caso, también se plantea el uso de dispositivos *Geoprecision*, modelo M-Log5W-Tilt, como los empleados en las dos instalaciones en pruebas realizadas este año. Este tipo de experimento, de momento, no tiene sentido ser instalado en todas las

estaciones, ya que en aquellos lugares con roca o sin indicadores de procesos de congelación-descongelación claros, los resultados serían mínimos.

Un objetivo adicional es conseguir la instalación de 3 estaciones auxiliares con sensores para medir temperatura del aire y de la superficie del suelo en zonas perimetrales de la isla Livingston que quedan pendientes: Cabo Shirref, Punta Williams y Punta Elefante. De esta forma se completaría esta red secundaria de la que ya forman parte las estaciones de Punta Barnard, Punta Hannah y Punta Siddins. Solo se requiere la compra de material para 1 estación, ya que el material para las otras dos ya está en la Base Antártica Española “Juan Carlos I” a la espera de poder ser instalado.

Adicionalmente, se plantea un objetivo a medio plazo consistente en la instalación de varias estaciones PT completas (medida de la temperatura del aire, la superficie y el terreno a distintas profundidades, medida del espesor de la cubierta nival, y medida del flujo térmico) en la isla Horseshoe, donde existen numerosas morfologías asociadas a procesos periglaciares: suelos ordenados, círculos de piedras, suelos poligonales, ríos de piedras, etc. En ese lugar, la instalación de una o más estaciones en estos emplazamientos situados a 67 °S de latitud sería de gran interés para contrastar los datos tomados en las estaciones de las islas Livingston y Decepción (a unos 62 °S de latitud) e incluso en otros puntos de la Antártida.

Agradecimientos

El seguimiento del comportamiento térmico de los suelos congelados y de los parámetros ambientales relacionados en las islas Livingston y Decepción de las Shetland del Sur, Antártida, no sería posible sin la financiación, inicialmente, del Programa Polar Español a través de la financiación de proyectos de investigación del plan nacional de I+D+I, y desde el año 2015 del Comité Polar Español a través, para esta campaña, de un contrato Art. 60 de la LOSU 2/2023 de 22 de marzo, con la Universidad de Alcalá.

La compleja organización logística de las campañas a desarrolla la Unidad de Tecnología Marina del Consejo Superior de Investigaciones Científicas del Ministerio de Ciencia e Innovación, con la participación de Ejército y Armada del Ministerio de Defensa. El apoyo de las dotaciones de los buques que participan en las campañas (en esta ocasión el BIO Hespérides y el B/O Sarmiento de Gamboa), así como de las Bases Antárticas Española Juan Carlos I en la isla Livingston y Gabriel de Castilla en Isla Decepción, es también fundamental para los movimientos hacia la Antártida o entre las islas, así como para el desarrollo de las tareas de mantenimiento de las estaciones de la red PERMATHERMAL. Cabe destacar el papel de los técnicos y dotaciones de las bases sin cuyo apoyo no sería posible en muchas ocasiones desarrollar el mantenimiento de las estaciones y sus instrumentos para que puedan seguir operativos manteniendo la continuidad de esta serie temporal.

Además, estas estaciones se han ido instalando y manteniendo a lo largo de los años, por un amplio grupo de investigadores de la Universidad de Alcalá, sin cuyo apoyo habría resultado complicado o imposible iniciar mantener esta serie histórica: Miguel Ramos, Miguel Ángel Hidalgo Moreno, Juan José Blanco Ávalos, David Tomé, Antonio Molina Jurado, Cayetana Recio Blitz, Manuel Prieto Mateo, y Sebastián Sánchez Prieto, así como a los colaboradores de la Universidad de Lisboa: Gonçalo Vieira, Vanessa Batista, Gabriel Goyanes, Vasco de Pina, Alice Rivera, y Ana Salomé, Joana Baptista, Vasco Miranda, Henrique Zilhão y Catarina Louro.

Finalmente, nuestro agradecimiento a los compañeros científicos de otros proyectos de investigación y series temporales por su ayuda y apoyo durante las campañas antárticas, y su amistad, labrada tras muchas campañas antárticas compartiendo la dureza y belleza del trabajo de campo en territorio antártico. Este año nuestro agradecimiento específico es para los colegas del proyecto PARANTAR Lidia Ferri (Universidad de Oviedo), Alejandro Gómez (Universidad de León) y Antonio Fernández (Universidad Nacional de Educación a Distancia), por su

colaboración en el mantenimiento de las estaciones y toma de datos de capa activa en isla Livingston.

Queremos agradecer a nuestro colaborador la empresa *BARANI - Meteo innovations* – (<https://www.baranidesign.com/>) por la cesión gratuita de 5 de protectores de radiación para nuestras estaciones perimétricas de la Isla Livingston.

Referencias

- de Pablo, M.A. 2021. Maintenance of PT and CALM stations for permafrost and active layer monitoring on Livingston and Deception Islands, Antarctica. 2020-21 campaign report (in Spanish). ACMA-Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España. 52 pp. DOI: 10.5281/zenodo.5020140
- de Pablo, M.A. 2022. Maintenance of PT and CALM stations for permafrost and active layer monitoring on Livingston and Deception Islands, Antarctica. 2021-22 campaign report (in Spanish). ACMA-Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España. 46 pp. DOI: 10.5281/zenodo.6411073
- de Pablo, M.A. 2023. Maintenance of PT and CALM stations for permafrost and active layer monitoring on Livingston and Deception Islands, Antarctica. 2022-23 campaign report (in Spanish). ACMA-Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España. 66 pp. DOI: 10.5281/zenodo.83338315
- de Pablo, M.A. and Jafarov, 2017. Ground temperatures modeling at the Limnopolar Lake CALM-S site: initial approach. En: Ruiz-Fernández, J., García-Hernández, C., Oliva, M., Rodríguez-Pérez, C., Gallinar, D. (Eds.) *Ambientes periglaciares: avances en su estudio, valoración patrimonial y riesgos asociados* Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, Oviedo, p.180.
- de Pablo, M.A., Jiménez, J.J., Ramos, M., Prieto, M., Molina, A., Vieira, G., Hidalgo, M.A., Fernández, S., Recondo, C., Calleja, J.F., Peón, J.J., Corbea-Pérez, A., Maior, C.N., Morales, M., Mora, C. 2020. Frozen ground and snow cover monitoring in Livingston and Deception islands, Antarctica: preliminary results of the 2015-2019 PERMASNOW project. *Geographical Research Letters*, 46(1). 187-222.
- de Pablo, M.A., Molina, A., Recio, C., Ramos, M., Goyanes, G., Roperro, M.A. 2017. Análisis del estado de la capa activa en el emplazamiento de la base antártica española Gabriel de Castilla, Isla Decepción, Antártida. *Boletín geológico y minero*, 128(1). 69-92.
- de Pablo, M.A., Ramos, M., Molina, A., Vieira, G., Hidalgo, M., Prieto, M., Jiménez, J., Fernández, S., Recondo, C., Calleja, J., Peón, J., and Mora, C. 2016. Frozen ground and snow cover monitoring in the South Shetland Islands, Antarctica: Instrumentation, effects on ground thermal behavior and future research. *Geographical Research Letters*, 42(2), 475-495.

- de Pablo, M.A., Ramos, M., Vieira, G., and Quesada, A. 2010. A new CALM-S site on Byers Peninsula, Livingston Island, Antarctica. En: Blanco, J.J., de Pablo, M.A., y Ramos, M. (Coord.) *Ambientes periglaciares, permafrost y variabilidad climática*. 155-161.
- de Pablo, M.A., Ramos, M., Vieira, G., Molina, A., Ramos, R., Maior, C.N. 2022. PERMATHERMAL 2000-2021: two decades monitoring permafrost and active layer in Livingston and Deception islands, South Shetland Archipelago, Antarctica. Abstracts of the 10th Spanish-Portuguese Assembly of Geodesy and Geophysics - Toledo, November 2022.
- de Pablo, M.A., Ramos, M., Vieira, G., Molina, A., Ramos, R., Maior, C.N., Prieto, M., and Ruiz-Fernández, J. 2023. Interannual variability of ground surface thermal regimes in Livingston and Deception islands, Antarctica (2007-2021). *Land Degradation and Development*, (enviado).
- Gallego, M.J., 2017. Régimen térmico y cubierta nival en el permafrost de isla Decepción, Shetlands del Sur, Antártida marítima. *Trabajo Final de Máster. Universidad de Oviedo*. 39pp.
- Gruber, S., 2020. Ground subsidence and heave over permafrost: hourly time series reveal interannual, seasonal and shorter-term movement caused by freezing, thawing and water movement. *The Cryosphere*, 14(4). 1437-1447.
- Guglielmin, M., 2006. Ground surface temperature (GST), active layer, and permafrost monitoring in continental Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes*, 17, 133–143.
- Harris, C., Haeberli, W., Muhll, D.V., and King, L. 2001. Permafrost monitoring in the high mountains of Europe: the PACE project in its global context. *Permafrost Periglac. Process*, 12. 3–11. DOI: 10.1002/ppp 377
- Hrbáček, F., Engel, Z., Kňázková, M., & Smolíková, J. (2021). Effect of summer snow cover on the active layer thermal regime and thickness on CALM-S JGM site, James Ross Island, eastern Antarctic Peninsula. *Catena*, 207, 105608.
- Lundquist, J. D., and F. Lott (2008), Using inexpensive temperature sensors to monitor the duration and heterogeneity of snow-covered areas. *Water Resour. Res.*, 44, W00D16.
- Lewkowicz, A.G. 2008. Evaluation of miniature temperature-loggers to monitor snowpack evolution at mountain permafrost sites, northwestern Canada. *Permafrost and Periglacial Processes* 19, 323-331.

- Ramos, M. 1995. Automatic device to measure the active permafrost layer near the Spanish Antarctic Station. *Terra Antarctica*, 2(1). 61-63.
- Ramos, M. 1997. Topographic distribution of Short-wave radiation in the vicinity of Spanish Antarctic Research Station. *Terra Antarctica*, 4(1). 5-10.
- Ramos, M. 1998. The active layer in the vicinity of the Spanish Antarctic Station. *Terra Antarctica*, 5(2). 189-193.
- Ramos, M. y Vieira, G. 2001. Active layer and permafrost monitoring in Livingston Island, Antarctic. First results from 2000 to 2001. In: *Proceedings of the 8th Intern. Conf. on Permafrost*. 926-933.
- Ramos, M. y Vieira, G. 2004. Variabilidad térmica de la capa activa y evaluación de la energía perdida por el suelo, durante el proceso de congelación en la isla Livingston (Antártida). Inviernos 2000, 2001 y 2002. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Sec. Geol.)*, 99 (1-4). 83-92.
- Ramos, M. y Vieira, G., 2009. Evaluation of the ground surface Enthalpy balance from bedrock temperatures (Livingston Island, Maritime Antarctic). *The Cryosphere*, 3. 133–145.
- Ramos, M., Aguirre-Puente, J., Costard, F., Ozouf, J.C. 1994. Correlation between heat flux on the ground and permafrost thermal regime near the Spanish Antarctic Station. *Ground Freezing*, 94. 395-396.
- Ramos, M., Hasler, A., Vieira, G., Hauck, C., and Gruber, S. 2009. Drilling and Installation of Boreholes for Permafrost Thermal Monitoring on Livingston Island in the Maritime Antarctic. *Permafrost and Periglac. Process.*, 20. 57–64.
- Ramos, M., Vieira, G., Crespo, C., y Bretón, L. 2002. Seguimiento de la evolución temporal del gradiente térmico de capa activa en las proximidades de la B.A.E. Juan Carlos I. En: Serrano, E. y García, A. (Ed.) *Periglaciario en montaña y altas altitudes*. Dpto. Geografía, Universidad de Valladolid. 257-276.
- Ramos, M., Vieira, G., Gruber, S., de Pablo, M., Correia, A. 2010a. Estado térmico del permafrost en el monte Reina Sofía, primer año de registro continuo. Isla Livingston (Antártida). En: Blanco, J.J., de Pablo, M.A., y Ramos, M. (Coord.) *Ambientes periglaciares, permafrost y variabilidad climática*. 79-92.
- Ramos, M., Vieira, G., Guilichinsky, D., y de Pablo, M.A. 2010b. Nuevas estaciones de medida del régimen térmico del permafrost en el área de “Crater Lake”.

- Isla Decepción (Antártida). Resultados preliminares. En: Blanco, J.J., de Pablo, M.A., y Ramos, M. (Coord.) *Ambientes periglaciares, permafrost y variabilidad climática*. 93-108.
- Streletskiy, D., Noetzli, J., Smith, S.L., Vieira, G., Schoeneich, P., Hrbacek, F. and A.M. Irrgang. 2021. Measurement Standards and Monitoring Guidelines for the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). 2021. DOI: 10.5281/zenodo.6075468
- Streletskiy, D., Noetzli, J., Smith, S.L., Vieira, G., Schoeneich, P., Hrbacek, F. and A.M. Irrgang. 2022. Measurement Recommendations and Guidelines for the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). DOI: 10.5281/zenodo.5973079.
- Outcalt, S.I., Nelson, F.E., Hinkel, K.M. 1990. The zero-curtain effect: heat and mass transfer across an isothermal region in freezing soil. *Water Resources Research*, 26 (7). 1509-1516.

Anexo I: Acrónimos

AERT	<i>Automatic Electrical Resistivity Tomography</i>
AEI	Agencia Estatal de Investigación
BAA	Base Antártica Argentina “Decepción”
BAB	Base Antártica Búlgara “San Clemente de Ohrid”
BAE JCI	Base Antártica Española “Juan Carlos I”
BAE GdC	Base Antártica Española “Gabriel de Castilla”
CALM	<i>Circumpolar Active Layer Monitoring</i>
CB	Campamento Internacional Byers
CNDP	Centro Nacional de Datos Polares
CPE	Comité Polar Español
CSIC	Consejo superior de Investigaciones Científicas
GCOS	<i>Global Climate Observing System</i>
GTN-P	<i>Global Terrestrial Network for Permafrost</i>
ICTS	Instalación Científico-Técnica Singular
IGME	Instituto Geológico y Minero de España
IGN	Instituto Geográfico Nacional
IPA	<i>International Permafrost Association</i>
NSF	<i>National Science Foundation</i>
PT	<i>Permafrost temperature (antes TSP)</i>
TSP	<i>Thermal State of Permafrost</i>
TDR	<i>Time-domain reflectometry</i>
UAH	Universidad de Alcalá
UL	<i>Universidade de Lisboa</i>
UN	<i>United Nations</i>
UTM	Unidad de Tecnología Marina

