



FACULTAD DE BIOLOGÍA, CIENCIAS AMBIENTALES Y QUÍMICA

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**CARACTERIZACIÓN DEL PERMAFROST Y LA CAPA
ACTIVA EN LA REGIÓN DE CRATER LAKE,
ISLA DECEPCIÓN, ANTÁRTIDA.**

Cristina Nicoleta Maior

Tutor: Miguel Ángel de Pablo Hernández

2018

FACULTAD DE BIOLOGÍA, CIENCIAS AMBIENTALES Y QUÍMICA

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**CARACTERIZACIÓN DEL PERMAFROST Y LA CAPA ACTIVA
EN LA REGIÓN DE CRATER LAKE, ISLA DECEPCIÓN, ANTÁRTIDA.**

Tribunal de calificación:

(Firma)

Presidente: _____

(Firma)

Vocal 1º: _____

(Firma)

Vocal 2º: _____

Calificación: _____

Fecha: _____

INFORME PARA LA DEFENSA PÚBLICA DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

Dr. D. Miguel Ángel de Pablo Hernández, profesor del Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente de la Universidad de Alcalá, como tutor del Trabajo de Fin de Grado en Ciencias Ambientales de D^a Cristina Nicoleta Maior titulado Caracterización del permafrost y la capa activa en la región de Cráter Lake, Isla Decepción, Antártida

INFORMA:

FAVORABLE

DESFAVORABLE

Alcalá de Henares 10 de Septiembre de 2018

Firma del tutor

Fdo.: M.A. de Pablo

RESUMEN

Bajo los protocolos de las redes internacionales de control del espesor de la capa activa en áreas circumpolares, CALM-S, se han instalado en las inmediaciones de la Base Antártica Española de Gabriel de Castilla, en Crater Lake, Isla Decepción, Antártida, estaciones de medida de la descongelación de la capa activa y del control térmico del permafrost. Los datos recogidos por los sensores de temperatura del aire y del terreno de tres de estas estaciones durante el periodo 2009-2017, se han usado en el presente trabajo para calcular diversos parámetros con el objetivo de caracterizar el permafrost.

Los perfiles térmicos y los termogramas han permitido identificar que el permafrost se extiende desde los 40 cm hasta los 450-500 cm de profundidad, y se comporta de manera inestable cuando el asilamiento a causa de la nieve es máximo. Este aislamiento máximo se refleja también en la mayor duración del periodo de descongelación y es también la causa de las variaciones de espesor que sufre la capa activa que se sitúa por encima y que no son debidas de manera directa a las variaciones en la temperatura del aire. Los offset superficial y térmico se estabilizan en torno a los 0°C a partir del 2015 lo que también indica que el permafrost está comportándose de manera inestable.

Deberá analizarse una serie de años más larga para poder confirmar que los resultados obtenidos en este trabajo seguirán en el futuro la misma tendencia.

Palabras clave: Antártida, Crater Lake, CALM-S, permafrost, capa activa.

ABSTRACT

Under the protocols of the Circumpolar Active Layer Monitoring-South Network, CALM-S, have been installed in the proximity of the Spanish Antarctic Base of Gabriel de Castilla, in Crater Lake, Deception Island, Antarctica, stations to measure the thawing of the active layer and permafrost thermal control. Data collected by the air and ground sensors of three of these stations during 2009-2017, have been used in this paper to estimate various parameters in order to characterize permafrost.

Thermal profiles and thermograms have allowed to identify that permafrost extends from 40 cm to 450-500 cm deep, and is unstable when isolation due to snow cover is maximum. This maximum isolation is also reflected in the longer length of the thawing period and is also the reason of the variations in active layer thickness, that are not due directly to variations in air temperature. Surface and thermal offset stabilize around 0°C from 2015, which also indicates that permafrost is unstable.

A longer number of years should be analyzed in order to confirm that the results obtained in this study will follow the same trend in the future.

Keywords: Antarctica, Crater Lake, CALM-S, permafrost, active layer.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	11
2	DATOS Y MÉTODOS	14
2.1	Zona de estudio	14
2.2	Estaciones, instrumentos y datos.....	15
2.3	Métodos	17
	Tratamiento inicial	17
	Perfil térmico	17
	Termogramas.....	18
	Offset térmico y superficial	19
	Índice de congelación y descongelación	19
	Factor n	20
3	RESULTADOS.....	20
4	DISCUSIÓN	32
5	CONCLUSIONES	34
6	REFERENCIAS.....	35
7	ANEXO I. FIGURAS Y TABLAS.....	40

1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático, y por ende el calentamiento global, es un problema que genera preocupación a nivel mundial y cuyos efectos pueden observarse en la criosfera, un sistema que comprende principalmente las fracciones de agua congelada como la nieve, el hielo marino, los glaciares y el permafrost, y por tanto, conocer su evolución, distribución y caracterización es clave para poder conocer y hacer frente a los cambios que el clima induce sobre los ecosistemas terrestres (Vieira et al., 2010; IPCC, 2014). Entre otros muchos cambios sufridos por la criosfera se encuentran el retroceso de los glaciares y la descongelación del permafrost, éste último un elemento de la criosfera poco conocido, pero igualmente muy sensible a pequeños cambios en las condiciones del clima (IPCC, 2014).

Se define el permafrost como el terreno que permanece por debajo de los 0°C durante dos o más años y sobre el que puede existir una sección de terreno, que se congela y descongela periódicamente, denominada capa activa. Esta capa reduce la amplitud de las variaciones térmicas, permite el intercambio de humedad y gases y proporciona agua y nutrientes necesarios para los procesos biológicos en el suelo en estas regiones subglaciares y periglaciares (Osterkamp and Burn, 2014). El permafrost puede ser discontinuo en forma de áreas dispersas de tamaño y espesor muy diversos, continuo, que abarca grandes regiones y donde se mantiene un equilibrio térmico más o menos estable. Además, en el permafrost puede haber zonas del terreno que permanecen descongelados durante todo el año (denominadas talik) y que son resultado de presión local alta, gran salinidad o flujos de agua subterránea (Andersland and Ladanyi, 2004) (Figura 1).

En la Antártida el permafrost está presente en regiones libres de hielo donde no se encuentran glaciares (Bockheim et al., 2013) y sólo ocupa el 0,36% de la superficie, lo que equivale a unos 50.000 km² (Vieira et al., 2010). Su deterioro es importante para el sistema climático dado que almacena gran cantidad de carbono que contribuye en el ciclo biogeoquímico del carbono y su lenta descomposición en respuesta a los cambios del clima afecta a los flujos de los

gases de efecto invernadero (CO_2 y CH_4) a escala global (ej., Burgess et al., 2000; Schuur et al., 2008).

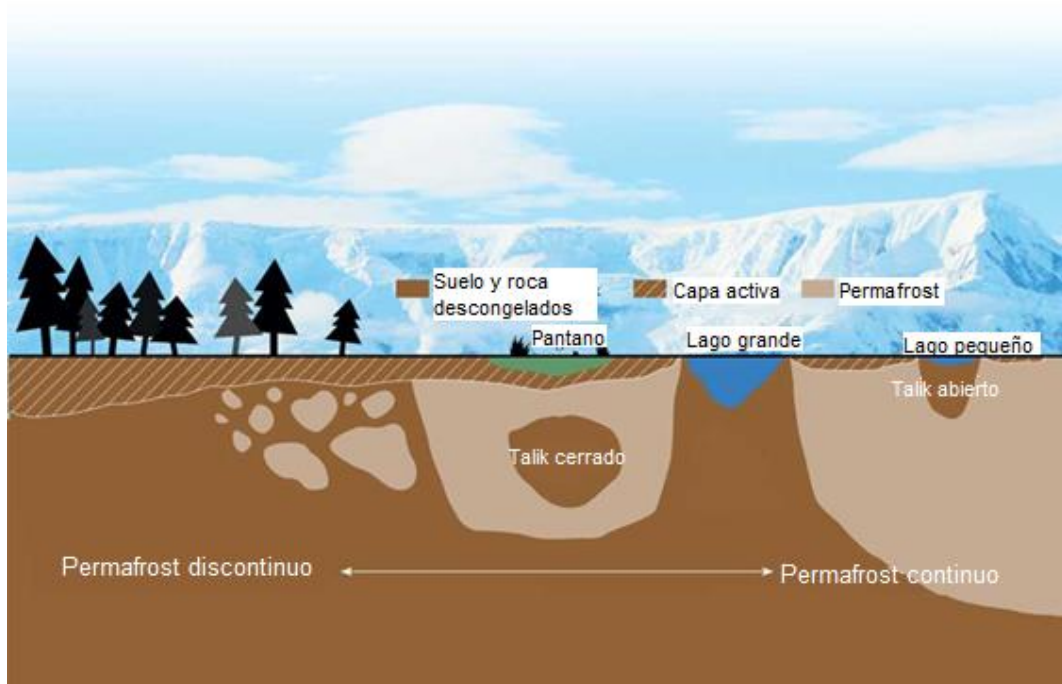


Figura 1. Perfil típico del permafrost en regiones polares (tomado de de Pablo et al., 2012).

Estos cambios que se producen en el permafrost se están extendiendo y acelerando a medida que pasan los años, lo que está provocando un aumento en la preocupación y las investigaciones (Brown et al., 2000; IPCC, 2014). Por ello, en la Antártida, y especialmente en la región de la península antártica, la comunidad científica ha ido instalando estaciones de medida de la descongelación de la capa activa, y del control térmico del permafrost. Estas estaciones de medida se integran y siguen los protocolos de las redes internacionales de control del espesor de la capa activa en áreas circumpolares (CALM), y del estado térmico del permafrost (TSP), ambas dentro de la Asociación Internacional del Permafrost (IPA) (Vieira et al., 2010).

El programa internacional CALM consta de una red de observatorios destinados a analizar la variación del espesor de la capa activa frente al cambio climático a largo plazo. Se distribuyen en ambas regiones polares lo que permite estudiar, no solo la evolución de las distintas localizaciones si no también comparar entre aquellas con características similares. Las estaciones CALM son más abundantes en la región Ártica debido a las grandes regiones libres de hielo que

hay, sin embargo, los CALM-S, denominados así por estar en el hemisferio sur, están empezando a ser de gran relevancia (Nelson et al., 2004; Ramos et al., 2010; International Permafrost Association, 2018a).

Los datos que definen el Estado Térmico del Permafrost (TSP) sirven como base para evaluar la tasa de cambio de las temperaturas del permafrost y su distribución, lo que permite validar los escenarios del modelo climático y apoyar las investigaciones con el fin de mejorar la comprensión de la dinámica del permafrost (International Permafrost Association, 2018b).

Estas redes se han instalado por equipos de diversos países formando el grupo de trabajo sobre permafrost Antártico y Subantártico (ANTPAS) de la IPA (Vieira et al., 2010). Uno de estos equipos pertenece a España y está integrado por investigadores de la Universidad de Alcalá, con quienes colaboran investigadores de Portugal, Rusia, Suiza, y República Checa. Este equipo, ha instalado diversas estaciones CALM y TSP en las Islas Livingston y Decepción del Archipiélago de las Shetland del Sur (ej., Correia et al., 2012; de Pablo et al., 2013, 2014; Goyanes et al., 2014; Ramos et al., 2017; Oliva et al., 2017). La más importante de ellas se encuentra en la isla Decepción (Figura 2), en la zona de Cráter Lake, a unos 85 m s.n.m., y en las proximidades de la Base Antártica Española Gabriel de Castilla (Tomé et al., 2009; Ramos et al., 2010). Aunque la estación CALM para el estudio de la descongelación de la capa activa fue instalada por estos investigadores en el año 2006, no fue hasta el año 2008, cuando bajo la iniciativa internacional del Año Polar Internacional 2008-2009, se realizaron las perforaciones para la instalación de 3 estaciones TSP (denominadas STS_1, STS_2 y STS_3) que permitieran estudiar la evolución de la temperatura del terreno y su respuesta a las condiciones climáticas (Ramos et al., 2017).

Aunque la evolución de la capa activa ha sido ya estudiada por estos investigadores de la Universidad de Alcalá, los datos de temperatura del suelo no han sido analizados en detalle (Ramos et al., 2007, 2010, 2017). Por ello, ahora, casi 10 años después de la instalación de estas tres estaciones TSP en la zona de Cráter Lake, el **objetivo** de este trabajo es realizar un primer análisis de los datos de temperatura del terreno medidos en estas tres estaciones

(STS_1, STS_2 y STS_3) entre los años 2009 y 2017, con el fin de caracterizar térmicamente el permafrost y la capa activa y observar la evolución que han sufrido en este periodo, realizando un tratamiento de los datos brutos de temperatura del aire y suelo recogidos en ellas. Los objetivos específicos son por tanto conocer a que profundidad se alcanza el permafrost, si éste se comporta de manera estable, si con el paso del tiempo hay una tendencia a que la profundidad de la capa activa aumente o disminuya (disminuyendo por tanto el espesor del permafrost) y cuánto afectan los cambios de la temperatura del aire en este fenómeno y en la estabilidad del permafrost.

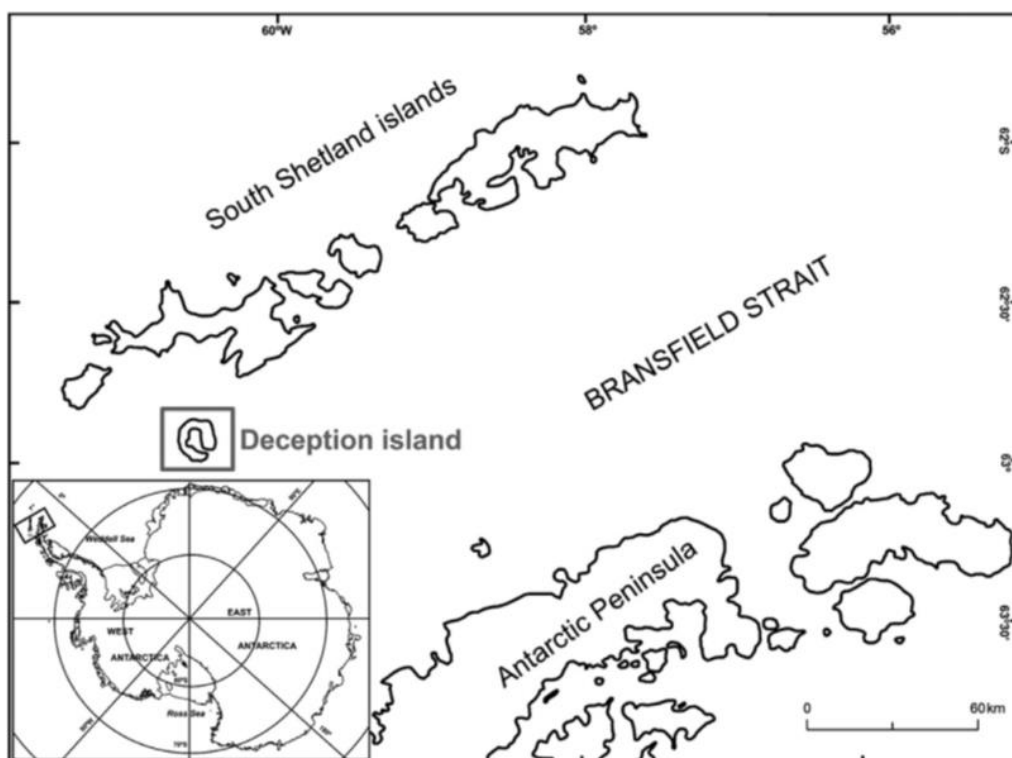


Figura 2. Localización de Isla Decepción en el archipiélago de las Shetland Sur, Antártida (tomado de Ramos et al., 2017).

2 DATOS Y MÉTODOS

2.1 Zona de estudio

En Crater Lake en el año 2006 se instaló una malla CALM-S ($62^{\circ}58'06.7''$ S; $60^{\circ}40'44.8''$ O) en un terreno aproximadamente plano de materiales piroclásticos que, al ser porosos, tienen un gran contenido de agua intersticial (Smellie et al., 2002). Consiste en una cuadrícula de 100x100 m marcada sobre el terreno en

su perímetro con estacas cada 10 m, y en cuyos nodos se mide, al final del periodo de descongelación, la profundidad de la capa activa, mediante sondeos mecánicos realizados mediante la inserción manual de una varilla graduada de acero de 1 metro de longitud y 1 cm de grosor (Brown et al., 2000; Burgess et al., 2000; International Permafrost Association, 2018a) (Figura 3; Figura A1. 1).

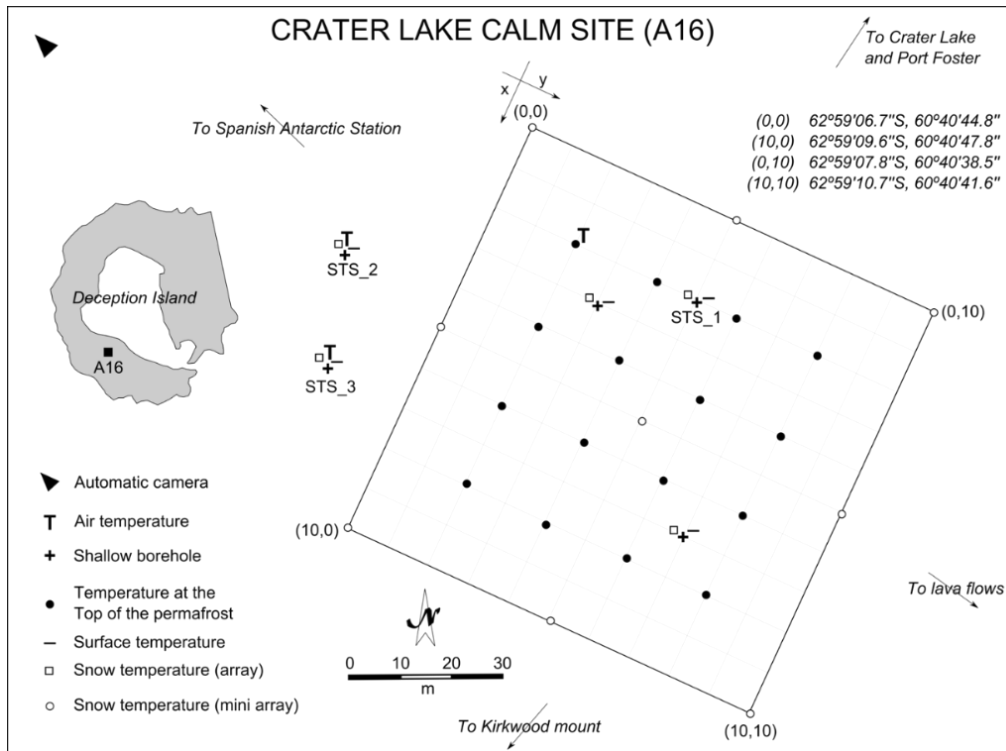


Figura 3. Esquema de la malla CALM-S de Crater Lake y todos los instrumentos instalados en ella para el control térmico del permafrost y la capa activa (tomado de Ramos et al., 2017).

2.2 Estaciones, instrumentos y datos

Para caracterizar térmicamente el permafrost y la capa activa de Crater Lake desde el año 2009 al 2017, se analizarán los datos recogidos por los sensores de temperatura instalados en las tres estaciones STS_1, STS_2 y STS_3, el primero de los cuales se sitúa dentro de la malla CALM-S, mientras que los otros dos que están muy cerca entre ellos, en las proximidades de la malla (Figura 3).

Cada una de ellas cuenta con distintos instrumentos y sensores (Figura A1. 2), un mástil con un protector de radiación solar en cuyo interior hay un sensor de temperatura del aire (Tabla 1), una placa metálica de 20x20x0,5 cm enterrada a unos 2-3 cm de profundidad y que lleva adosado un mini registrador de

temperatura, para medir la temperatura de la superficie del terreno (no analizado en este trabajo), un mástil con distintos mini registradores situados a distintas alturas del mástil, y que se utiliza para aproximar el espesor de la cubierta de nieve (que tampoco se emplearán en este trabajo) (Ramos et al., 2017), y un sondeo de distinta profundidad y 40 cm de diámetro, en cuyo interior, y herméticamente cerrados se encuentran mini registradores de temperatura a distintas profundidades con los que se miden las temperaturas del terreno. (Tabla 1).

Estos sensores toman datos de temperatura cada hora en el caso de la temperatura del aire, y cada tres horas en los demás casos (Tabla 1). Los datos son almacenados en los registradores a lo largo de todo el año hasta que son descargados por los investigadores de la Universidad de Alcalá una vez al año durante las campañas antárticas. Se utiliza para ello un software específico de cada fabricante para poder conseguir de cada sensor un fichero ASCII con datos de fecha, hora y temperatura. De este modo, para este trabajo se han empleado un total de 153 ficheros de datos a los que se les ha realizado distintos tratamientos para conseguir caracterizar térmicamente el permafrost y la capa activa de la zona de estudio, si bien no todos ellos contenían datos debido a fallos de los sensores por las duras condiciones ambientales que sufren a lo largo del invierno antártico.

Tabla 1. Localización y características de los sensores instalados en la malla CALM-S de Crater Lake para la caracterización térmica de la capa activa.

	Coordenadas	Tipo de sensor	Medida en altura/profundidad (cm)	Frecuencia (h)	Resolución (°C)	Exactitud (°C)
Aire_22	62°59'07.47182" S 60°40'44.31932" O	Tynitag (Plus 2)	160	1	0.02	0.35
STS_1	62°59'07.82910" S 60°40'43.02558" O	iButton (DS1922L)	(-) 2.5, 5, 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550	3	0.0625	0.5
STS_2	62°59'07.47182" S 60°40'48.00198" O					
STS_3	62°59'08.04629" S 60°40'48.21453" O					

2.3 Métodos

Tratamiento inicial

A los datos brutos de temperatura del aire (Figura A1. 3) y del terreno (Figura A1. 4) obtenidos durante esa serie de años se les realizó un tratamiento despreciando aquellos que se consideró que no eran datos válidos de temperatura, si no que era debidos a fallos en los sensores o a la retirada de los sensores al comienzo de cada campaña antártica. En el caso de la temperatura del aire, sólo se disponen de datos durante el periodo 2010-2016.

Una vez eliminados los datos erróneos y con ayuda de hojas de cálculo de Excel 2016 (Microsoft), se procedió a realizar un tratamiento inicial consistente en la ordenación de los datos de temperatura en una matriz tiempo-profundidad para cada estación. A partir de estas matrices se calcularon las temperaturas máximas, medias y mínimas diarias y anuales para cada profundidad y en cada estación. De esta forma los datos han quedado listos para realizar los gráficos con los programas de elaboración de gráficos científicos Surfer 10 y Grapher 9 (Golden Software), los cálculos de parámetros y los análisis térmicos que se describen a continuación.

Perfil térmico

Se ha realizado un perfil térmico del suelo de cada una de las estaciones y para cada año de estudio. Este tipo de gráfico reúne las variaciones de las temperaturas máximas, medias y mínimas anuales del suelo que progresivamente se atenúan en profundidad y que son debidas a las variaciones estacionales en la superficie (Alonso, 2017) (Figura 4). De este modo en este tipo de gráficos se puede visualizar la existencia de la capa activa y su profundidad, la presencia del permafrost y la profundidad de la amplitud térmica anual cero (Zero Annual Amplitude, ZAA), es decir, cuando la temperatura máxima menos la mínima se hace cero o, considerando la resolución de los datos, esta diferencia es menor que la resolución de los sensores (Gruber, 2004). La importancia de la profundidad de la amplitud térmica cero radica en que un mínimo ascenso de la temperatura del aire haría descender el límite superior del

permafrost y aumentar su temperatura a la profundidad de amplitud cero (Alonso, 2017).

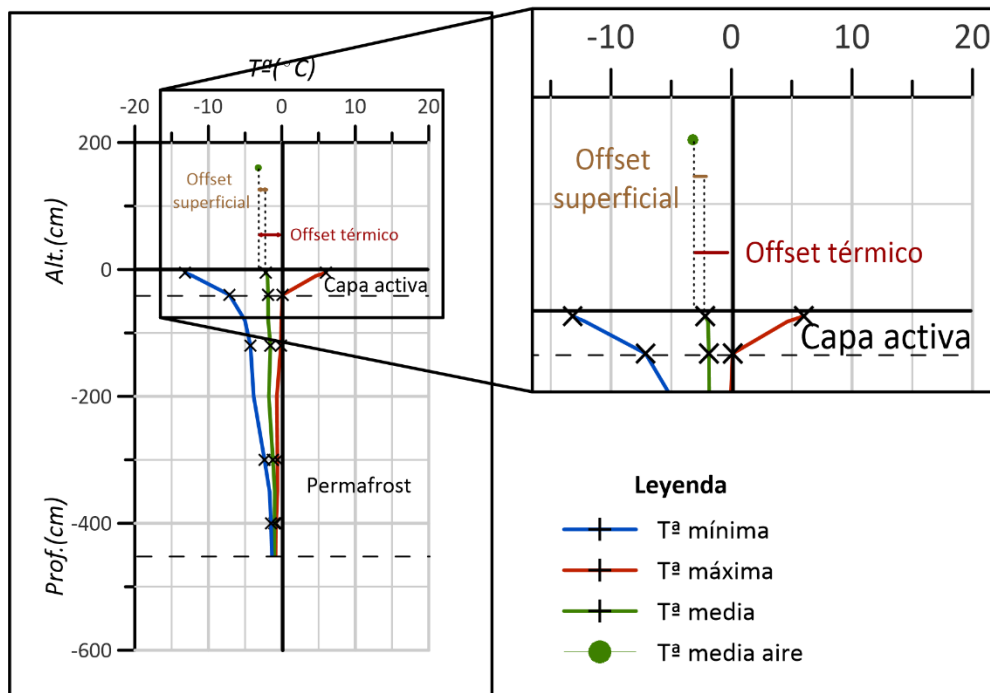


Figura 4. Ejemplo de perfil térmico realizado para los datos de la estación STS_1 del año 2015.

Para saber a qué profundidad comienza el permafrost, se han observado los datos de temperatura máxima anual en cada sondeo y se ha identificado el permafrost cuando esa temperatura era $0^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ durante más de dos años.

Termogramas

Se han elaborado también termogramas a partir de los datos de temperatura de la matriz tiempo-profundidad mediante la realización de una interpolación (kriging) con el programa Surface 10. Estos gráficos complementan la información que proporciona el perfil térmico y nos permiten estudiar de una forma más visual la evolución en profundidad de la temperatura a lo largo del tiempo y así observar cómo penetra el frío o el calor en el terreno, además de observar la isoterma de 0°C que ayuda a delimitar la profundidad de la capa activa, sirviendo como método de comprobación de la profundidad de la capa activa establecida mediante los perfiles térmicos.

Offset térmico y superficial

Las temperaturas medias del aire y del suelo permiten calcular el desfase (desde este momento denominado offset) térmico y el offset superficial. Éste último está definido como la diferencia entre la temperatura media anual de la superficie y la temperatura media anual del aire. Por otro lado, el offset térmico es la diferencia entre la temperatura media anual de la superficie y la del techo del permafrost, si es que éste se alcanza a lo largo de la profundidad del sondeo (Smith, 2002) (Figura 4). A lo largo del periodo de estudio y en los tres sondeos estudiados se ha considerado como temperatura de la superficie los datos del sensor localizado a 5 cm de profundidad dado que era del que más datos se disponían. Sin embargo, si algún año no había datos a esa profundidad se ha utilizado el dato correspondiente a 2,5 cm, dándose este caso en el STS_2 el año 2014.

La importancia de este parámetro radica en que si el offset térmico toma valores muy cercanos a los 0°C, la diferencia entre la temperatura anual de la superficie y el techo del permafrost es mínima por lo que cualquier incremento en la temperatura superficial afectará de manera drástica al permafrost, lo que hace que el permafrost sea inestable (de Pablo et al., 2017).

Índice de congelación y descongelación

Los índices de congelación (Freezing Degree-Days, FDD) y de descongelación (Thawing Degree-Days, TDD) del suelo y del aire, son el resultado del sumatorio anual de las temperaturas medias diarias negativas ($T^a < 0^\circ\text{C}$) y positivas ($T^a > 0^\circ\text{C}$), respectivamente (Andersland and Ladanyi, 2004). Estos índices nos ayudan a ajustar las fechas en las que comienzan y finalizan los periodos de congelación (C) y descongelación (D), definidos como aquella fecha en la que la temperatura media diaria de la superficie (5 cm) permanece por debajo o por encima de los 0°C, ignorando los periodos cortos de tiempo. En el STS_2 en el año 2014 al no haber datos de temperatura se utilizaron los correspondientes a 2,5 cm. Esto nos permite también definir el efecto cortina (Zero Curtain, ZC o EC), aquel periodo de tiempo en el que la temperatura media diaria del suelo permanece cerca de los 0°C mientras que la del aire varía. Esto es debido a que el cambio de fase de agua a hielo o viceversa, se retrasa debido a la liberación

del calor latente, lo que nos permitirá conocer si el suelo está aislado (Zhao, 2000; Gruber, 2004; French, 2017) (Figura 5).

Factor n

A partir de los índices de congelación y descongelación de la superficie y del aire calculados con anterioridad se ha calculado el factor n de congelación (n_f) y descongelación (n_t), respectivamente. Así el factor n es el cociente de cada índice en la superficie y el aire. El cálculo de este parámetro permite ver el grado de aislamiento que tiene el suelo respecto a la atmósfera, que, en este caso, debido a la ausencia total de vegetación en la zona de estudio, se debe a la presencia de una capa de nieve que amortigua la transmisión de temperatura, reduciendo la amplitud de las señales térmicas en profundidad (Andersland and Ladanyi, 2004).

De esta manera, cuando el n_f toma valores por debajo de 1, hay un aislamiento de la superficie a causa de la nieve. Sin embargo, si el n_t toma valores por encima de 1 es importante la absorción de radiación por la superficie del suelo desnuda (Ramos et al., 2012).

3 RESULTADOS

Respecto a la temperatura del aire se puede apreciar que la temperatura media se mantiene cercana a los 0°C, pero levemente por debajo dado que las temperaturas mínimas han llegado a descender de los -20°C, mientras que las máximas apenas superaron los 6°C (Figura 6; Tabla A1. 1). Mientras que Turner et al. (2005) observó que esta región de la Antártida refleja un aumento de la temperatura media anual del aire en torno a 2.5°C durante los últimos 50 años, en este caso, no se observa en el periodo estudiado ninguna tendencia creciente de temperatura media.

Los perfiles térmicos de los sondeos en cada año del periodo 2009-2017 tienen forma de V muy pronunciada y son asimétricos con respecto a la temperatura media, situada ligeramente por debajo de la isoterma de 0°C (Figura 7).

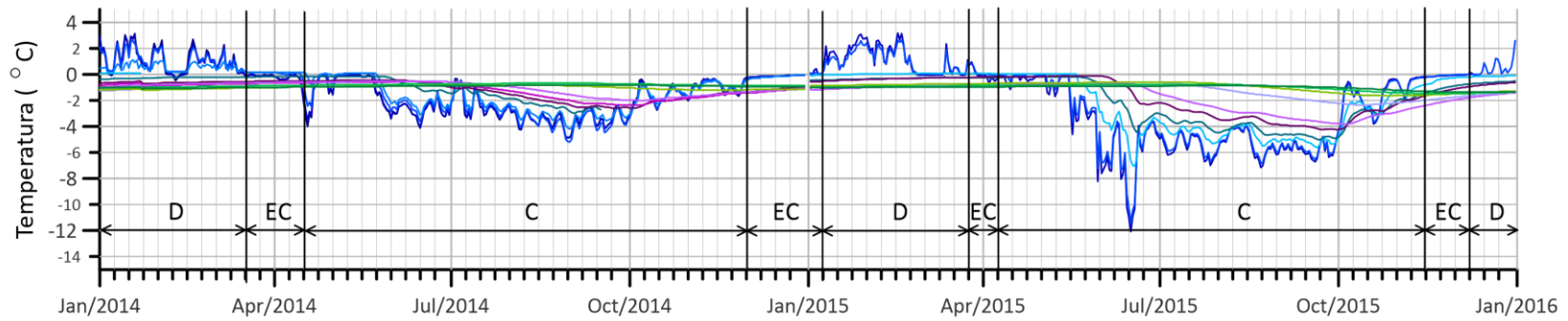
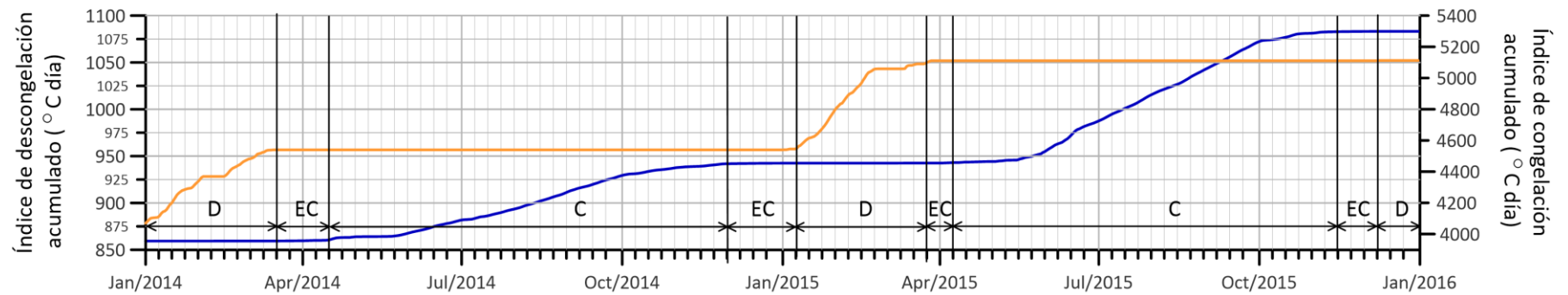
A**B**

Figura 5. Ejemplos de temperatura media diaria del suelo a diferentes profundidades (A) y los índices de congelación (FDD) y descongelación (TDD) acumulados del sondeo STS_1 en la superficie durante el periodo 2014-2015 en Crater Lake (B), mostrando en ambos el periodo de congelación (C), descongelación (D) y el efecto cortina (EC).

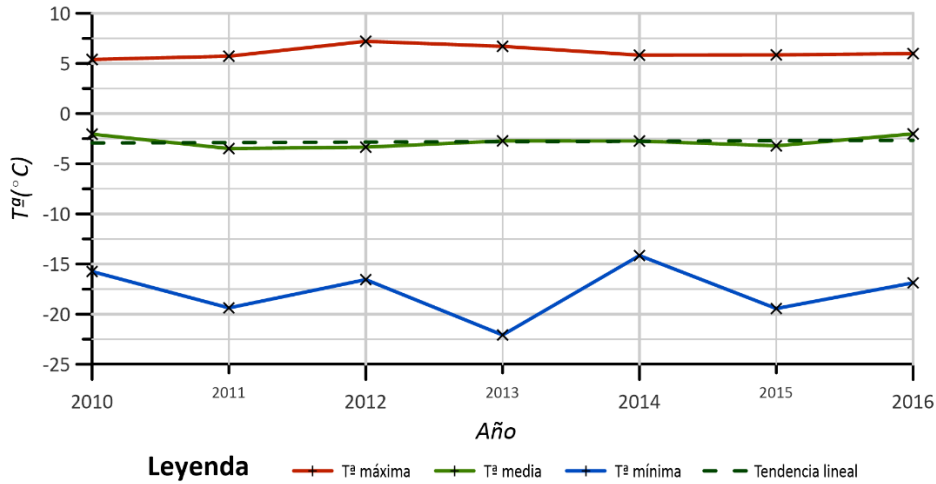


Figura 6. Evolución de la temperatura del aire durante el periodo 2010-2016.

En superficie, la amplitud térmica es importante, llegando las temperaturas máximas a alcanzar valores de hasta 10°C y las mínimas de hasta -15°C, como ocurre en el STS_1 (Figura A1. 5). A medida que aumentamos la profundidad, las curvas de temperaturas máximas y mínimas convergen acercándose a los 0°C, y alcanzándose la amplitud térmica cero en los tres sondeos, teniendo en consideración la resolución de los datos (Figura 8; Tabla A1. 11).

Los sondeos STS_2 y STS_3 siguen un comportamiento similar debido a que están situados muy cerca el uno del otro (Figura A1. 6; Figura A1. 7). Durante los primeros seis años de registro tanto la temperatura máxima como la mínima en la superficie están muy cercanas a 0°C. Sin embargo, a partir del año 2014 las temperaturas en superficie y, por tanto, en profundidad, comienzan a ser más extremas (Figura 7), de esta manera la profundidad de la amplitud térmica cero tiene tendencia a aumentar, llegando a profundidades de entre 350-500 cm en los tres sondeos. Los primeros años de registro la profundidad en el STS_3 es menor que el STS_2 y esta menor que en el STS_1 (Figura 8; Tabla A1. 11).

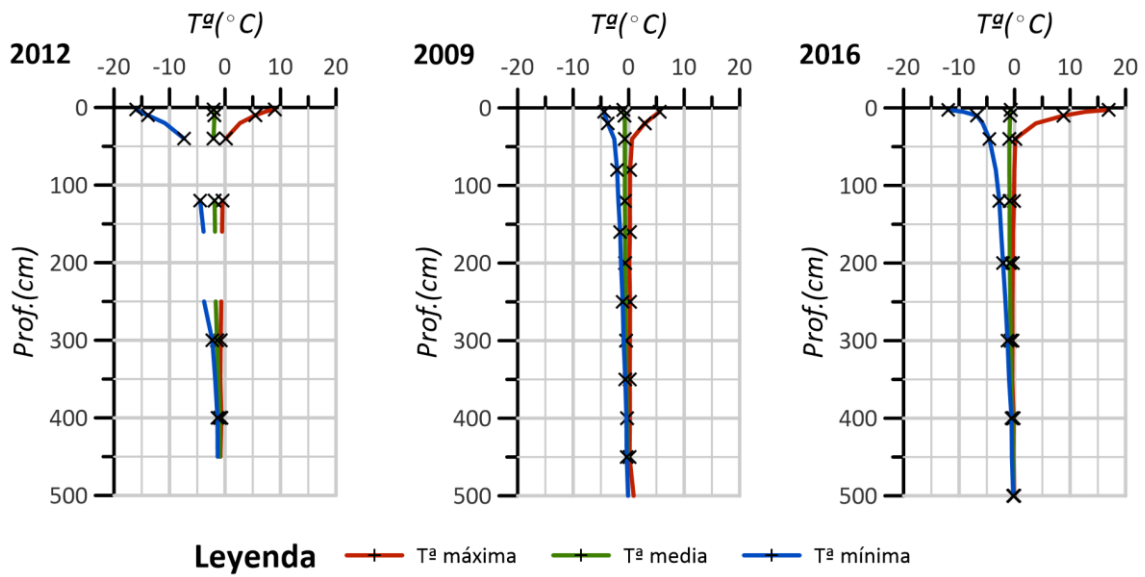


Figura 7. Ejemplos de perfiles térmicos correspondientes al sondeo STS_1 en 2012, el STS_2 en 2009 y el STS_3 en 2016.

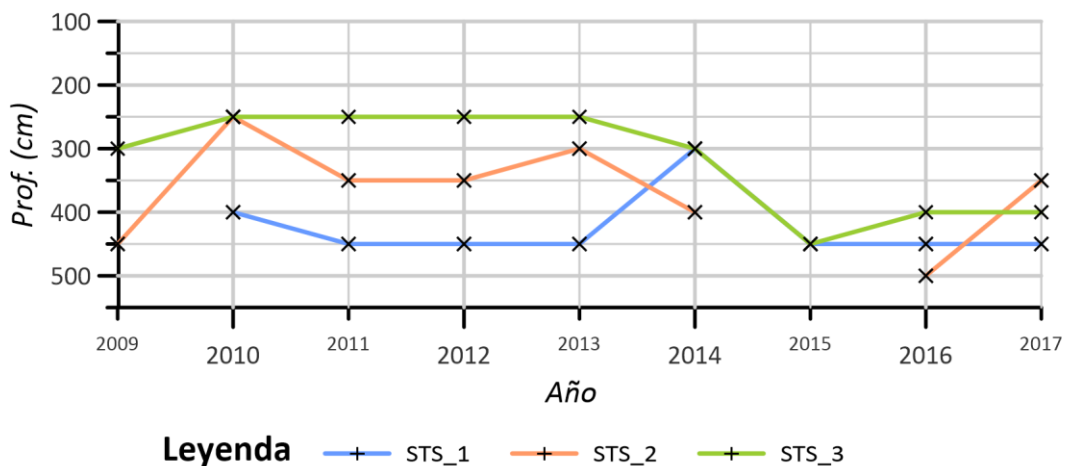


Figura 8. Profundidad de la amplitud térmica cero durante el periodo de estudio en los tres sondeos.

Los perfiles térmicos permiten establecer la profundidad de la capa activa que, en el sondeo STS_1 se mantuvo estable a unos 40 cm de profundidad en los primeros años de estudio, sufriendo un descenso en los sondeos STS_2 y STS_3 desde los 80 cm hasta los 20 cm del año 2009 al 2010 pero estabilizándose a 40 cm a partir de entonces (Figura 9; Tabla A1. 12). Desde el año 2014 inclusive, los sondeos STS_1 y STS_3 sufren grandes variaciones, llegando a alcanzarse un mínimo de 20 cm en el STS_3 y un máximo de 80 cm en el STS_1 que se repite en el 2016 y que se da también en el año 2017 en el STS_3.

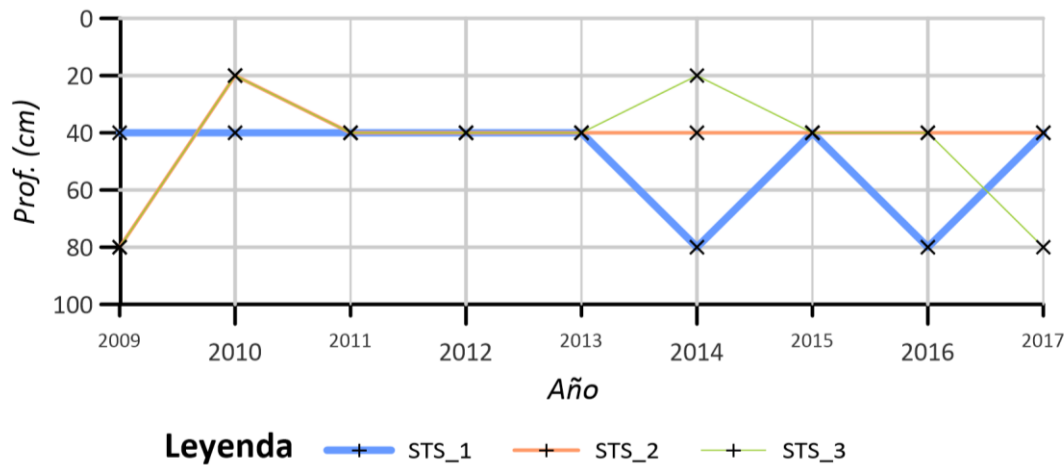


Figura 9. Evolución de la profundidad del techo del permafrost (o espesor de la capa activa) en los tres sondeos durante el periodo de estudio.

En los termogramas se puede observar un comportamiento distinto en cada sondeo (Figura 10). En el STS_1 no se observa que se alcanzara la base del permafrost, si bien se sabe que la finalización de la perforación del sondeo se debió a que durante los trabajos de perforación se alcanzó la base del permafrost (M.A. de Pablo, Comunicación personal). En el STS_2 a 500 cm se comienza a observar la isoterma de 0°C durante los meses de junio a septiembre de 2011, diciembre de 2012 y de enero a octubre de 2014. Mientras que, en el STS_3 se distingue con total claridad la base del permafrost en torno a los 350-400 cm de profundidad y en el periodo comprendido entre enero y noviembre de 2014 entre los 300 y 400 cm de profundidad se observa la presencia de un talik, si bien este no se mantiene a la misma profundidad cada año.

El frío en profundidad no se propaga de igual manera en los tres sondeos. En el STS_1 se puede percibir la onda térmica durante todo el periodo y hasta una profundidad de 400 cm, en el STS_2 y STS_3 por su parte, el año que más se nota el frío en profundidad es en el 2015, que alcanza los 450 cm en el STS_2 y los 350 cm en el STS_3, por lo que estos dos sondeos se puede suponer que están más aislados que el STS_1, lo que no permite que el frío se propague en profundidad.

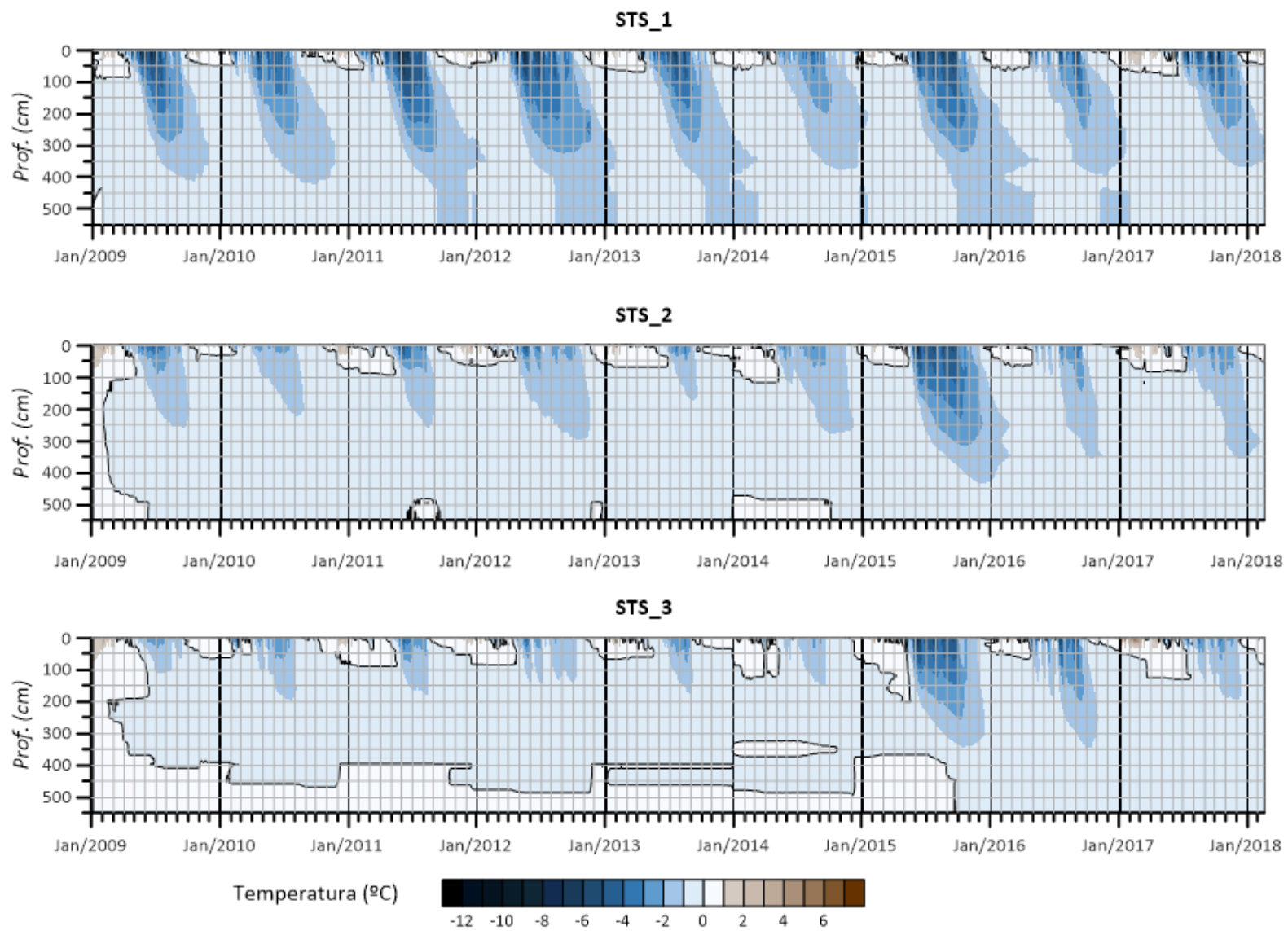


Figura 10. Termogramas de los tres sondeos durante el periodo 2009-2017.

Los offset superficial y térmico (Figura 11) siguen un comportamiento similar, aumentan y disminuyen a la vez obteniendo temperaturas más bajas en el STS_1, seguido del STS_2 y STS_3, teniendo estos dos últimos valores más próximos, posiblemente, por su cercanía geográfica (Figura 12; Tabla A1. 13). Los primeros años de registro el STS_1 muestra valores más diferenciados de los otros dos sondeos, pero a partir del 2014, los offset de los tres sondeos empiezan a parecerse más. En el 2015 se registró el valor más bajo de offset térmico y superficial, mientras que los valores más altos se dan en el 2011 y 2013 para el offset térmico y en el 2011 para el offset superficial (Figura 12; Tabla A1. 13).

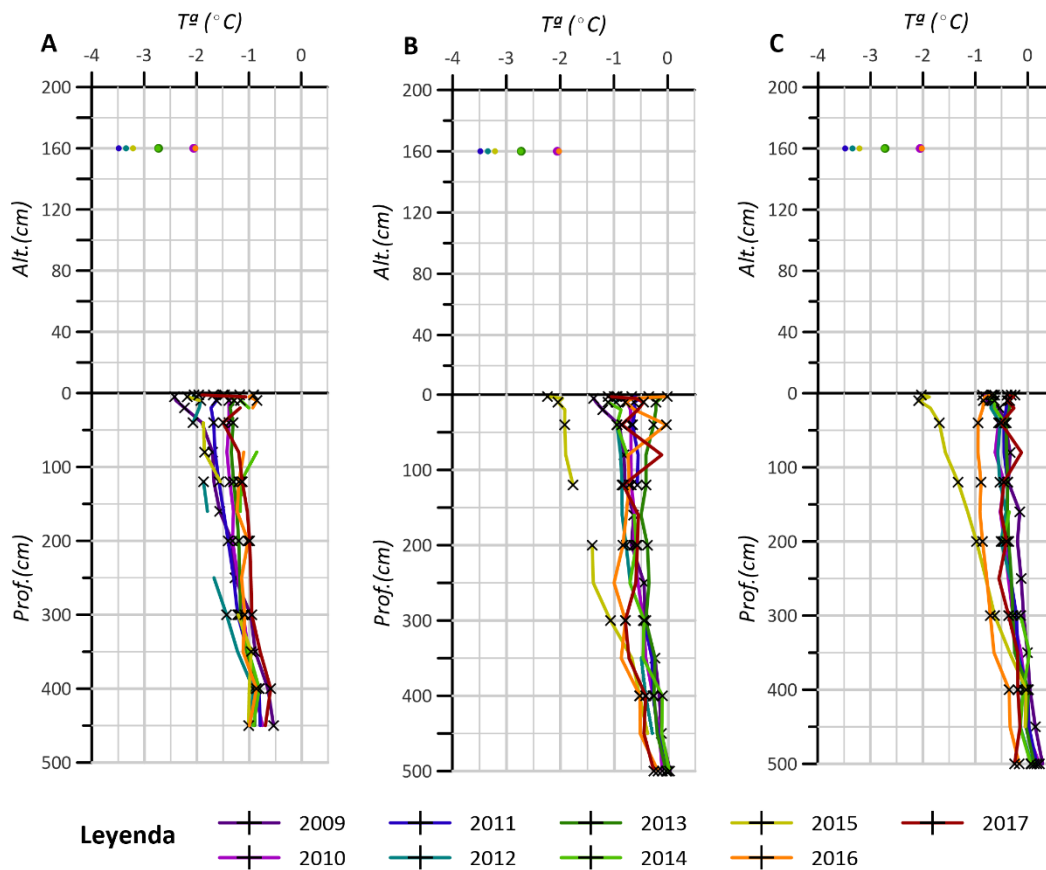


Figura 11. Temperaturas medias anuales en profundidad y del aire de los sondeos STS_1 (A), STS_2 (B) y STS_3 (C) usadas para el cálculo de los offset superficial y térmico.

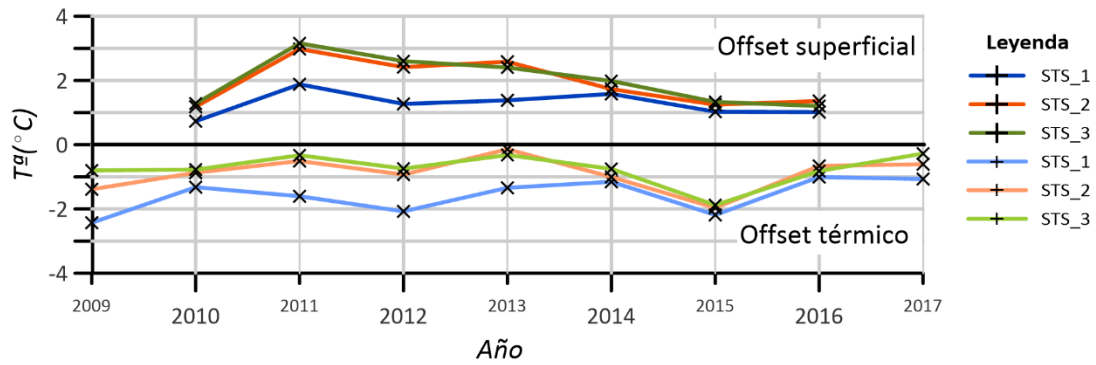


Figura 12. Evolución de los offset superficial y térmico de los tres sondeos durante el periodo de estudio.

Los índices de congelación y descongelación calculados para los tres sondeos durante el periodo de estudio muestran de forma general un descenso en profundidad, mientras que en el aire se registran los valores más altos del índice de congelación (Tabla 2). El índice de descongelación comienza a ser cero en el STS_1 entre los 40 y 80 cm (Tabla A1. 14) y en el STS_2 y STS_3 entre los 80 y 120 cm (Tabla A1. 15; Tabla A1. 16), lo que significa que el suelo está permanentemente por debajo de los 0°C. En el STS_2 a 500 cm y en el STS_3 en torno a los 400 cm se vuelven a registrar temperaturas por encima de los 0°C, confirmando así la proximidad de la base del permafrost.

Tabla 2. Ejemplo de índice de congelación y descongelación del sondeo STS_3 el año 2012

Medida	Alt./prof.	FDD	TDD
Aire	160	-1159	62
Suelo	-2,5	-382	138
	-5	-383	113
	-10	-344	94
	-20	-307	52
	-40	-221	29
	-80	-209	2
	-120	-194	0
	-160	-151	0
	-200	-185	0
	-250	-122	0
	-300	-12	0
	-350	-69	0
	-400	-33	0
-450	-52	0	
-500	0	26	
-550	-	-	

Se ha realizado un gráfico de los índices de congelación y descongelación acumulados en superficie (Figura 13), y en los tres sondeos se observa un aumento progresivo del índice de congelación desde el 2009 al 2015 y del 2016 al 2017, sin embargo, en concreto el año 2015 sufre un aumento más repentino. En cuanto al índice de descongelación cabe destacar el año 2017 que con diferencia es el que sufre un mayor aumento.

El efecto cortina se puede observar cuando ambos índices son paralelos lo que significa que no aumenta la temperatura del suelo ya que la energía se emplea en cambio de fase de agua a hielo, este es mayor tras los periodos de congelación por ser entonces cuando se acumula la nieve. Por otro lado, destaca que en los últimos años de registro el periodo de tiempo que dura este efecto es más grande, llegando algún año a los tres meses de duración (Figura 13).

Los periodos de congelación comienzan en los meses de marzo a junio, mientras que los de descongelación de septiembre a diciembre (Tabla 3). Los años que antes comienza el periodo de congelación son el 2014 en el STS_1 y el 2016 en los sondeos STS_2 y STS_3, mientras que los que más tarde comienzan son el año 2011 en los sondeos STS_1 y STS_3 y el 2013 en el STS_2. Por su parte el periodo de descongelación empieza antes el año 2011 en los sondeos STS_1 y STS_2 y el 2016 en el STS_3, mientras que comienza más tarde en el 2014, 2010 y 2012 en el STS_1, STS_2 y STS_3 respectivamente (Tabla 3).

En los sondeos STS_1 y STS_3 el año que más dura la congelación es el 2014 con 288 y 223 días respectivamente y el año que menos dura este periodo es el 2011, con 140 y 111 días cada sondeo. En el STS_2 es el 2010 el año que más dura este periodo con 256 días y el 2013 el que menos con 110 días. En cuanto a la descongelación, los años que más dura son respectivamente el 2010 con 212 días, 2011 con 233 días y 2016 con 251 días en cada sondeo, y los que menos dura el 2014, 2009 y 2015 con 89, 123 y 126 días respectivamente cada sondeo (Figura 14; Tabla A1. 17).

No se observa de este modo ninguna tendencia que nos indique que conforme pasan los años los periodos de congelación y descongelación duran más o menos tiempo o bien comienzan más tarde o más temprano. Pero si es importante el hecho de que el periodo de congelación comience tres meses más

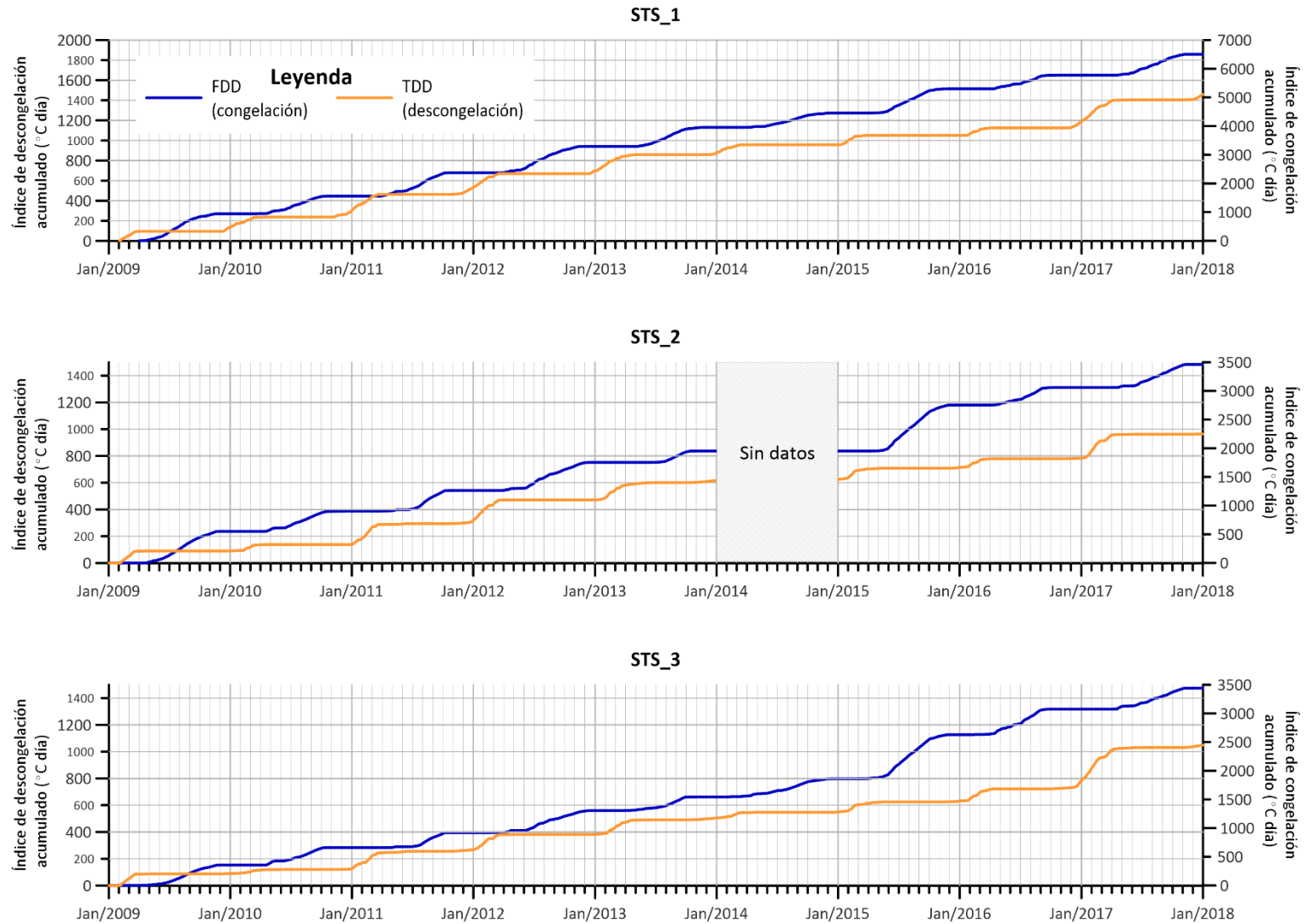


Figura 13. Índices de congelación y descongelación acumulados en superficie del periodo 2009-2017.

Tabla 3. Fechas de inicio y fin de los periodos de congelación y descongelación en los tres sondeos durante el periodo de estudio.

	2009		2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017	
Sondeo	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D
STS_1	2-abr.	7-dic.	17-abr.	1-nov.	1-jun.	19-oct.	21-mar.	13-dic.	23-abr.	2-nov.	17-mar.	30-dic.	29-mar.	6-dic.	12-abr.	5-nov.	21-may.	8-nov.
STS_2	23-abr.	16-dic.	18-abr.	30-dic.	16-jun.	9-oct.	29-may.	29-dic.	26-jun.	14-oct.	13-may.	10-dic.	16-may.	29-nov.	8-abr.	31-oct.	5-jun.	16-nov.
STS_3	19-may.	27-nov.	13-jun.	19-nov.	22-jun.	11-oct.	30-may.	29-dic.	6-jun.	4-oct.	13-may.	22-dic.	16-may.	25-nov.	30-mar.	29-sep.	7-jun.	9-nov.

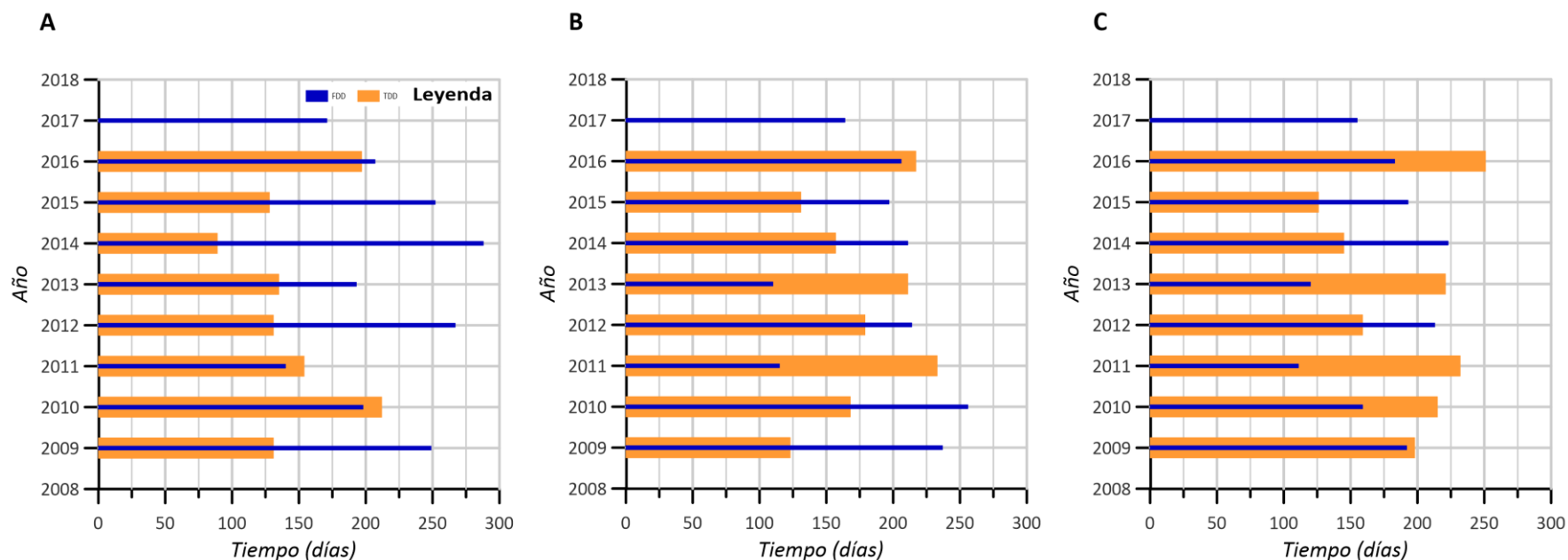


Figura 14. Duración en días de los periodos de congelación y descongelación de los sondeos STS_1 (A), STS_2 (B) y del STS_3 (C) durante el periodo de estudio.

tarde, caso que se da en el STS_3 entre los años 2016, que comienza en marzo y el 2017, que comienza en junio. Ese periodo dura prácticamente lo mismo en esos años, con una diferencia de 28 días menos en el 2017, pero tiene consecuencias en el permafrost que se haya retrasado la congelación hasta tres meses más.

Los años con mayor aislamiento, es decir, valores del n_f más próximos a cero, son el 2014, 2013 y 2011 en cada sondeo respectivamente, mientras que los que hubo menos aislamiento térmico son el 2010 en el STS_1 y el 2015 en el STS_2 y STS_3 (Figura 15; Tabla A1. 18).

Por otro lado, los años en los que fue más importante la absorción de radiación por parte de la superficie del suelo desnuda, es decir valores de n_t mayores de 1, fueron el 2012 en los tres sondeos y el 2014 en los sondeos STS_1 y STS_2, mientras que por el contrario los años con valores más bajos fueron el 2010, el 2013 y el 2015 en los tres sondeos y notablemente el 2014 en el STS_2 (Figura 16; Tabla A1. 18).

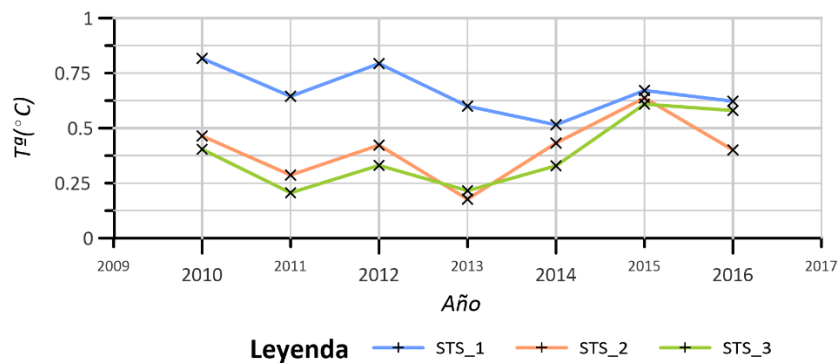


Figura 15. Evolución del factor n de congelación de los tres sondeos durante el periodo de estudio.

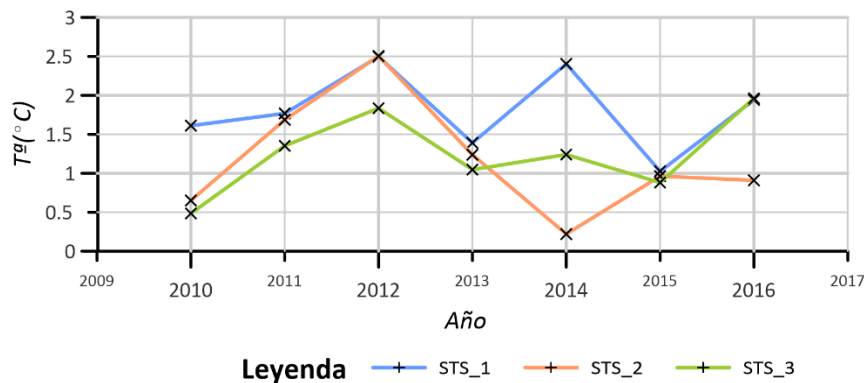


Figura 16. Evolución del factor n de descongelación de los tres sondeos durante el periodo de estudio.

4 DISCUSIÓN

En términos generales, se observa la presencia de permafrost en los tres sondeos, bajo una capa activa que, aunque variable de un sondeo a otro, y a lo largo del tiempo, ronda los 40 cm de profundidad (Figura 9). Los distintos gráficos y parámetros calculados nos muestran pequeñas variaciones locales que pueden ser debidas a las variaciones topográficas y de orientación frente a los vientos, zonas de acumulación de nieve, etc. Pero, en general, los tres sondeos muestran un comportamiento similar entre ellos y, comparados con los resultados obtenidos con otros estudios en la misma zona (Ramos et al., 2010; Goyanes et al., 2014; Ramos et al., 2017, de Pablo et al., 2017;) y en la misma región, como la isla Livingston (de Pablo et al., 2013, 2014; Oliva et al., 2017) lo que permite caracterizar térmicamente el permafrost y la capa activa de este emplazamiento además de predecir qué es lo que le puede ocurrir en el futuro frente a distintos escenarios de calentamiento global.

Así los perfiles térmicos y los termogramas (Figura A1. 5; Figura A1. 6; Figura A1. 7; Figura 10) muestran un mismo comportamiento térmico del suelo en profundidad, donde la gran variabilidad de temperaturas en superficie y la onda térmica que se transmite en profundidad, es debida a la ausencia de una gran capa de nieve y por tanto mayor importancia de la absorción de la radiación por parte del suelo desnudo (Figura 15; Figura 16), y no a cambios en la temperatura del aire, como sería de esperar (Figura 6). Esto se refleja también en mayores valores de los índices de congelación y descongelación de la superficie en estos casos (Figura 13). Aunque en este trabajo no se ha estudiado el espesor de la capa de nieve, Ramos et al. (2017) observó que debido a que la localización del STS_1 estaba en una zona más expuesta a los vientos, la capa de nieve era menos profunda que en otros puntos del área de estudio. Esto hace que el espesor de la capa activa, estudiado también por Ramos et al. (2010) y obteniendo estos mismos resultados, se mantenga más o menos estable, en torno a los 40 cm, ya que el volumen de agua que se recibe por la descongelación de esa nieve no es relevante (Figura 9) si bien sí que se generan efectos cortina debido a la formación y fusión de hielo en el suelo (Figura 13), lo que provoca además que la profundidad a la que se localiza la amplitud térmica cero se mantenga también estable a gran profundidad (Figura 8). A diferencia de estos datos obtenidos, de Pablo

et al. (2013; 2014) observó que en el periodo 2009-2012 en la península de Byers en Isla Livingston la capa activa podría situarse entre los 90-135 cm de profundidad máxima, aunque estos valores no pudieron confirmarse.

En el momento en el que existe una mayor capa de nieve (Figura 15) ya no es importante la absorción de radiación en la superficie del suelo (Figura 16), el terreno se comportará de manera prácticamente isoterma con temperaturas muy cercanas a los 0°C desde la superficie y cuando comienza el periodo de descongelación, que será más largo que el periodo de congelación (Figura 13; Figura 14), se proporcionará un gran volumen de agua al terreno que hace que la capa activa se vuelva más profunda (Figura 9; Figura 15) y la profundidad de la amplitud térmica cero disminuya considerablemente (Figura 8). Este caso es el que se da desde el 2009 hasta el 2014 en los sondeos STS_2 y STS_3 (Figura 8; Figura 10; Figura A1. 6; Figura A1. 7) cuyos perfiles térmicos indican que el permafrost es muy sensible a los pequeños cambios de temperatura que se dan en el aire.

Los offset térmico y superficial (Figura 12) reflejan también la variación en el espesor de la capa activa, con valores negativos y cercanos a 0°C, respectivamente cuando no hay nieve y la capa activa es poco profunda, y valores cercanos a 0°C y positivos cuando hay una gran capa de nieve y la capa activa es profunda. Esa presencia de agua comentada anteriormente se ve reflejada también en la mayor duración del efecto cortina tras el periodo de congelación (Figura 13), lo que prueba que la capa de nieve es profunda y antes de aumentar la temperatura del suelo, la energía se emplea en cambiar de estado la nieve, esto se puede observar de manera muy clara también en la duración del periodo de descongelación el año 2013 (Figura 14; Tabla 3), notablemente mayor que el periodo de congelación. Ese año también se registró la temperatura del aire más baja (Figura 6), lo que corrobora que se acumulara más nieve.

La base del permafrost se alcanza en torno a los 400 cm, con variaciones en los distintos sondeos y cada año (Tabla A1. 14; Tabla A1. 15; Tabla A1. 16; Figura 10) y la presencia del talik puede ser debida a un flujo de agua salada que no permite que esa parte del terreno se congele o debido a la actividad volcánica de la zona. A esas profundidades se alcanza ya la amplitud térmica cero y ese ascenso de temperatura

del terreno puede estar causado por el aumento de la temperatura en superficie (Figura 8).

Se puede observar que el año 2015 supuso un punto de inflexión, a partir del cual los offset se estabilizan en valores cercanos a 0°C (Figura 12), los perfiles térmicos y los termogramas muestran un comportamiento térmico en superficie de los tres sondeos que empieza a parecerse más (Figura A1. 5; Figura A1. 6; Figura A1. 7; Figura 10) debido a que el aislamiento que sufren es el mismo (Figura 15; Figura 16), con un espesor de la capa activa que parece tener tendencia a aumentar (Figura 9) lo que implica que la amplitud térmica cero también se sitúe a más profundidad (Figura 8). Estos hechos hacen que el permafrost a partir de este momento sea muy inestable frente a mínimos cambios de temperatura, cuya causa directa no es la temperatura del aire pues existe una capa de nieve que aísla el terreno. Esta inestabilidad fue observada también por de Pablo et al. (2017) en las inmediaciones de la Base Antártica Española Gabriel de Castilla entre el 2012 y el 2015.

5 CONCLUSIONES

El análisis de los datos registrados y los parámetros realizados para las estaciones de Crater Lake nos han permitido conocer cómo se comporta térmicamente el terreno, pudiéndose extraer las siguientes conclusiones:

- El permafrost se extiende desde los 40 cm hasta los 450-500 cm de profundidad en la zona de estudio.
- El aumento de la profundidad de la capa activa es debido al aislamiento que sufre el terreno debido a la nieve, cuando ese aislamiento es mínimo el frío penetra más y el permafrost es más estable, sin embargo, cuando el aislamiento es máximo la temperatura del terreno es más cercana a los 0°C y el permafrost se vuelve inestable.
- La profundidad de la amplitud térmica cero alcanza sus valores más profundos a partir del 2015, situándose en torno a los 350-500 cm y haciendo de esta forma que el permafrost sea inestable.

- El offset superficial y térmico tienen tendencia decreciente y creciente respectivamente hasta el año 2015, cuando empiezan a estabilizarse en torno a los 0°C.
- El índice de congelación tiene una mayor variabilidad interanual que el de descongelación, 878°C y 248°C respectivamente, cuyos periodos son también más cortos cuando el aislamiento del suelo es mínimo, 148 días frente a 218 del periodo de congelación.
- El factor n de congelación se estabiliza a partir del 2015 en torno a 0,6 mientras que el de descongelación es más variable debido a que le influyen más factores, no sólo el aislamiento debido a la nieve, pero estabilizándose también entre 1 y 2 a partir del 2015.

Un análisis continuo durante una serie de años más larga y analizando en profundidad más parámetros como el espesor de nieve, factor que podemos considerar relevante en el aumento de la capa activa y en la inestabilidad del permafrost, podremos proporcionar más datos y caracterizar de una manera más detallada el comportamiento general del permafrost en Crater Lake, dado que ese punto de inflexión que se aprecia a partir de 2015 y hasta el 2017 nos proporciona una serie de años muy corta para poder asegurar que esa tendencia continuará así.

6 REFERENCIAS

- Alonso, V., 2017. El permafrost, un suelo congelado afectado por las variaciones climáticas del Cuaternario. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 25 (1), 48.
- Andersland, O. B. and Ladanyi, B., 2004. Frozen ground engineering, 2nd edn., John Wiley & Sons Inc.
- Bockheim, J., Vieira, G., Ramos, M., López-Martínez, J., Serrano, E., Guglielmin, M., Wilhelm, K. and Nieuwendam, A., 2013. Climate warming and permafrost dynamics in the Antarctic Peninsula region. *Global and Planetary Change*, 100, 215-223.

- Brown, J., Hinkel, K. M. and Nelson, F. E., 2000. The circumpolar active layer monitoring (CALM) program: research designs and initial results. *Polar geography*, 24 (3), 166-258.
- Burgess, M.M., Smith, S.L., Brown, J., Romanovsky, V. and Hinkel, K., 2000. Global Terrestrial Network for Permafrost (GTNet-P) permafrost monitoring contributing to global climate observations. *Geological Survey of Canada, Current Research 2000 E14*, 1–7.
- Correia, A., Vieira, G. and Ramos, M., 2012. Thermal conductivity and thermal diffusivity of cores from a 26 meter deep borehole drilled in Livingston Island, Maritime Antarctic. *Geomorphology*, 155, 7-11.
- de Pablo, M. R., Vieira, G. and Molina, A., 2012. Revealing the secrets of permafrost. *Science in School*.
- de Pablo, M. A., Blanco, J. J., Molina, A., Ramos, M., Quesada, A. and Vieira, G., 2013. Interannual active layer variability at the Limnopolar Lake CALM site on Byers Peninsula, Livingston Island, Antarctica. *Antarctic Science*, 25 (2), 167-180.
- de Pablo, M.A., Ramos, M. and Molina, A., 2014. Thermal characterization of the active layer at the Limnopolar Lake CALM-S site on Byers Peninsula (Livingston Island), Antarctica. *Solid Earth* 5, 721–739.
- de Pablo, M. A., Molina, A., Recio, C., Ramos, M., Goyanes, G. and Roperó, 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.
- French, H. M., 2017. *The periglacial environment*. John Wiley & Sons.
- Goyanes, G., Vieira, G., Caselli, A., Mora, C., Ramos, M., de Pablo, M. A., Neves, M., Santos, F., Bernardo, I., Gilichinsky, D., Abramov, A., Batista, V., Melo, R., Nieuwendam, A., Ferreira, A. and Oliva, A., 2014. Régimen térmico y variabilidad espacial de la capa activa en isla Decepción, Antártica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 71 (1), 112-124.

- Gruber, S., King, L., Kohl, T., Herz, T., Haeberli, W. and Hoelzle, M., 2004. Interpretation of geothermal profiles perturbed by topography: The Alpine permafrost boreholes at Stockhorn Plateau, Switzerland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 15 (4), 349-357.
- International Permafrost Association, 2018a. *Circumpolar Active Layer Monitoring Network (CALM)*. Disponible en: <<https://ipa.arcticportal.org/activities/gtn-p/calm/16-calm>> [28/05/2018]
- International Permafrost Association, 2018b. *Thermal State of Permafrost (TSP)*. Disponible en: <<https://ipa.arcticportal.org/activities/gtn-p/tsp/15-tsp.html>> [22/05/2018]
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza.
- Nelson, F.E., Shiklomanov, N.I., Hinkel, K.M. and Christiansen, H.H., 2004. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Workshop and THE CALM II Program. *Polar Geography*, 28 (4), 253-266.
- Oliva, M., Hrbacek, F., Ruiz-Fernández, J., de Pablo, M. A., Vieira, G., Ramos, M. and Antoniades, D., 2017. Active layer dynamics in three topographically distinct lake catchments in Byers Peninsula (Livingston Island, Antarctica). *Catena*, 149, 548-559.
- Osterkamp, T. E. and Burn, C. R., 2014. Permafrost. *Encyclopedia of atmospheric sciences* (1), 1717-1729.
- Ramos, M., Vieira, G., Gruber, S., Blanco, J. J., Hauck, C., Hidalgo, M. A., Tomé, D., Neves, M. and Trindade, A., 2007. Permafrost and active layer monitoring in the Maritime Antarctic: Preliminary results from CALM sites on Livingston and Deception Islands. *US Geological Survey and The National Academies*.
- Ramos, M., Vieira, G., Guilichinski, D. and de Pablo, M. A., 2010. Nuevas estaciones de medida del régimen térmico del permafrost en el área de "Crater Lake". Isla

- Decepción (Antártida). Resultados preliminares. *Proceedings of II Iberian Conference of the International Permafrost Association Periglacial, environments, permafrost and climate variability*, 93-109.
- Ramos, M., de Pablo, M. A., Molina, A., Vieira, G., Trindade, A. and Correia, A., 2012. Análisis de los ciclos de congelación y descongelación en la capa activa en el entorno de la BAE JCI. Periodo 2000-2011. *7ª Asamblea Hispano-Portuguesa De Geodesia y Geofísica*, 9, 722-726.
- Ramos, M., Vieira, G., de Pablo, M. A., Molina, A., Abramov, A. and Goyanes, G., 2017. Recent shallowing of the thaw depth at Crater Lake, Deception Island, Antarctica (2006–2014). *Catena*, 149, 519-528.
- Schuur E. A. G., Bockheim J., Canadell J. G., Euskirchen E., Field C. B., Goryachkin S. V., Hagemann S., Kuhry P., Lafleur P. M., Lee H., Mazhitova G., Nelson F. E., Rinke A., Romanovsky V. E., Shiklomanov N., Tarnocai C., Venevsky S., Vogel J. G. and Zimov S. A., 2008. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle. *BioScience*, 58 (8), 701–714.
- Smellie, J.L., López-Martínez, J., Headland, R.K., Hernández-Cifuentes, F., Maestro, A., Millar, I.L., Rey, J., Serrano, E., Somoza, L. and Thomson, J.W., 2002. Geology and geomorphology of Deception Island. Cambridge, *British Antarctic Survey*, 77.
- Smith, M.W. and Riseborough, D.W., 2002. Climate and the limits of permafrost: a zonal analysis. *Permafrost and Periglacial Processes*, 13 (1), 1-15.
- Tomé, D., Ramos, M., Hidalgo, M. A., Vieira, G., Neves, M. and Trindade, A., 2009. Actividades del proyecto PERMAMODEL durante la campaña antártica 2006-07. *Finisterra*, 44 (87).
- Turner, J., Colwell, S. R., Marshall, G. J., Lachlan-Cope, T. A., Carleton, A. M., Jones, P. D., Lagun, V., Reid, P. A. and Iagovkina, S., 2005. Antarctic climate change during the last 50 years. *International journal of Climatology*, 25 (3), 279-294.
- Vieira, G., Bockheim, J., Guglielmin, M., Balks, M., Abramov, A. A., Boelhouwers, J., Cannone, N., Ganzert, L., Gilichinsky, D. A., Goryachkin, S., López-Martínez,

J., Meiklejohn, I., Raffi, R., Ramos, M., Schaefer C., Serrano, E., Simas, F., Sletten, R. and Wagner, D., 2010. Thermal state of permafrost and active-layer monitoring in the antarctic: Advances during the international polar year 2007–2009. *Permafrost and Periglacial Processes*, 21 (2), 182-197.

Zhao, L., Cheng, G., Li, S., Zhao, X. and Wang, S. (2000). Thawing and freezing processes of active layer in Wudaoliang region of Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 45 (23), 2181-2187.

7 ANEXO I. FIGURAS Y TABLAS.

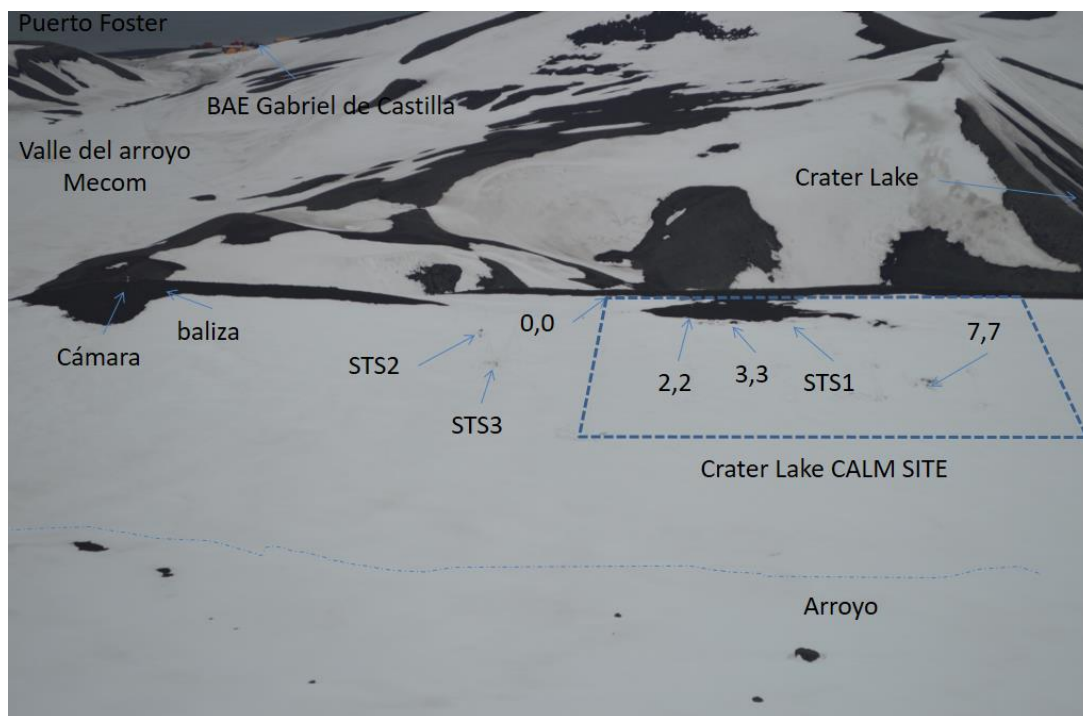


Figura A1. 1. Localización de la malla CALM-S de Crater Lake en Isla Decepción y los instrumentos instalados en ella para el control térmico del permafrost y la capa activa.

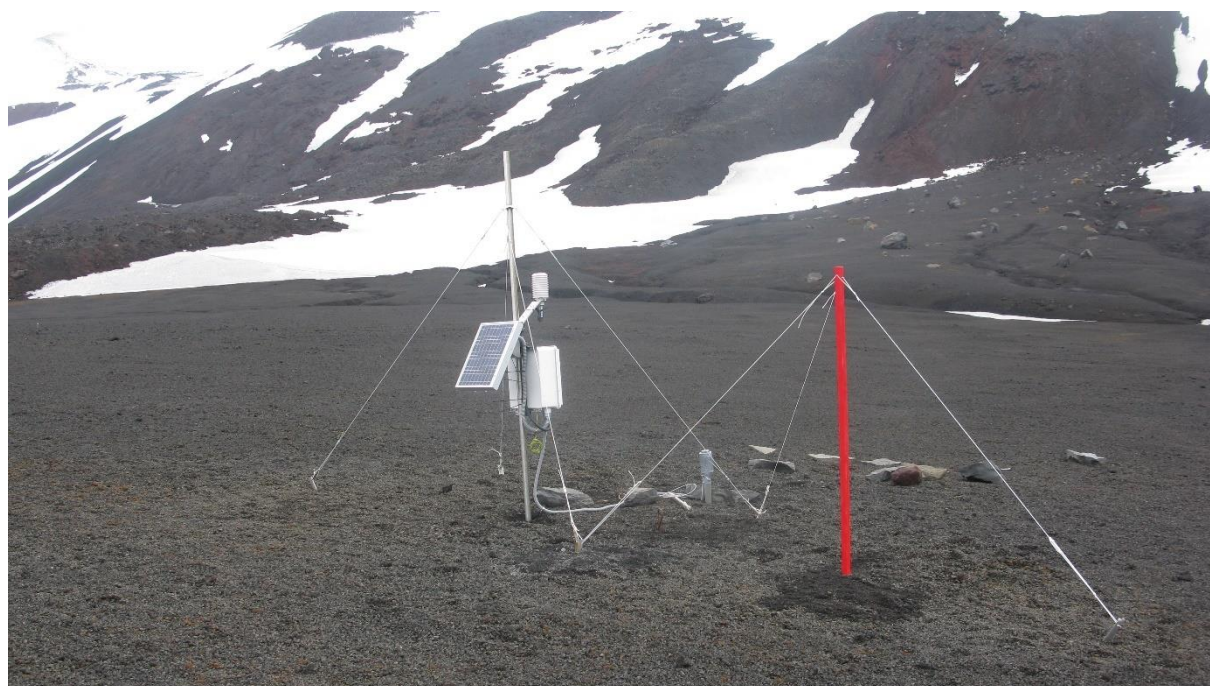
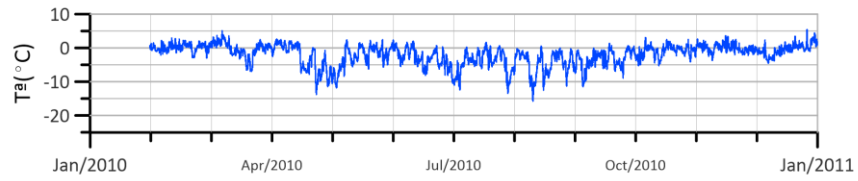
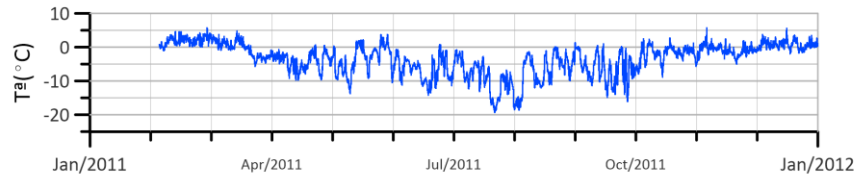


Figura A1. 2. Ejemplo de los instrumentos y sensores que tienen las estaciones STS_1, STS_2 y STS_3 para el control térmico del permafrost y la capa activa (fotografía del sondeo STS_3).

2010



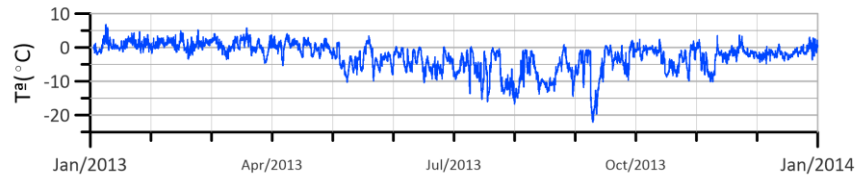
2011



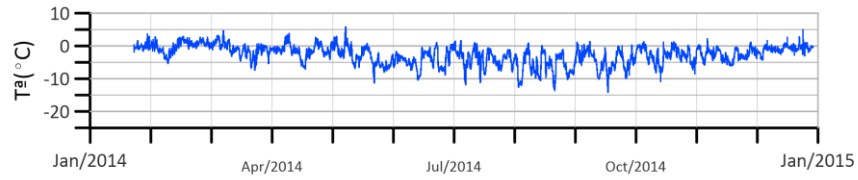
2012



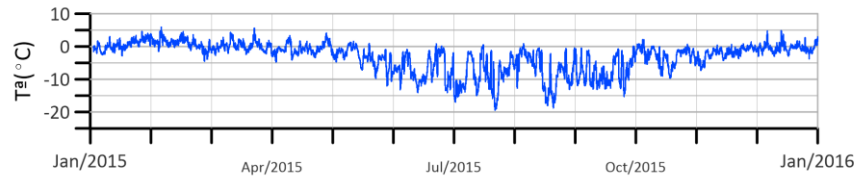
2013



2014



2015



2016



Figura A1. 3. Temperaturas brutas del aire durante el periodo 2010-2016.

Tabla A1. 1. Temperaturas máximas, medias, mínimas, amplitud térmica y desviación típica de las temperaturas del aire durante el periodo de estudio

Año	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.
2009	-	-	-	-	-
2010	5,40	-2,05	-15,75	21,15	3,10
2011	5,73	-3,49	-19,38	25,10	4,64
2012	7,21	-3,35	-16,56	23,77	3,94
2013	6,71	-2,72	-22,08	28,78	4,13
2014	5,83	-2,74	-14,16	19,99	2,90
2015	5,85	-3,21	-19,44	25,29	4,49
2016	5,98	-2,02	-16,88	22,86	3,18
2017	-	-	-	-	-

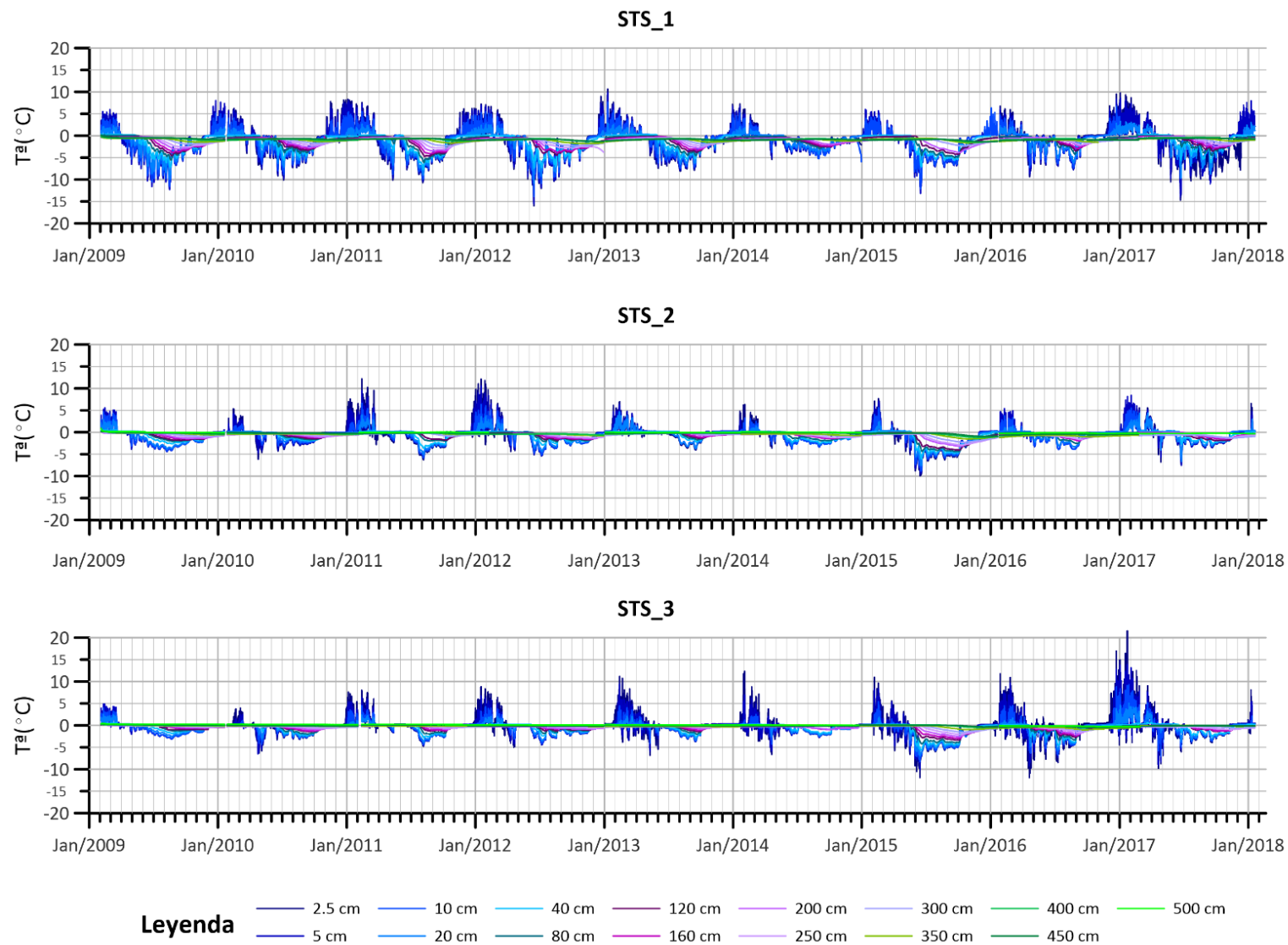


Figura A1. 4. Temperaturas brutas del terreno para los tres sondeos estudiados durante el periodo 2009-2017.

Tabla A1. 2. Temperaturas máximas, medias, mínimas, amplitud térmica y desviación típica de las temperaturas del terreno en los tres sondeos en 2009.

2009															
STS_1						STS_2					STS_3				
Prof.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.
2,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	8,03	-2,43	-12,27	20,29	3,51	5,58	-1,39	-4,42	10,00	1,92	4,86	-0,80	-3,13	8,00	1,46
10	5,09	-2,40	-11,54	16,63	3,21	4,64	-1,34	-4,29	8,93	1,85	4,01	-0,78	-3,04	7,05	1,37
20	2,24	-2,24	-9,83	12,07	2,70	2,91	-1,22	-3,77	6,68	1,58	2,54	-0,54	-2,56	5,10	1,14
40	0,34	-1,90	-7,09	7,43	2,10	0,62	-0,91	-2,60	3,21	1,06	0,62	-0,44	-1,83	2,45	0,76
80	-0,24	-1,70	-5,56	5,32	1,69	0,25	-0,82	-2,08	2,33	0,86	0,29	-0,34	-1,28	1,57	0,58
120	-0,21	-1,68	-4,55	4,34	1,41	0,22	-0,80	-1,86	2,07	0,73	0,06	-0,37	-0,95	1,01	0,46
160	-0,33	-1,57	-3,85	3,53	1,23	0,23	-0,64	-1,53	1,76	0,61	0,31	-0,15	-0,64	0,94	0,34
200	-0,22	-1,33	-3,05	2,83	1,03	0,12	-0,68	-1,39	1,51	0,48	0,22	-0,20	-0,60	0,82	0,23
250	-0,20	-1,27	-2,60	2,39	0,81	0,24	-0,45	-1,08	1,32	0,39	0,25	-0,13	-0,38	0,63	0,15
300	-0,13	-0,97	-1,89	1,76	0,59	0,22	-0,43	-0,91	1,13	0,30	0,20	-0,08	-0,24	0,44	0,10
350	-0,27	-0,89	-1,46	1,20	0,36	0,20	-0,25	-0,62	0,82	0,19	0,23	-0,01	-0,09	0,32	0,09
400	-0,22	-0,65	-1,04	0,82	0,20	0,22	-0,17	-0,41	0,63	0,13	0,23	0,04	-0,02	0,25	0,07
450	0,09	-0,54	-0,92	1,01	0,17	0,15	-0,13	-0,35	0,50	0,11	0,26	0,14	0,07	0,19	0,06
500	-	-	-	-	-	0,90	0,03	-0,11	1,01	0,11	0,46	0,28	0,20	0,25	0,03
550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla A1. 3. Temperaturas máximas, medias, mínimas, amplitud térmica y desviación típica de las temperaturas del terreno en los tres sondeos en 2010.

2010															
STS_1						STS_2					STS_3				
Prof.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.
2,5	8,13	-1,50	-10,15	18,28	2,78	5,35	-0,96	-6,18	11,53	1,48	4,09	-0,86	-6,35	10,44	1,40
5	7,65	-1,32	-9,71	17,36	2,74	4,22	-0,87	-4,62	8,85	1,36	2,45	-0,77	-6,48	8,93	1,26
10	4,96	-1,39	-8,89	13,85	2,42	1,88	-0,76	-3,15	5,03	1,12	1,19	-0,73	-4,34	5,54	1,10
20	1,99	-1,39	-7,19	9,18	1,94	0,18	-0,70	-2,21	2,39	0,83	0,17	-0,67	-3,10	3,27	0,97
40	0,12	-1,39	-5,54	5,67	1,60	0,11	-0,69	-1,89	2,00	0,65	0,19	-0,56	-2,33	2,52	0,83
80	-0,11	-1,43	-4,06	3,95	1,23	-0,13	-0,69	-1,71	1,57	0,52	-0,09	-0,62	-1,98	1,89	0,63
120	-0,18	-1,37	-3,39	3,21	0,98	-0,24	-0,69	-1,50	1,26	0,41	-0,02	-0,45	-1,46	1,44	0,46
160	-0,13	-1,30	-2,96	2,83	0,84	-0,30	-0,63	-1,24	0,95	0,31	-0,20	-0,53	-1,28	1,08	0,36
200	-0,62	-1,32	-2,69	2,08	0,67	-0,39	-0,64	-1,14	0,76	0,25	-0,20	-0,44	-1,02	0,82	0,25
250	-0,69	-1,22	-2,21	1,51	0,49	-0,36	-0,56	-0,87	0,50	0,17	-0,24	-0,37	-0,74	0,50	0,16
300	-0,70	-1,12	-1,77	1,07	0,34	-0,34	-0,46	-0,79	0,45	0,12	-0,20	-0,28	-0,45	0,25	0,10
350	-0,77	-1,02	-1,34	0,57	0,19	-0,36	-0,42	-0,55	0,20	0,07	-0,09	-0,13	-0,28	0,19	0,05
400	-0,77	-0,90	-1,08	0,32	0,11	-0,20	-0,28	-0,41	0,21	0,04	0,08	-0,04	-0,11	0,19	0,04
450	-0,66	-0,75	-0,92	0,26	0,09	-0,04	-0,17	-0,35	0,31	0,06	0,08	-0,04	-0,11	0,19	0,05
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,28	0,22	0,16	0,13	0,04
550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla A1. 4. Temperaturas máximas, medias, mínimas, amplitud térmica y desviación típica de las temperaturas del terreno en los tres sondeos en 2011.

2011															
STS_1						STS_2					STS_3				
Prof.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.
2,5	8,31	-1,69	-10,73	19,04	3,51	12,18	-0,68	-6,29	18,47	2,31	7,97	-0,32	-4,76	12,73	1,79
5	8,00	-1,60	-10,40	18,40	3,40	9,43	-0,51	-5,91	15,34	2,11	6,30	-0,33	-4,60	10,91	1,67
10	5,47	-1,63	-9,94	15,41	3,13	6,62	-0,64	-5,82	12,44	1,90	4,47	-0,38	-4,40	8,87	1,50
20	2,65	-1,73	-8,95	11,60	2,63	3,92	-0,62	-5,11	9,03	1,61	2,36	-0,41	-3,94	6,29	1,25
40	0,16	-1,68	-7,76	7,92	2,18	0,39	-0,66	-3,69	4,08	1,15	0,12	-0,46	-2,84	2,96	0,90
80	-0,06	-1,65	-6,11	6,05	1,77	0,03	-0,56	-2,05	2,08	0,72	0,02	-0,45	-2,00	2,02	0,66
120	-0,27	-1,58	-4,73	4,46	1,47	-0,06	-0,58	-1,82	1,76	0,55	0,02	-0,38	-1,37	1,39	0,45
160	-0,34	-1,49	-4,12	3,77	1,28	-	-	-	-	-	-0,11	-0,40	-1,18	1,07	0,34
200	-0,38	-1,40	-3,46	3,09	1,06	-	-	-	-	-	-0,13	-0,37	-0,89	0,76	0,21
250	-0,51	-1,30	-2,84	2,33	0,82	-	-	-	-	-	-0,14	-0,33	-0,64	0,50	0,15
300	-0,62	-1,22	-2,37	1,76	0,58	-0,17	-0,45	-0,93	0,75	0,21	-0,14	-0,22	-0,39	0,25	0,09
350	-0,69	-1,03	-1,69	1,01	0,34	-0,11	-0,30	-0,55	0,44	0,13	-0,18	-0,19	-0,24	0,06	0,03
400	-0,58	-0,82	-1,21	0,63	0,22	-0,18	-0,28	-0,39	0,21	0,07	0,01	0,00	-0,18	0,19	0,04
450	-0,62	-0,79	-1,06	0,44	0,14	-0,12	-0,19	-0,25	0,13	0,05	0,08	0,02	-0,11	0,20	0,05
500	-	-	-	-	-	0,05	-0,02	-0,08	0,13	0,04	0,24	0,17	0,12	0,13	0,03
550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla A1. 5. Temperaturas máximas, medias, mínimas, amplitud térmica y desviación típica de las temperaturas del terreno en los tres sondeos en 2012.

2012															
STS_1						STS_2					STS_3				
Prof.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.
2,5	8,98	-2,05	-16,01	24,99	3,46	12,12	-0,95	-5,44	17,56	2,29	8,79	-0,67	-4,95	13,74	1,79
5	7,41	-2,07	-15,51	22,92	3,39	10,56	-0,93	-5,36	15,91	2,14	6,74	-0,74	-4,40	11,14	1,62
10	5,47	-1,93	-13,89	19,36	3,13	6,37	-0,97	-5,17	11,54	1,95	4,28	-0,69	-4,09	8,37	1,40
20	2,71	-1,96	-10,85	13,56	2,61	-	-	-	-	-	2,07	-0,70	-3,53	5,60	1,09
40	0,16	-2,08	-7,38	7,54	2,10	0,20	-0,95	-2,93	3,13	1,00	0,29	-0,53	-2,41	2,70	0,75
80	-	-	-	-	-	-0,05	-0,88	-2,13	2,08	0,79	0,01	-0,57	-1,81	1,82	0,58
120	-0,45	-1,87	-4,48	4,03	1,36	-0,14	-0,86	-1,84	1,70	0,64	-0,08	-0,53	-1,28	1,19	0,42
160	-0,53	-1,80	-3,87	3,33	1,17	-0,24	-0,86	-1,62	1,39	0,54	-0,06	-0,41	-0,95	0,88	0,32
200	-	-	-	-	-	-0,34	-0,78	-1,40	1,07	0,41	-0,24	-0,51	-0,87	0,63	0,22
250	-0,68	-1,67	-3,77	3,09	0,90	-0,36	-0,71	-1,24	0,88	0,33	-0,14	-0,34	-0,58	0,44	0,14
300	-0,78	-1,43	-2,29	1,51	0,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
350	-0,83	-1,22	-1,77	0,94	0,35	-0,36	-0,50	-0,82	0,46	0,13	-0,16	-0,19	-0,28	0,13	0,05
400	-0,67	-0,93	-1,36	0,69	0,23	-0,31	-0,42	-0,61	0,30	0,07	0,01	-0,09	-0,16	0,17	0,04
450	-0,82	-0,98	-1,32	0,50	0,16	-0,25	-0,30	-0,32	0,07	0,04	-0,04	-0,14	-0,16	0,11	0,04
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,17	0,07	0,04	0,13	0,03
550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla A1. 6. Temperaturas máximas, medias, mínimas, amplitud térmica y desviación típica de las temperaturas del terreno en los tres sondeos en 2013.

2013															
STS_1						STS_2					STS_3				
Prof.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.
2,5	10,65	-1,47	-8,08	18,73	2,94	6,98	-0,36	-4,02	11,00	1,49	11,17	-0,24	-6,84	18,02	1,76
5	9,81	-1,34	-7,81	17,62	2,84	6,29	-0,14	-3,77	10,06	1,43	9,32	-0,32	-5,87	15,19	1,48
10	7,67	-1,29	-7,42	15,09	2,65	4,67	-0,23	-3,75	8,42	1,32	4,47	-0,35	-4,09	8,56	1,21
20	2,90	-1,37	-6,50	9,40	2,20	4,67	-0,23	-3,75	8,42	1,32	2,11	-0,35	-3,31	5,41	0,99
40	0,22	-1,31	-5,37	5,59	1,76	0,20	-0,27	-2,25	2,45	0,68	0,12	-0,41	-2,65	2,77	0,75
80	-0,06	-1,34	-4,53	4,47	1,40	-0,05	-0,42	-1,75	1,70	0,49	-0,05	-0,40	-2,00	1,95	0,54
120	-0,20	-1,30	-3,79	3,58	1,13	-0,08	-0,41	-1,40	1,32	0,38	-0,11	-0,39	-1,43	1,32	0,38
160	-0,28	-1,24	-3,30	3,02	0,97	-0,22	-0,51	-1,16	0,94	0,27	-0,17	-0,39	-1,11	0,94	0,26
200	-0,38	-1,20	-2,89	2,52	0,79	-0,13	-0,39	-0,76	0,63	0,18	-0,20	-0,36	-0,83	0,63	0,16
250	-0,51	-1,18	-2,40	1,89	0,60	-0,16	-0,36	-0,72	0,57	0,16	-0,20	-0,31	-0,52	0,31	0,09
300	-0,68	-1,17	-2,00	1,32	0,41	-0,24	-0,42	-0,74	0,50	0,11	-0,20	-0,29	-0,33	0,13	0,04
350	-0,69	-1,05	-1,44	0,76	0,25	-0,11	-0,25	-0,49	0,38	0,09	-0,24	-0,25	-0,30	0,06	0,02
400	-0,64	-0,87	-1,21	0,57	0,17	-0,18	-0,27	-0,37	0,19	0,07	0,01	0,01	-0,05	0,06	0,00
450	-0,69	-0,90	-1,13	0,44	0,13	-0,12	-0,21	-0,25	0,13	0,04	0,02	-0,03	-0,04	0,06	0,02
500	-	-	-	-	-	0,02	-0,04	-0,04	0,06	0,02	0,18	0,12	0,06	0,13	0,02
550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla A1. 7. Temperaturas máximas, medias, mínimas, amplitud térmica y desviación típica de las temperaturas del terreno en los tres sondeos en 2014.

2014															
STS_1						STS_2					STS_3				
Prof.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.
2,5	7,27	-1,18	-5,42	12,68	1,81	6,33	-1,00	-3,86	10,19	1,35	12,35	-0,65	-6,65	18,99	1,39
5	6,73	-1,15	-4,98	11,71	1,78	-	-	-	-	-	6,94	-0,77	-5,85	12,79	1,13
10	5,22	-1,17	-5,95	11,16	1,78	3,27	-1,12	-3,78	7,06	1,23	2,51	-0,65	-4,28	6,79	0,87
20	2,02	-1,01	-4,26	6,29	1,38	1,44	-0,88	-3,02	4,47	1,04	0,44	-0,65	-2,52	2,96	0,76
40	-	-	-	-	-	0,07	-0,96	-2,49	2,56	0,90	0,23	-0,45	-1,97	2,20	0,66
80	-0,16	-0,86	-2,99	2,83	0,89	0,07	-0,76	-1,95	2,01	0,72	-	-	-	-	-
120	-0,45	-1,16	-2,59	2,14	0,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
160	-0,54	-1,17	-2,36	1,82	0,58	-0,07	-0,63	-1,45	1,38	0,50	-0,06	-0,36	-1,01	0,94	0,29
200	-	-	-	-	-	-0,17	-0,59	-1,24	1,07	0,40	-0,30	-0,48	-0,93	0,63	0,20
250	-	-	-	-	-	-0,28	-0,71	-1,24	0,96	0,31	-	-	-	-	-
300	-1,12	-1,20	-1,31	0,19	0,05	-0,21	-0,45	-0,84	0,63	0,23	-0,03	-0,13	-0,33	0,29	0,06
350	-0,83	-1,01	-1,21	0,38	0,13	-0,23	-0,47	-0,76	0,52	0,14	0,09	0,03	-0,30	0,39	0,09
400	-0,67	-0,81	-1,04	0,38	0,10	-0,07	-0,11	-0,25	0,19	0,07	0,01	-0,09	-0,16	0,17	0,04
450	-0,82	-0,92	-1,14	0,32	0,08	-0,10	-0,12	-0,29	0,19	0,04	-0,04	-0,16	-0,22	0,18	0,05
500	-	-	-	-	-	0,09	0,02	-0,10	0,19	0,04	0,12	0,06	-0,02	0,14	0,03
550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla A1. 8. Temperaturas máximas, medias, mínimas, amplitud térmica y desviación típica de las temperaturas del terreno en los tres sondeos en 2015.

2015															
STS_1						STS_2					STS_3				
Prof.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.
2,5	-	-	-	-	-	7,67	-2,24	-9,94	17,61	2,73	10,97	-2,03	-11,93	22,89	2,77
5	6,00	-2,18	-13,18	19,18	3,12	7,11	-1,96	-9,37	16,48	2,67	8,30	-1,88	-10,08	18,38	2,58
10	4,65	-1,95	-12,16	16,81	2,94	5,61	-2,05	-8,97	14,58	2,56	5,41	-2,08	-8,38	13,79	2,39
20	-	-	-	-	-	2,48	-1,92	-7,68	10,16	2,29	1,90	-1,86	-6,94	8,84	2,19
40	0,10	-1,88	-7,13	7,24	2,15	0,14	-1,92	-6,08	6,21	2,00	0,22	-1,69	-5,63	5,85	1,98
80	-0,06	-1,85	-5,03	4,97	1,72	-0,05	-1,90	-4,40	4,35	1,70	0,07	-1,57	-4,22	4,28	1,62
120	-0,12	-1,55	-4,27	4,15	1,42	-0,14	-1,77	-4,04	3,90	1,48	0,05	-1,33	-3,35	3,39	1,28
160	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,03	-1,15	-2,98	3,02	1,10
200	-0,68	-1,77	-3,83	3,15	1,04	-0,19	-1,41	-3,21	3,02	1,08	0,00	-0,98	-2,58	2,58	0,90
250	-	-	-	-	-	-0,38	-1,39	-2,96	2,58	0,93	-0,07	-0,80	-2,09	2,02	0,71
300	-0,60	-1,21	-2,36	1,76	0,58	-0,30	-1,07	-2,31	2,01	0,75	-0,12	-0,63	-1,62	1,51	0,51
350	-0,60	-0,97	-1,67	1,07	0,36	-0,17	-0,68	-1,55	1,38	0,52	-0,06	-0,35	-1,00	0,94	0,35
400	-0,78	-1,00	-1,48	0,69	0,24	-0,25	-0,53	-1,19	0,94	0,35	0,11	-0,03	-0,45	0,57	0,21
450	-0,85	-1,01	-1,35	0,50	0,16	-0,19	-0,39	-0,94	0,76	0,27	0,07	-0,05	-0,37	0,44	0,13
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla A1. 9. Temperaturas máximas, medias, mínimas, amplitud térmica y desviación típica de las temperaturas del terreno en los tres sondeos en 2016.

2016															
STS_1						STS_2					STS_3				
Prof.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.
2,5	9,52	-0,92	-9,34	18,86	2,58	0,32	-0,02	-0,44	0,76	0,07	16,95	-0,69	-11,97	28,91	2,91
5	8,37	-1,00	-8,72	17,09	2,48	5,41	-0,66	-3,94	9,35	1,47	12,78	-0,82	-9,28	22,06	2,42
10	6,73	-0,85	-7,38	14,10	2,29	3,78	-0,80	-3,91	7,68	1,35	8,80	-0,85	-6,80	15,60	1,94
20	2,82	-0,93	-6,22	9,04	1,75	1,51	-0,63	-3,34	4,84	1,09	3,80	-0,86	-5,76	9,57	1,57
40	-	-	-	-	-	0,01	-0,04	-0,30	0,31	0,09	0,12	-0,95	-4,54	4,66	1,26
80	-0,21	-1,11	-4,16	3,95	0,97	-0,06	-0,75	-2,51	2,46	0,68	-0,05	-0,95	-3,39	3,34	0,97
120	-0,44	-1,20	-3,47	3,03	0,76	-0,58	-0,73	-0,89	0,32	0,10	-0,11	-0,89	-2,76	2,65	0,74
160	-0,60	-1,23	-2,92	2,32	0,64	-0,26	-0,78	-1,95	1,70	0,45	-0,29	-0,91	-2,43	2,14	0,61
200	-0,44	-1,03	-2,32	1,89	0,53	-0,43	-0,84	-1,69	1,26	0,34	-0,32	-0,86	-2,08	1,76	0,47
250	-0,71	-1,15	-2,02	1,32	0,38	-0,68	-1,01	-1,69	1,01	0,27	-0,39	-0,78	-1,65	1,26	0,34
300	-0,79	-1,09	-1,61	0,82	0,24	-0,52	-0,79	-1,43	0,91	0,23	-0,39	-0,71	-1,27	0,88	0,24
350	-0,90	-1,12	-1,52	0,63	0,16	-0,69	-0,87	-1,26	0,57	0,14	-0,43	-0,64	-0,99	0,57	0,17
400	-0,69	-0,87	-1,35	0,66	0,15	-0,38	-0,53	-1,12	0,74	0,16	-0,18	-0,36	-0,56	0,38	0,11
450	-0,88	-1,00	-1,35	0,47	0,11	-0,35	-0,52	-0,94	0,59	0,12	-0,23	-0,34	-0,48	0,25	0,09
500	-	-	-	-	-	-0,07	-0,19	-0,32	0,25	0,06	-0,07	-0,16	-0,26	0,19	0,05
550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla A1. 10. Temperaturas máximas, medias, mínimas, amplitud térmica y desviación típica de las temperaturas del terreno en los tres sondeos en 2017.

2017															
STS_1						STS_2					STS_3				
Prof.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.	Max.	Media	Min.	Ampl.	Desv.
2,5	9,77	-1,97	-14,70	24,47	3,67	5,56	-1,12	-7,67	13,23	1,69	21,58	-0,39	-9,83	31,41	2,81
5	8,62	-1,07	-13,87	22,49	3,44	8,42	-0,61	-7,48	15,90	2,06	13,84	-0,27	-9,06	22,90	2,46
10	-	-	-	-	-	5,54	-0,46	-6,66	12,20	1,78	9,31	-0,39	-7,02	16,32	2,02
20	3,32	-1,17	-9,77	13,09	2,57	4,40	-0,56	-6,66	11,07	1,60	5,00	-0,27	-3,85	8,85	1,63
40	0,35	-1,50	-6,13	6,48	1,78	0,26	-0,86	-2,70	2,96	1,00	0,70	-0,51	-2,50	3,20	0,92
80	0,23	-1,20	-4,53	4,76	1,30	-0,06	-0,12	-0,18	0,13	0,03	-0,05	-0,12	-0,17	0,13	0,02
120	-0,14	-1,13	-3,54	3,40	1,03	0,04	-0,83	-1,91	1,95	0,67	0,02	-0,46	-1,42	1,45	0,50
160	-0,16	-1,04	-2,92	2,77	0,87	0,09	-0,56	-1,48	1,57	0,50	-0,08	-0,51	-1,27	1,20	0,41
200	-0,25	-0,99	-2,45	2,20	0,72	-0,10	-0,57	-1,35	1,26	0,40	-0,09	-0,41	-0,97	0,88	0,30
250	-0,39	-0,97	-2,02	1,64	0,54	-0,27	-0,60	-1,28	1,01	0,35	-0,32	-0,55	-1,01	0,69	0,20
300	-0,55	-0,95	-1,68	1,13	0,37	-0,52	-0,80	-1,29	0,77	0,24	-0,17	-0,37	-0,64	0,47	0,15
350	-0,56	-0,79	-1,19	0,63	0,22	-0,69	-0,73	-0,82	0,13	0,04	-0,05	-0,19	-0,62	0,57	0,18
400	-0,39	-0,59	-0,94	0,55	0,16	-0,38	-0,42	-0,51	0,13	0,03	-0,12	-0,19	-0,37	0,25	0,08
450	-0,56	-0,69	-1,01	0,45	0,13	-0,41	-0,45	-0,47	0,06	0,03	-0,06	-0,15	-0,42	0,36	0,11
500	-	-	-	-	-	-0,16	-0,27	-0,35	0,19	0,04	-0,20	-0,25	-0,26	0,06	0,02
550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

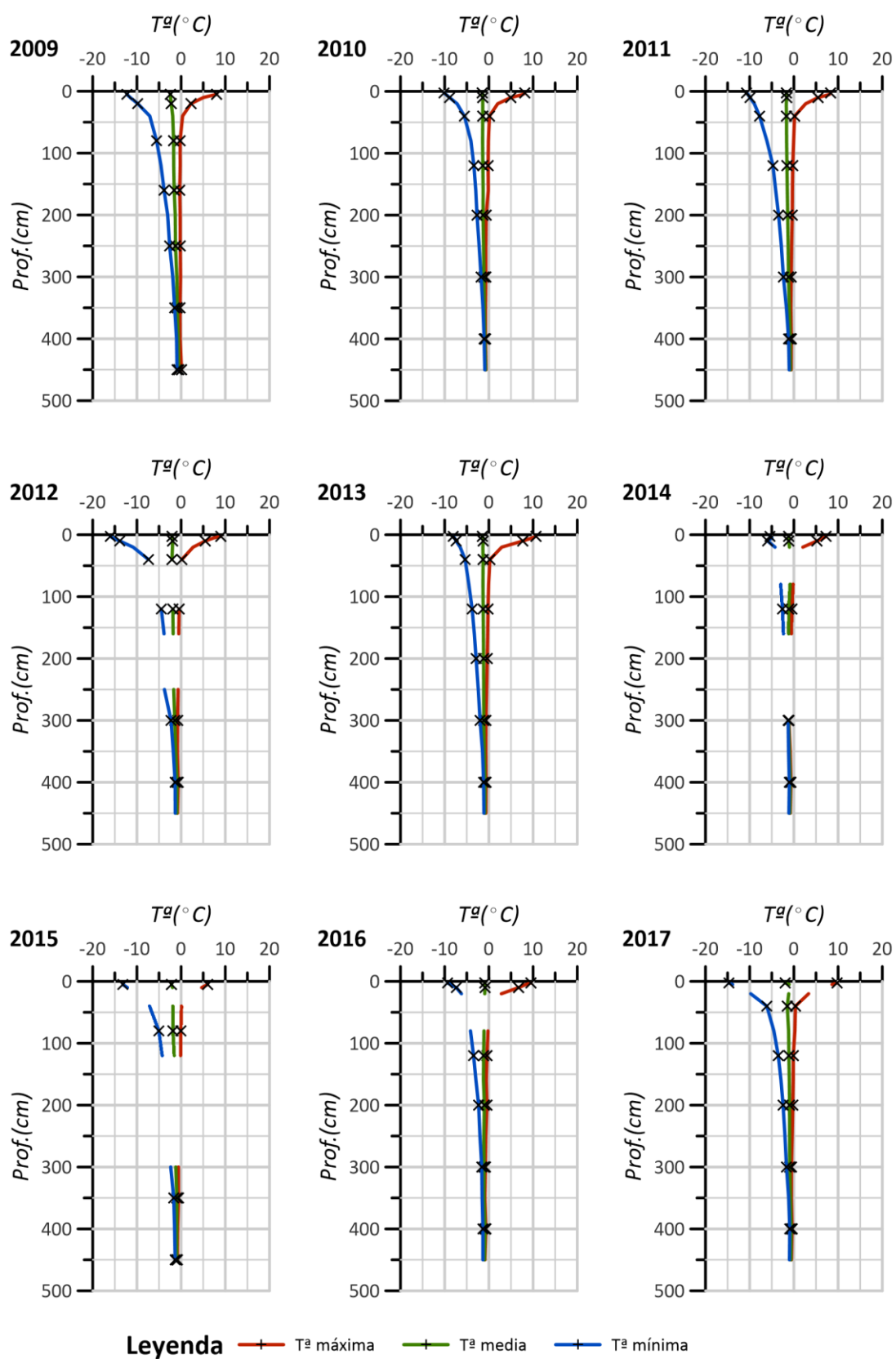


Figura A1. 5. Perfiles térmicos del sondeo STS_1 para cada año durante el periodo 2009-2017.

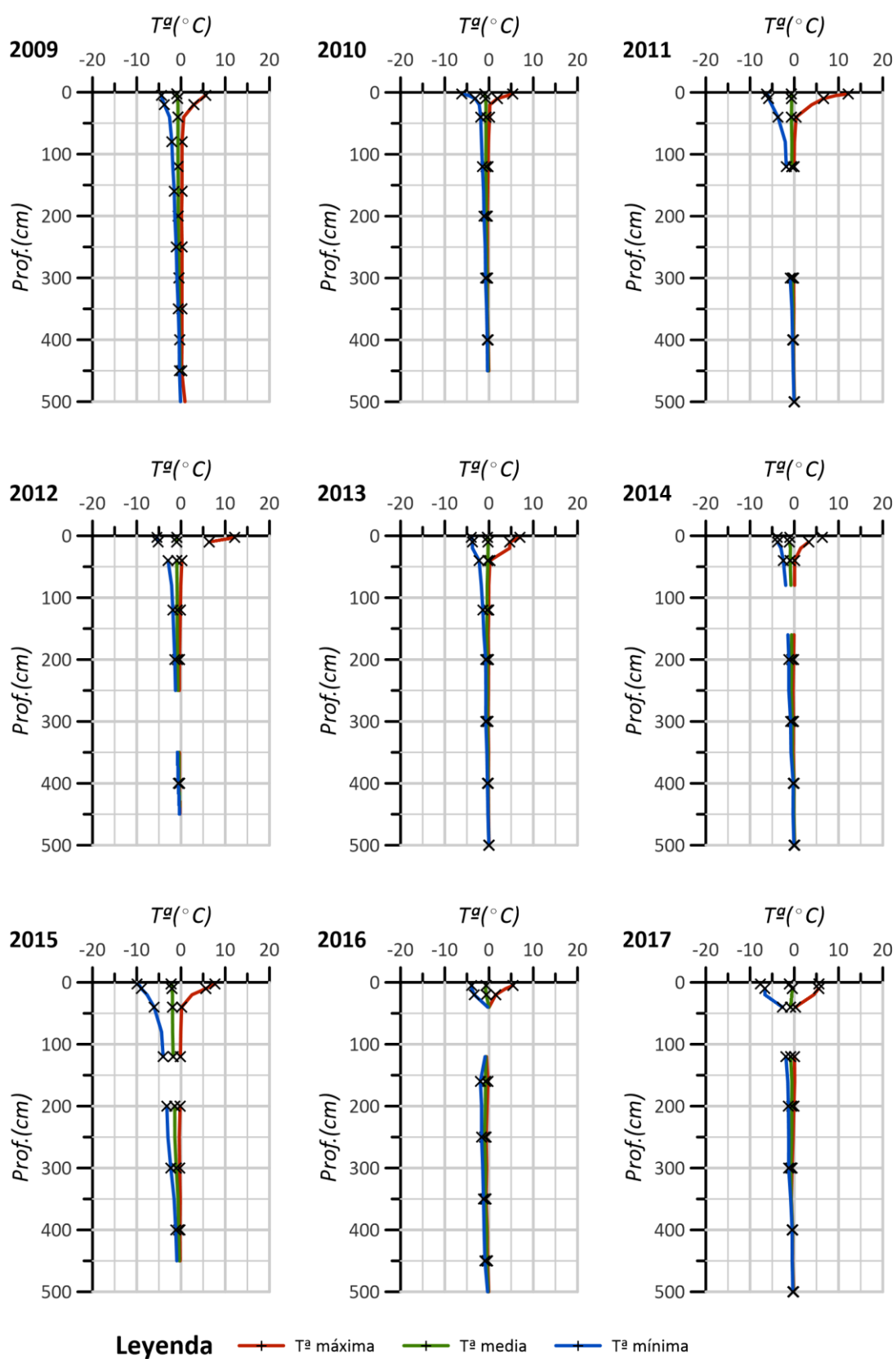


Figura A1. 6. Perfiles térmicos del sondeo STS_2 para cada año durante el periodo 2009-2017.

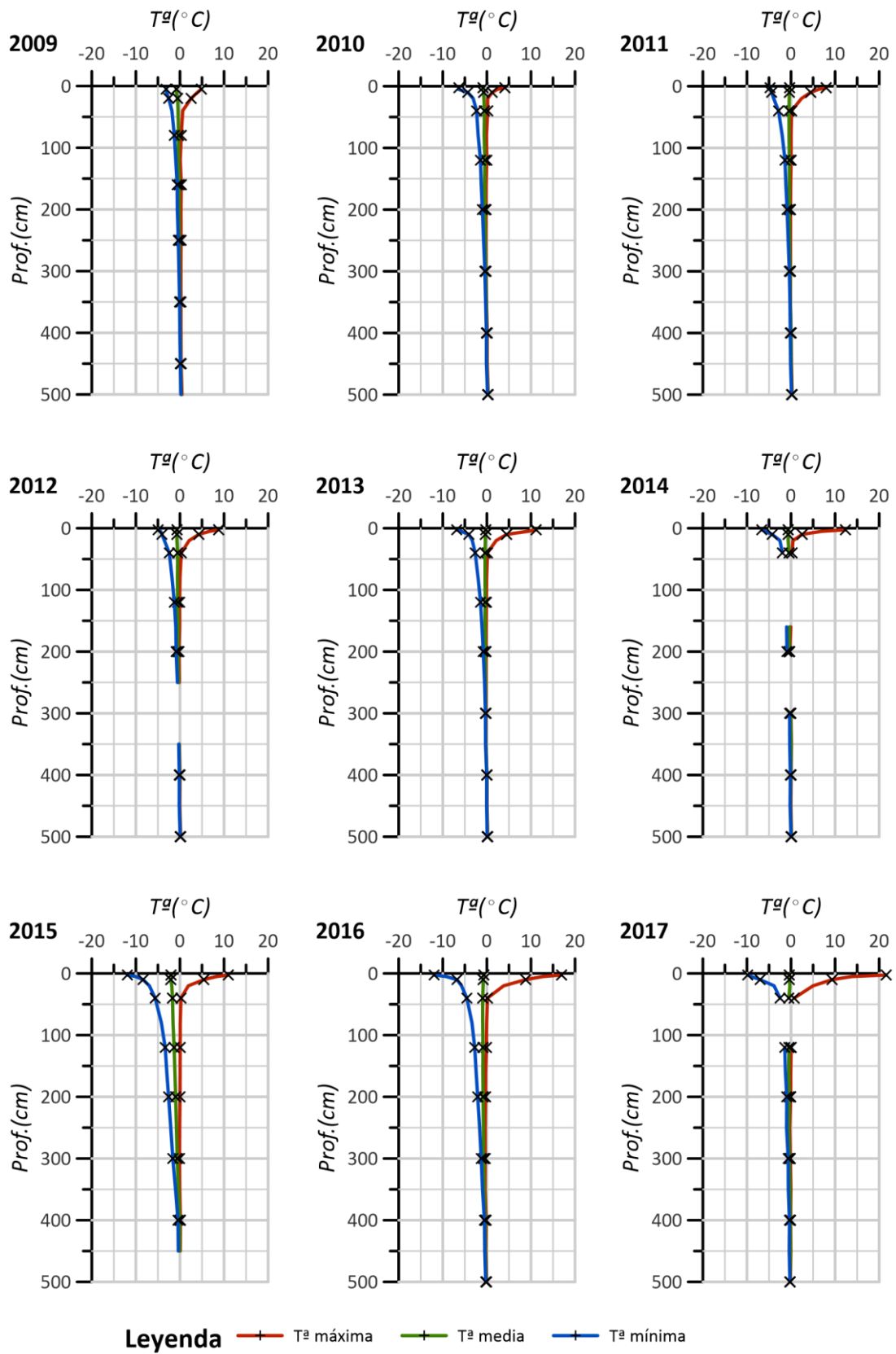


Figura A1. 7. Perfiles térmicos del sondeo STS_3 para cada año durante el periodo 2009-2017.

Tabla A1. 11. Profundidad de la amplitud térmica cero durante el periodo de estudio en los tres sondeos.

Año	STS_1	STS_2	STS_3
2009	-	450	300
2010	400	250	250
2011	450	350	250
2012	450	350	250
2013	450	300	250
2014	300	400	300
2015	450	-	450
2016	450	500	400
2017	450	350	400

Tabla A1. 12. Evolución de la profundidad del techo del permafrost (o espesor de la capa activa) en los tres sondeos durante el periodo de estudio.

Año	STS_1	STS_2	STS_3
2009	40	80	80
2010	40	20	20
2011	40	40	40
2012	40	40	40
2013	40	40	40
2014	80	40	20
2015	40	40	40
2016	80	40	40
2017	40	40	80

Tabla A1. 13. Evolución de los offset superficial y térmico de los tres sondeos durante el periodo de estudio.

Año	STS_1		STS_2		STS_3	
	Offset térmico	Offset superficial	Offset térmico	Offset superficial	Offset térmico	Offset superficial
2009	-2,428	-	-1,386	-	-0,800	-
2010	-1,321	0,733	-0,871	1,183	-0,772	1,281
2011	-1,604	1,881	-0,506	2,979	-0,328	3,158
2012	-2,074	1,272	-0,930	2,416	-0,743	2,603
2013	-1,340	1,383	-0,140	2,584	-0,320	2,404
2014	-1,153	1,583	-1,004	3,096	-0,751	1,984
2015	-2,184	1,028	-1,964	1,248	-1,879	1,333
2016	-1,005	1,017	-0,660	1,362	-0,818	1,204
2017	-1,067	-	-0,606	-	-0,275	-

Tabla A1. 14. Índice de congelación y descongelación del sondeo STS_1 durante el periodo de estudio.

Medida	Alt./prof.	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Índice de congelación (FDD)										
Aire	160	-	-760	-1257	-1159	-1107	-969	-1259	-766	-
Suelo	-2,5	-	-639	-843	-916	-702	-517	-	-469	-872
	-5	-940	-621	-810	-919	-664	-499	-845	-477	-728
	-10	-902	-599	-775	-853	-630	-514	-803	-456	-
	-20	-803	-532	-711	-793	-585	-414	-	-394	-627
	-40	-658	-496	-621	-758	-504	-	-688	-	-515
	-80	-571	-506	-599	-	-488	-224	-674	-400	-456
	-120	-557	-489	-572	-682	-471	-422	-565	-433	-425
	-160	-521	-465	-541	-654	-451	-427	-	-422	-387
	-200	-443	-472	-509	-	-437	-376	-645	-371	-367
	-250	-424	-436	-471	-610	-428	-	-	-393	-355
	-300	-324	-400	-443	-522	-424	-	-442	-394	-345
	-350	-295	-365	-374	-446	-381	-369	-351	-338	-243
	-400	-215	-324	-296	-338	-316	-296	-365	-313	-214
	-450	-179	-269	-288	-357	-327	-336	-368	-361	-251
	-500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-550	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Índice de descongelación (TDD)										
Aire	160	-	72	106	62	118	37	92	76	-
Suelo	-2,5	-	129	233	171	168	86	-	156	219
	-5	135	164	231	167	179	81	95	134	273
	-10	105	116	187	154	163	88	94	148	-
	-20	60	45	86	83	89	48	-	75	154
	-40	26	6	13	4	29	-	6	-	20
	-80	5	0	0	-	0	0	0	0	0
	-120	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-160	0	0	0	0	0	0	-	0	0
	-200	0	0	0	-	0	0	0	0	0
	-250	0	0	0	0	0	-	-	0	0
	-300	0	0	0	0	0	-	0	0	0
	-350	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-400	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-450	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-550	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla A1. 15. Índice de congelación y descongelación del sondeo STS_2 durante el periodo de estudio.

Medida	Alt./prof.	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Índice de congelación (FDD)										
Aire	160	-	-760	-1257	-1159	-1107	-969	-1259	-766	-
Suelo	-2,5	-	-372	-421	-500	-235	-419	-878	-	-412
	-5	-550	-353	-361	-490	-196	-	-802	-307	-403
	-10	-533	-302	-357	-488	-196	-439	-804	-331	-343
	-20	-473	-258	-311	-345	-196	-349	-742	-260	-342
	-40	-335	-246	-267	-356	-134	-350	-713	-1	-288
	-80	-289	-246	-208	-320	-151	-284	-692	-269	-7
	-120	-269	-245	-210	-311	-151	-	-643	-15	-260
	-160	-216	-224	-18	-279	-184	-230	-	-267	-203
	-200	-227	-231	-22	-254	-141	-216	-513	-305	-209
	-250	-150	-201	-20	-229	-131	-259	-506	-259	-188
	-300	-145	-167	-166	-19	-152	-163	-390	-288	-291
	-350	-86	-149	-111	-182	-90	-171	-246	-317	-39
	-400	-60	-102	-104	-152	-97	-40	-194	-191	-23
	-450	-47	-61	-69	-31	-75	-45	-140	-190	-24
	-500	-8	-2	-8	-1	-15	-4	-	-66	-98
	-550	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Índice de descongelación (TDD)										
Aire	160	-	72	106	62	118	37	92	76	-
Suelo	-2,5	-	46	176	157	103	54	63	-	67
	-5	91	47	179	155	146	-	89	69	182
	-10	89	34	126	138	112	32	60	42	175
	-20	70	11	87	95	112	30	45	33	137
	-40	34	1	25	12	35	2	15	0	20
	-80	16	0	3	0	0	7	0	0	0
	-120	3	0	0	0	0	-	0	0	0
	-160	2	0	0	0	0	0	-	0	0
	-200	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-250	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	-300	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	-350	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	-400	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	-450	4	0	0	0	0	0	0	0	0
	-500	19	0	2	0	1	11	-	0	0
	-550	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla A1. 16. Índice de congelación y descongelación del sondeo STS_3 durante el periodo de estudio.

Medida	Alt./prof.	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Índice de congelación (FDD)										
Aire	160	-	-760	-1257	-1159	-1107	-969	-1259	-766	-
Suelo	-2,5	-	-331	-270	-382	-259	-306	-828	-473	-433
	-5	-355	-307	-259	-383	-239	-319	-767	-444	-369
	-10	-341	-279	-248	-344	-213	-257	-787	-399	-354
	-20	-259	-252	-221	-307	-184	-242	-704	-360	-282
	-40	-189	-212	-182	-221	-162	-182	-642	-351	-229
	-80	-143	-221	-163	-209	-147	-5	-578	-343	-7
	-120	-133	-161	-136	-194	-140	-11	-487	-322	-170
	-160	-77	-187	-142	-151	-141	-130	-420	-330	-187
	-200	-68	-158	-132	-185	-132	-173	-357	-312	-149
	-250	-45	-133	-116	-122	-114	-10	-292	-283	-201
	-300	-31	-101	-76	-12	-105	-50	-231	-259	-133
	-350	-14	-47	-68	-69	-91	-9	-126	-233	-71
	-400	-3	-17	-4	-33	-	-31	-38	-129	-69
	-450	0	-16	-4	-52	-13	-55	-22	-123	-54
	-500	0	0	0	0	0	0	-	-56	-15
	-550	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Índice de descongelación (TDD)										
Aire	160	-	72	106	62	118	37	92	76	-
Suelo	-2,5	-	38	158	138	170	75	88	225	289
	-5	90	35	143	113	123	45	81	149	269
	-10	82	21	115	94	88	26	28	93	211
	-20	80	15	75	52	57	11	26	51	186
	-40	44	15	20	29	13	23	27	8	43
	-80	32	0	2	2	0	0	5	0	0
	-120	9	0	0	0	0	0	1	0	3
	-160	27	0	0	0	0	0	2	0	0
	-200	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	-250	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	-300	5	0	0	0	0	0	0	0	0
	-350	11	0	0	0	0	20	0	0	0
	-400	17	1	4	0	-	1	26	0	0
	-450	48	2	12	0	1	0	5	0	0
	-500	93	79	61	26	45	21	-	0	0
	-550	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla A1. 17. Duración en días de los periodos de congelación (C) y descongelación (D) de los tres sondeos durante el periodo de estudio.

Sondeo	2009		2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017	
	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D
STS_1	249	131	198	212	140	154	267	131	193	135	288	89	252	128	207	197	171	-
STS_2	237	123	256	168	115	233	214	179	110	211	211	157	197	131	206	217	164	-
STS_3	192	198	159	215	111	232	213	159	120	221	223	145	193	126	183	251	155	-

Tabla A1. 18. Factor n de congelación y descongelación de los tres sondeos durante el periodo de estudio.

	Factor	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
STS_1	n_f	-	0,817	0,645	0,793	0,600	0,515	0,671	0,622	-
	n_t	-	1,611	1,767	2,497	1,390	2,403	1,025	1,943	-
STS_2	n_f	-	0,464	0,287	0,423	0,177	0,432	0,637	0,401	-
	n_t	-	0,650	1,686	2,504	1,238	0,219	0,963	0,909	-
STS_3	n_f	-	0,404	0,206	0,331	0,216	0,329	0,609	0,580	-
	n_t	-	0,484	1,352	1,834	1,047	1,240	0,880	1,962	-