

VICTOR HUGO SOTO MOLINA, HUGO DELGADO GRANADOS

Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México

## *Comparación de distintos métodos de instalación de mini data loggers en suelo de alta montaña; una contribución al estudio del ambiente periglacial*

### RESUMEN

El empleo de mini *data loggers* para el estudio del régimen térmico del suelo en ambientes periglaciares representa una variante práctica y económica. Sin embargo, la colocación de estos sensores en contacto directo con el interior del suelo provoca un alto índice de pérdida de los mismos como resultado de diversos procesos geomorfológicos y por la acción cementante del suelo congelado; por ello, resulta común el empleo de alternativas de instalación para protegerlos del entorno. En este trabajo cuestionamos la igualdad cuantitativa de los registros de temperatura entre los métodos alternos de instalación más comunes, comparados contra el método del contacto directo con el suelo. El objetivo ha sido identificar el método que arroja datos más cercanos a los valores reales.

### RÉSUMÉ

*Comparaison de différentes méthodes d'installation de mini data loggers en sols de haute montagne; une contribution à l'étude de l'environnement périglaciaire.*- L'utilisation de mini-enregistreurs de données pour l'étude du régime thermique du sol en milieu périglaciaire représente une variante pratique et économique. Cependant, la mise en contact direct de ces capteurs avec l'intérieur du sol entraîne un taux élevé de perte en conséquence de divers processus géomorphologiques et de l'action de cimentation du sol gelé; Par conséquent, il est courant d'utiliser des alternatives d'installation pour les protéger de l'environnement. Dans ce travail, nous questionnons l'égalité quantitative des enregistrements de température parmi les méthodes d'installation al-

ternatives les plus courantes, par rapport à la méthode du contact direct avec le sol. L'objectif était d'identifier la méthode qui fournit les données les plus proches des valeurs réelles.

### ABSTRACT

*Comparison of different methods of installing mini data loggers in high mountain ground; a contribution to the study of the periglacial environment.* - The use of mini data loggers to study the thermal regime of the soil in periglacial environments represents a practical and economical variant. However, the placement of these sensors in direct contact with the interior of the soil causes a high rate of loss as a result of various geomorphological processes and the cementing action of the frozen soil; Therefore, it is common to use installation alternatives to protect them from the environment. In this paper we question the quantitative equality of temperature records among the most common alternate installation methods, compared against the method of direct contact with the ground. The objective has been to identify the method that offers data closest to the real values.

### PALABRAS CLAVE/MOTS CLÉ/KEYWORDS

Temperatura del suelo, mini *data loggers*, periglacial, permafrost, regresión lineal.  
Température du sol, mini data loggers, périglaciaire, pergélisol, régression linéaire.  
Ground temperature, mini data loggers, periglacial, permafrost, linear regression.

## I. INTRODUCCIÓN

Las condiciones de temperatura en los primeros metros del subsuelo son elementales en el estudio de la geocriología, la cual estudia la superficie terrestre que se encuentra por debajo de los 0°C y se ocupa del ambiente y la ecología de las regiones frías, así como de los procesos relacionados con el ciclo de congelamiento y deshielo, con el permafrost, y a la vez estos con las actividades humanas (TROMBOTTO y otros, 2014); por lo que se le

conoce como periglacial a ese entorno frío no glaciar y a los procesos que en él se generan, considerando al permafrost como un elemento central, aunque su presencia no sea estrictamente necesaria (FRENCH, 2007). De acuerdo con este autor, se define como permafrost al suelo y roca que permanecen en 0°C o por debajo de esta temperatura por lo menos durante dos años continuos.

La investigación del permafrost es relativamente nueva en latitudes medias y más aún en regiones tropicales. Su estudio científico se inició a mediados del siglo XIX

(HEGINBOTTOM y otros, 2012); sin embargo, con posterioridad a 1970 el permafrost en montañas de latitud media comenzó a ser estudiado de manera sistemática (HAEBERLI y otros, 2010; SCHROTT y otros, 2012). A partir de 1990 se han desarrollado diversos métodos empírico-estadísticos para determinar su variación espacial mediante el empleo de nuevas tecnologías (ETZELMÜLLER y otros, 2001; SHENG y otros, 2009) y modelos topo-climáticos (SCHROTT y otros, 2012). Hasta hace menos de dos décadas, mediante el empleo de registradores autónomos de temperatura (*data loggers*), los datos del suelo han formado una red de información cada vez más completa (SANTOS GONZÁLEZ, 2010). Debido a los riesgos geológicos que ocasiona su degradación en laderas, recientemente ha crecido el interés por el estudio del permafrost de montaña (HAEBERLI y otros, 2006; ETZELMÜLLER y FRAUENFELDER, 2009; AVIAN y otros, 2009), lo cual ha supuesto grandes avances durante la última década (FRENCH, 2007).

Para determinar su presencia existen métodos indirectos y directos. Los indirectos se basan en la identificación de ciertos procesos o geoformas que no siempre garantizan la presencia de hielo en su interior, por lo que resultan menos confiables. Dentro de los métodos directos están las excavaciones y la extracción de núcleos, así como el registro de temperaturas del suelo a distinta profundidad (ETZELMÜLLER y otros, 2001) ya que están estrictamente asociados al régimen térmico del suelo (HEGINBOTTOM y otros, 2012); adicionalmente, los datos de temperatura brindan una idea más precisa sobre su estado de conservación (SERRANO y otros, 2009), tanto en regiones circumpolares (MATSUOKA y otros, 1990; MATSUOKA, 2011) como en montañas de latitudes medias (HAEBERLI, y otros, 2006; GRUBER y HAEBERLI, 2009).

Basándose en las condiciones térmicas del suelo, existen en el mercado diversos tipos de dispositivos para la lectura y el almacenamiento de los datos, algunos más complejos que otros, como micro-estaciones con paneles solares para garantizar series de datos largas e ininterrumpidas; un ejemplo de estas lo encontramos con Kim y otros (2005). Su desventaja, más allá del alto coste financiero que representa, radica en que se requiere de constante vigilancia o una protección robusta que impida el vandalismo. Existen también sensores autónomos más sencillos y discretos con una termosonda externa. Su ventaja está dada por un menor precio y tamaño, aunque se requieren varias unidades según las profundidades que se quieran analizar, y para evitar que el dispositivo de almacenamiento sea dañado por factores naturales o humanos, es necesario protegerlo; por lo que si se emplean más de dos unidades para monitorear un solo perfil, se necesita

comúnmente un contenedor de mediano tamaño, el cual por sus dimensiones podría atraer la atención de la gente, exponiéndose con esto a la posible pérdida de todos los dispositivos. Por lo anterior, entre los métodos más prácticos, sencillos y económicos está el empleo mini *data loggers* con sensor de temperatura interno (ETZELMÜLLER, 2013), que, por sus características de tamaño y su bajo coste, han sido empleados en diversas regiones de alta montaña en Europa y América Latina, siendo los trabajos de Janke y otros (2011) y Trombotto (2007) ejemplos respectivos de lo anterior. Su bajo precio y tamaño de apenas 2-5 cm por lado en promedio, permiten ser distribuidos para cubrir amplias áreas de estudio, así como en distintas condiciones topográficas (HOELZLE y otros, 1999) como el de las montañas (TELES-VIEIRA y otros, 2000). A su vez, la resistencia de sus materiales (HOELZLE y otros, 1999) les permite ser colocados directamente en el subsuelo sin que la humedad y el peso del suelo por encima de ellos les afecten; no obstante, debido a su tamaño y a la cementación ocasionada por el hielo estacional o permanente del suelo, su extracción puede resultar infructuosa, ocasionando con esto la posible pérdida de los dispositivos y de las series de datos almacenados.

Existen diversos trabajos con mini *data loggers* para la obtención de temperaturas del suelo a distintas profundidades; al mismo tiempo, con la finalidad de evitar su pérdida, son variadas las condiciones para la instalación de los mismos. Algunos investigadores realizan su colocación directamente en contacto con el suelo o roca, lo que supone un registro de temperatura más fiel a la realidad, aunque con el riesgo de pérdida que esto conlleva; entre ellos: Guglielmin y otros (2003), Hoelzle y otros (2003), Hanson y Hoelzle (2005), Isaksen y otros (2008), Janke y otros (2011), Hipp y otros (2014). Otros, con la finalidad de protegerlos y lograr una fácil extracción, los introducen en tubos de PVC totalmente sellados para prevenir la infiltración de humedad y aire; entre ellos están: Trombotto (2007), Abramov y otros (2008), Osterkamp y Jorgenson (2009), Goyanes y otros (2014); este método es sugerido en el *Manual para el monitoreo y para presentación de informes sobre mediciones de permafrost* de la Asociación Internacional de Permafrost (IPA, 2008). Una variante del método anterior es utilizada por Trombotto y Barzotta (2009), quienes realizan perforaciones de 1 cm de diámetro a la altura de cada sensor para lograr una mayor interacción con el suelo. Por su parte, el *Manual sobre métodos periglaciares de campo* del IPA (HUMMUM y MATSUOKA, 2004) recomienda protegerlos de manera individual dentro de pequeños contenedores plásticos, sin especificar las dimensiones ni caracterís-

ticas del material del que deban estar fabricados. Con respecto a este último caso, algunos investigadores optan por el empleo de *data loggers* como los tipo Hanna HI141BH, cuyos datos pueden no verse afectados por contar con una sonda externa; no obstante, un perfil de suelo con más de tres sensores obliga a protegerlos en el interior de un contenedor de regular tamaño, el cual a su vez debe ser ocultado de la vista de curiosos para evitar su pérdida. El uso de este tipo de sensores lo documentan Ruiz-Fernández y otros, (2017).

En la mayoría de los trabajos sobre el régimen térmico del suelo se limitan a señalar las profundidades en las que son colocados los sensores sin mencionar las características técnicas de los mismos ni el sistema de instalación que emplean. No se menciona la justificación en el empleo de uno u otro método y no se hace referencia a la probable existencia de variaciones en las lecturas entre las distintas opciones de colocación. Tampoco se ha encontrado dentro de la literatura algún estudio comparativo que analice las posibles diferencias de temperatura que pudieran existir al colocar sensores de similares características entre un sistema de instalación y otro, lo que podría significar diferencias importantes a la hora de interpretar los datos.

Por lo señalado anteriormente, el objetivo de este trabajo consiste en identificar las posibles diferencias de temperaturas que son registradas mediante el empleo de mini *data loggers* de idénticas características, todas realizadas en el mismo sitio, a la misma hora, en igualdad de períodos de tiempo pero bajo cuatro distintos métodos de instalación. Se espera, por lo tanto, que este análisis contribuya en trabajos posteriores donde el tema de la temperatura del subsuelo, especialmente aquellos que están sujetos a cierto grado de congelamiento ya sea estacional o permanente, sea tema central para el estudio de los ecosistemas de alta montaña y los ambientes periglaciares.

## II. CONTEXTO GENERAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL SUELO

La superficie del suelo absorbe energía proveniente de la radiación solar, y a su vez este emite parte de esa energía en forma radiativa, por convección y por conducción, siendo este último el principal medio de transferencia en la litósfera terrestre (CLAUSER y HUEGNES, 1995; ARYA, 2001). Su temperatura superficial está condicionada principalmente por el balance de energía entre este y la parte baja de la capa límite atmosférica, el cual a su vez es función del balance de radiación, intercambio de humedad y la presencia de vegetación; en menor medida

influye la textura del suelo. Asimismo, estas condiciones térmicas de la superficie rigen la temperatura del aire en los primeros metros de la capa límite planetaria (ARYA, 2001; FOKEN, 2008) creando una buena correlación térmica aire-suelo (ISLAM y otros, 2015). La temperatura del suelo varía en profundidad. Durante el año la interface suelo-atmósfera experimenta un mayor rango de oscilación térmica diaria que puede llegar a ser de hasta 50 °C en regiones desérticas y libres de nubosidad; conforme aumenta la profundidad disminuye la temperatura así como su rango de amplitud y puede quedar casi constante a profundidades de entre 10 y 15 metros (ARYA, 2001; ANDÚJAR-MÁRQUEZ y otros, 2016; CERMAK y BODRI, 2016). A partir de este límite el calor geotérmico incrementa la temperatura en el orden de ~3 °C/100 metros de profundidad (ANDÚJAR-MÁRQUEZ y otros, 2016). La diferencia en la capacidad calórica existente entre el aire y el suelo, así como la profundidad condicionan que este último experimente cambios en su temperatura mucho menores que los del aire a través del tiempo; por esta razón ocurre un retardo diario y estacional en su temperatura conforme aumenta la profundidad.

El flujo de calor en el suelo se basa principalmente en la transferencia molecular y a su vez es proporcional al gradiente térmico; por esta razón durante el día solo unas decenas de centímetros superficiales son calentados; asimismo, la capa superficial posee mayor temperatura durante el verano (FOKEN, 2008). En regiones de alta montaña donde la superficie está en contacto con una capa más delgada de aire, esta no permite conservar el calor obtenido por la radiación solar por lo que la energía escapará más fácilmente que a nivel del mar y ocurrirá un enfriamiento de su superficie (BARRY y CHORLEY, 2003).

Para el caso de la transferencia de calor por conducción, condicionado por la diferencia de temperatura entre medios sólidos hasta alcanzar en lo posible un estado de equilibrio térmico (MARTÍN-DOMINGO, 2015), está dado por la expresión:

$$Q_k \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Donde  $Q_k$  es el calor transmitido,  $A$  es la superficie y  $\frac{\Delta T}{\Delta x}$  es el gradiente de temperatura  $T$ , en el flujo de calor  $x$ . Sin embargo, resulta necesario señalar la capacidad conductiva de los cuerpos en estudio, a lo que la ley de Fourier señala:

$$Q_k = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

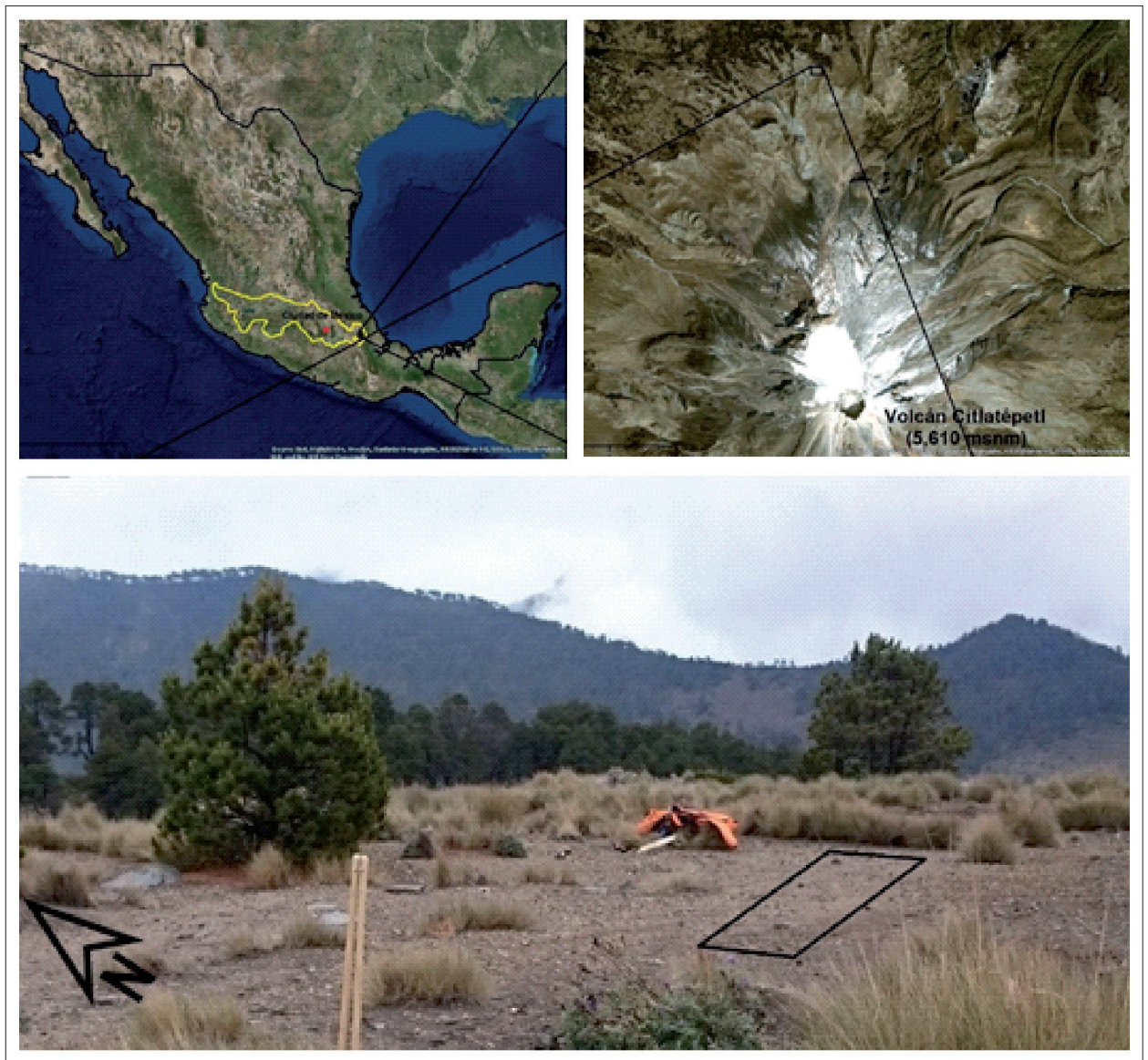


FIG. 1. Localización del área de estudio en la franja Transvolcánica Mexicana, arriba a la izquierda, donde se encuentra en su extremo oriental el volcán Citlaltépetl, a la derecha. Abajo, ubicación de perforaciones y registro de temperaturas en su vertiente norte. Fuente: imágenes de Google Earth y fotografía de los autores.

Donde  $k$  representa la conductividad térmica (SERWAY, 1997) del medio en el que se traslada el flujo de energía, sea en extremos de un mismo cuerpo o por contacto directo con otros (MARTÍN-DOMINGO, 2015). Cuando no existe un contacto directo entre dos cuerpos sólidos para transferir energía calorífica entre sí, y si se antepone entre ellos un fluido, por ejemplo el aire, interviene la ley de enfriamiento de Newton (BARRAGÁN, 2009) que se expresa como:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = -k(T - T_A) \quad (3)$$

Donde  $T_A$  representa la temperatura del ambiente. No obstante, este ejercicio no pretende discutir el comportamiento físico del flujo de energía calorífica a través de los medios con los que interactúa, sino que se trata de un análisis comparativo de los registros de temperatura para todos los casos previamente indicados con la finalidad de

encontrar alguna diferencia significativa entre ellos mediante la *praxis* y destacar la opción más viable a la hora de colocar mini *data loggers* para la temperatura de un perfil de suelo sujeto a cierto grado de actividad periglacial.

### III. MATERIAL Y MÉTODOS

El objetivo principal de este estudio consistió en comparar tres métodos alternos de instalación de sensores contra el método del contacto directo con el sustrato, el cual, como se comentó previamente, ofrece registros más reales debido a que no existe ningún medio que intervenga entre el suelo y los sensores.

Los sensores empleados fueron del modelo Hobo Pendant® UA-001-64 del fabricante Onset, con una precisión de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  completamente nuevos y con carga de batería al 100 %; cada uno de ellos fue calibrado desde fábrica. El empleo de mini sensores con estas características de precisión ha sido realizado exitosamente por Hipp y otros (2012) para registro de temperatura de aire, base nival y de temperatura del subsuelo; del mismo modo, Karunaratne y Burn (2004) los emplean para el aire y suelo. Más concretamente, el modelo de sensor utilizado para este ejercicio ha sido empleado también para distintos estudios medioambientales: Goulsbra y otros (2009), Núñez-Cruz y Bonfil (2013), Sanusi y Ahmad-Zamri (2014), Benvenuti y Pardossi (2016) entre otros.

Para realizar las mediciones comparativas se eligió el límite superior de la línea continua de bosque a 4,050 metros sobre el nivel del mar (msnm) en la ladera norte del volcán Citlaltépetl (México), con coordenadas  $\phi$   $19^{\circ}04.346'$  N y  $\lambda$   $97^{\circ}16.491'$  O (figura 1). El Citlaltépetl es un estratovolcán cuaternario en el que se diferencian, al menos, tres etapas en su evolución. La primera de ellas, conocida como Torrecillas, dio inicio con su formación hace  $\sim 650.000$  años; la segunda, llamada Espolón de Oro, se desarrolló al norte de los remanentes de Torrecillas hace  $\sim 210.000$  años. Finalmente, el cráter actual se formó a partir de los restos del Espolón de Oro 16.500 años atrás (MACÍAS, 2005). Es considerado un volcán activo pero en fase de reposo; su periodo de actividad más reciente ocurrió a finales del siglo XVII (MACÍAS, 2007). Pertenece a la franja Transvolcánica Mexicana en su extremo oriental y posee una altitud de 5,610 msnm, por lo que representa la cumbre más alta del país (INEGI, 2007) y la tercera de Norteamérica. A lo largo de sus distintas fases eruptivas ha cubierto sus laderas con depósitos piroclásticos y flujos de lava; estos flujos son en su mayoría dacita y andesita (CARRASCO-



FIG. 2. Granulometría al interior de los perfiles de suelo.

NÚÑEZ, 2000). La vertiente norte, donde se realizaron las mediciones para este trabajo, cuenta con dos de los más importantes en cuanto a tamaño y cronología: el flujo de dacita y andesita de Jamapa y el de andesita del Paso del Buey. El primero, con un espesor de 400 m y una edad calculada en  $\sim 400.000$  años, es producto de la primera fase de formación (MACÍAS, 2005). El segundo flujo pertenece a la segunda etapa de evolución (MACÍAS, 2005); posee 80 m de grosor y una edad estimada entre 210.000 y 40.000 años (CARRASCO-NÚÑEZ, 2000). El área de estudio se encuentra rodeada por estas coladas de lava aproximadamente en la parte central; en ella existen depósitos sobrepuestos de materiales medianamente compactados. De acuerdo con Macías (2005), en esta región existen al menos 10 capas de caída de ceniza fina y pómez que están intercaladas con 4 flujos y oleadas piroclásticas; Carrasco-Núñez y Rose (1995) les

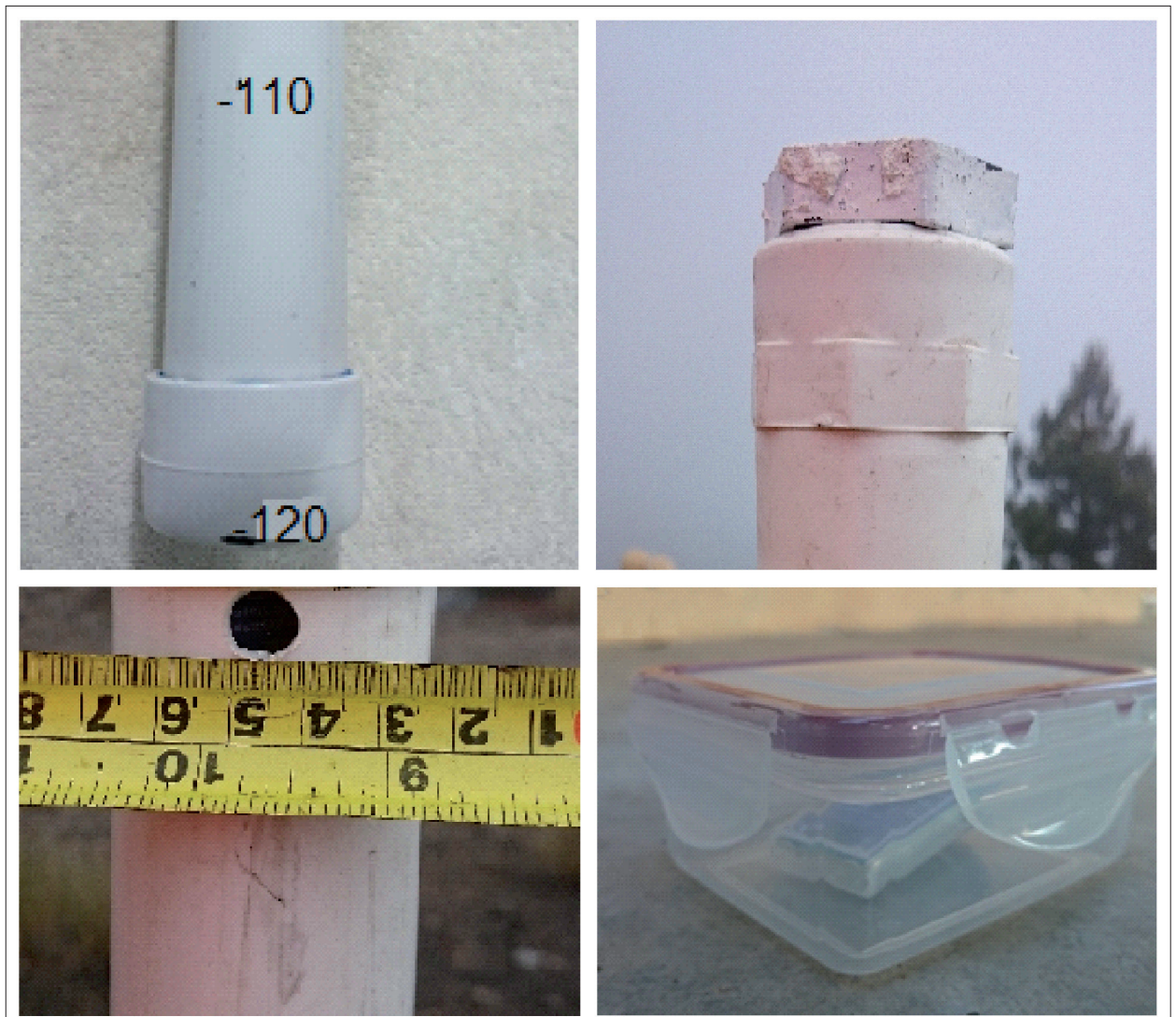


FIG. 3. Detalles de tubos y contenedores. Arriba, a la izquierda, el sello inferior; a la derecha, la tapa roscada de cada tubo. Abajo, las dimensiones de cada perforación en el tubo correspondiente y uno de los contenedores individuales con un sensor en su interior.

asignaron una antigüedad de ~9.000 años. El sitio donde se realizaron las perforaciones está cubierto de ceniza volcánica que se encuentra por encima de flujos piroclásticos y escoria (ROSSOTTI y otros, 2006). Algunos de estos depósitos son recientes (CARRASCO-NÚÑEZ y Rose, 1995); están asociados a los eventos eruptivos del final del siglo XVII (MACÍAS, 2007). La figura 1 muestra el sitio donde fueron realizadas las perforaciones.

Para desarrollar este trabajo se eligió una superficie despejada, totalmente horizontal y con un suelo de textura homogénea, libre de interacción directa con la vegetación y la escorrentía superficial, así como alejada del paso de

montañistas y habitantes aledaños. En ella se perforaron cuatro agujeros en línea de este a oeste con una separación de 0.5 m entre uno y otro, cada uno con un diámetro de 15 cm y 120 cm de profundidad. La granulometría encontrada durante la perforación varía desde fina tefra semi compactada en los primeros 20 cm, hasta 0.5 a 2 cm de diámetro en la parte más baja, con algunos fragmentos aislados de rocas mayores (figura 2). Se tuvo especial cuidado de no alterar en lo posible el material excavado para posteriormente rellenar los huecos en el orden extraído.

Primeramente, de oeste a este, se insertó un tubo de 120 cm de PVC tipo hidráulico con un grosor de pared

CUADRO I. *Matriz de control de sensores*

Método de instalación	Profundidad (cm)	Número de serie	Fecha de inicio	Hora	Intervalo de registros	Fecha de finalización	Hora
Contacto directo (Grupo 1)	-5	10625202	01/07/2015	00:00	1 hr	30/06/2016	23:00
	-30	10625203					
	-60	10625204					
	-120	10625205					
Contenedor aislado (Grupo 2)	-5	10759232	01/07/2015	00:00	1 hr	30/06/2016	23:00
	-30	10759229					
	-60	10759226					
	-120	10759228					
Tubo perforado (Grupo 3)	-5	10625198	01/07/2015	00:00	1 hr	30/06/2016	23:00
	-30	10625199					
	-60	10625200					
	-120	10625201					
Tubo sellado (Grupo 4)	-5	10625194	01/07/2015	00:00	1 hr	30/06/2016	23:00
	-30	10625195					
	-60	10625196					
	-120	10625197					

calibre 40 que fue sellado en la parte inferior. En su parte superior se colocó un cople con rosca interna en el cual se introdujo un tapón roscado de 1 cm de espesor para sellarlo y al mismo tiempo permitir abrirlo cuando fuera necesario. Todo el material PVC empleado fue de color blanco para evitar la absorción de energía radiante. Por debajo del tapón roscado y al centro se amarró una línea de hilo de pescar con la misma longitud del tubo y con el grosor suficiente para soportar el peso de los sensores atados a él. Adyacente al tubo 1 se insertó un segundo tubo con las mismas características del primero pero con la diferencia de que en este se perforaron dos agujeros opuestos entre sí de 1 cm de diámetro a la altura en la que debería estar colgando el centro de cada uno de los sensores, buscando una interacción más directa entre el sustrato y cada sensor. Atados al hilo se colocaron los mini sensores en las siguientes profundidades: -5, -30, -60 y -120 cm. Ambos tapones roscados se sellaron y no se abrieron hasta una vez terminado el experimento. Por encima de cada tapón se sobrepuso una delgada capa de suelo para evitar la radiación directa del sol. En el tercer agujero se introdujeron cuatro contenedores plásticos comerciales tipo *tupper ware* con dimensiones de 9 × 7 × 4 cm fabricados con polipropileno (PP) con una densidad de 0.95gr/cm<sup>3</sup> y con sello hermético de polietileno de baja densidad (LDPE) en la tapa. Se colocaron a las mismas profundidades en las que se instalaron los sensores de los tubos; en cada contenedor se introdujo un mini

sensor y se selló herméticamente a presión. Se procuró que las características de los materiales tanto de los tubos como de los contenedores individuales fueran genéricas y universalmente comunes, así como de fácil adquisición en el mercado. La figura 3 muestra los detalles de los tubos y contenedores mencionados.

Por encima de cada contenedor se rellenó del material extraído teniendo especial cuidado en el orden y compactación del material. Finalmente en el hoyo número cuatro se introdujeron los sensores a la misma profundidad que en los tres casos anteriores pero esta vez sin ningún tipo de material que lo aislara del contacto directo con el material del subsuelo; los sensores estuvieron atados de su parte superior a una línea de hilo que a su vez estuvo unida a una estaca para evitar su pérdida. Para todos los casos los sensores se programaron para obtener datos durante un año a intervalos de una hora, iniciando a las cero horas del 1 de julio del 2015 y culminando el 30 de junio del 2016 (el cuadro I señala la distribución de cada uno de los sensores utilizados). Una vez cumplido el año de registros se extrajeron todos los sensores y se verificó que dentro de los tubos y de los contenedores individuales no existiera presencia de agua ni sedimentos.

De cada uno de los niveles de profundidad se obtuvo la temperatura media diaria, mensual y anual para cada uno de los métodos de instalación. Con el fin de conservar la mayor precisión posible en los datos obtenidos, se respetaron las tres posiciones decimales que los sensores

CUADRO II. *Temperatura media mensual por profundidad*

Mes	Profundidad (cm)	Contacto directo (grupo 1)	Contenedor (grupo 2)	Tubo perforado (grupo 3)	Tubo sellado (grupo 4)
julio		9.761	9.236	10.616	10.725
agosto		8.527	8.231	9.182	9.197
septiembre		7.660	7.325	8.161	8.264
octubre		7.359	6.977	7.995	7.890
noviembre		5.964	5.734	6.335	6.180
diciembre	-5	5.438	5.076	6.306	5.451
enero		3.690	3.430	4.233	3.815
febrero		7.484	7.565	8.346	7.768
marzo		6.803	6.498	7.344	7.043
abril		10.584	10.332	11.534	11.377
mayo		11.225	10.836	11.987	11.931
junio		8.401	8.117	8.660	8.734
julio		8.736	8.552	8.941	8.989
agosto		8.639	8.505	8.767	8.821
septiembre		7.868	7.658	8.045	8.136
octubre		7.430	7.352	7.604	7.491
noviembre		6.505	6.340	6.602	6.452
diciembre	-30	5.772	5.627	6.044	5.546
enero		4.662	4.470	4.819	4.462
febrero		6.632	6.746	7.064	6.543
marzo		6.411	6.365	6.591	6.414
abril		9.635	9.623	10.093	10.109
mayo		10.530	10.842	10.939	10.992
junio		8.726	8.460	8.811	8.855
julio		8.159	8.058	8.279	8.305
agosto		8.489	8.522	8.621	8.687
septiembre		7.878	7.939	8.046	8.114
octubre		7.518	7.552	7.701	7.611
noviembre		6.817	6.791	6.976	6.876
diciembre	-60	6.060	6.073	6.249	5.980
enero		5.321	5.326	5.501	5.220
febrero		6.212	6.309	6.428	6.151
marzo		6.327	6.381	6.465	6.368
abril		8.945	8.966	9.236	9.302
mayo		9.753	9.750	10.011	10.132
junio		8.773	8.567	8.892	8.956
julio		7.615	7.842	7.813	7.822
agosto		8.052	8.303	8.198	8.277
septiembre		7.784	8.034	8.005	8.053
octubre		7.594	7.881	7.850	7.830
noviembre		7.167	7.410	7.425	7.386
diciembre	-120	6.569	6.869	6.872	6.764
enero		6.166	6.517	6.466	6.342
febrero		6.095	6.389	6.357	6.233
marzo		6.386	6.692	6.624	6.582
abril		7.777	7.946	7.948	8.055
mayo		8.559	8.716	8.724	8.885
junio		8.506	8.760	8.653	8.805



CUADRO III. *Resumen estadístico*

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Media	7.56175	7.531041667	7.882479167	7.79002083
Error típico	0.224073448	0.222922274	0.233103048	0.25136803
Mediana	7.6045	7.6115	7.9715	7.86
Desviación estándar	1.552426385	1.544450821	1.614985291	1.74152877
Varianza de la muestra	2.410027681	2.385328339	2.608177489	3.03292245
Curtosis	0.150182461	0.363666658	0.412446866	0.06088756
Coefficiente de asimetría	0.075312231	-0.114162212	0.356147587	0.17166022
Rango	7.535	7.412	7.754	8.116
Mínimo	3.69	3.43	4.233	3.815
Máximo	11.225	10.842	11.987	11.931
Suma	362.964	361.49	378.359	373.921
Cuenta	48	48	48	48

CUADRO IV. *Análisis de varianza*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	4.260538104	3	1.420179368	0.5443148	0.652560608	2.652645615
Dentro de los grupos	490.5134299	188	2.609113989			
Total	494.773968	191				

registraban. Los valores finales fueron tabulados e identificados por grupos para proceder a realizar los comparativos estadísticos y resultados. En las pruebas estadísticas, inicialmente se realizó un análisis de varianza para comparar diferencias significativas entre las medias de cada grupo considerando únicamente el método de instalación (ANOVA 1). En segunda instancia, en el análisis se incluyó el factor de profundidad por lo que se aplicó la prueba de análisis de varianza bifactorial (ANOVA 2). Posteriormente, dado que se busca comparar los registros de métodos alternos contra el método directo, se realizaron pruebas simultáneas de Dunnett considerando al directo como grupo de control y comparación. Una cuarta prueba consistió en un análisis de varianza con medidas repetidas para comparar los grupos entre pares de combinaciones posibles (ANOVA MR). Finalmente se compararon las líneas de regresión así como sus respectivas ecuaciones y se propuso el método de corrección para homologar los valores que resultaran estadísticamente diferentes con los del grupo de referencia.

#### IV. RESULTADOS

El cuadro II muestra la temperatura media mensual para los cuatro métodos de instalación; esta está tabulada

de menor a mayor profundidad. Por su parte, el cuadro III señala el resumen estadístico de los mismos.

De acuerdo con el resumen estadístico y la dispersión de los datos con respecto a su media, la del grupo 2 muestra valores muy similares en su desviación estándar con respecto al grupo de referencia (grupo 1). Los datos están distribuidos más simétricamente dentro del grupo 4 después del grupo de control, mientras que en el grupo 2 la distribución se encuentra más cargada hacia los valores inferiores de la media. Sin embargo, la curva de curtosis muestra que los datos del grupo 3 se encuentran más concentrados entorno a su media poblacional.

Con base en el análisis de ANOVA 1 (cuadro IV) con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05 < 0.652560608$  de probabilidad, se obliga a aceptar la hipótesis nula, ya que no existe diferencia estadísticamente significativa entre los métodos comparados, por lo que la dispersión de los datos y sus medias entre cada grupo son comparables a la de los grupos restantes y como consecuencia con los del grupo de control.

En la prueba anterior se revisaron las características generales de cada grupo en función a la distribución de sus datos como si se trataran de valores lineales, es decir, obtenidos a una sola profundidad para analizar la distribución de los mismos. Sin embargo, debido a que las

CUADRO V. *Análisis de varianza de dos factores*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Profundidad	4.70996144	3	1.56998715	0.57333355	0.63327223	2.65593888
Temperatura	4.2605381	3	1.42017937	0.51862621	0.669995	2.65593888
Interacción	3.8541076	9	0.42823418	0.1563841	0.99763627	1.93340607
Dentro del grupo	481.949361	176	2.73834864			
Total	494.773968	191				

CUADRO VI. *Pruebas multivariadas*

Efecto	Valor	F	Gl de la hipótesis	Gl del error	Sig.	Eta cuadrado
Diferencias Traza de Pillai	.970	10.945 <sup>b</sup>	3.000	1.000	.218	.970
Lamba de Wilks	.030	10.945 <sup>b</sup>	3.000	1.000	.218	.970
Traza de Hotelling	32.834	10.945 <sup>b</sup>	3.000	1.000	.218	.970
Raíz mayor de Roy	32.834	10.945 <sup>b</sup>	3.000	1.000	.218	.970

CUADRO VII. *Comparación entre pares*

(I) Diferencias	(J) Diferencias	Diferencia de la media (I-J)	Error std.	Sig. <sup>a</sup>	Intervalo de confianza al 95 % para la diferencia <sup>a</sup>	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	.031	.114	.804	-.332	.394
	3	-.321	.111	.063	-.673	.031
	4	-.228	.081	.067	-.487	.030
2	1	-.031	.114	.804	-.394	.332
	3	-.352	.211	.194	-1.023	.319
	4	-.259	.170	.225	-.801	.283
3	1	.321	.111	.063	-.031	.673
	2	.352	.211	.194	-.319	1.023
	4	.092	.044	.123	-.046	.231
4	1	.228	.081	.067	-.030	.487
	2	.259	.170	.225	-.283	.801
	3	-.092	.044	.123	-.231	.046

temperaturas fueron obtenidas en cuatro niveles de profundidad, corresponde ahora verificar su comportamiento en cada uno de los estratos del suelo. Primeramente, tras la ejecución de la prueba ANOVA 2 (cuadro V), considerando tanto el tipo de instalación así como la profundidad de las lecturas, con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05 < 0.63327223$  de probabilidad se obtiene una vez más que no hay una variación estadísticamente significativa de temperatura entre los niveles de profundidad; de igual manera se obtiene que la profundidad tiene el mismo efecto en los cuatro grupos no habiendo diferencia significativa entre ellos. Por último, tampoco se encontraron efectos de interacción entre la profundidad y la temperatura.

Aplicando la prueba de Dunnett, que compara una vez más las medias de cada grupo y sus intervalos de confianza contra los del grupo de control o referencia (grupo 1) se obtiene que las medias poblacionales no son significativamente diferentes de la media del grupo 1 debido a que todos los intervalos cruzan en cero (figura 4).

En cuanto a las medias poblacionales de cada grupo y la dispersión de sus datos, se ha realizado esta vez una prueba de análisis de varianza con medidas repetidas (ANOVA MR) mediante la cual, con un nivel de confianza de 0.95, tanto en las pruebas multivariadas como la comparación entre pares tampoco señalan una diferencia significativa (cuadros VI y VII respectivamente):

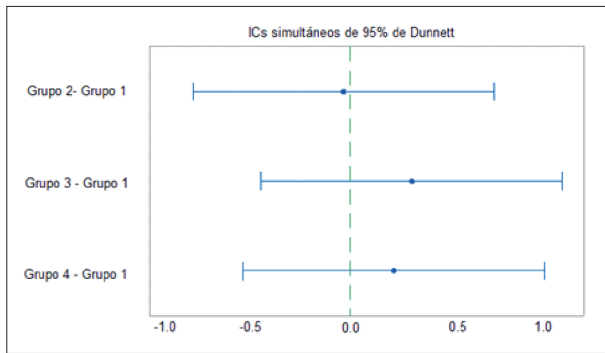


FIG. 4. Prueba Dunnett para la media de grupos vs. media del grupo de control.

Hasta este momento y con base en las pruebas de varianza de los datos no se han encontrado diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de datos que permitan rechazar la hipótesis nula, por lo que de acuerdo a lo anterior no representaría una gran diferencia a la hora de utilizar un método de instalación distinto al del grupo 1. Sin embargo, cuando se representan gráficamente los datos y su distribución, se visualizan comportamientos distintos tanto en los interceptos como en las pendientes; por lo que se requirió un análisis que comparara los coeficientes de regresión de cada grupo. Con la finalidad de simplificar el gráfico y considerando que no existe diferencia a la hora del procesamiento de los datos, se calcularon las medias anuales del cuadro II para cada nivel de profundidad, quedando conforme al cuadro VIII. De esta manera las líneas de tendencia lucen de acuerdo con la figura 5.

Realizando el análisis comparativo de las regresiones obtenemos los resultados mostrados en los cuadros IX al XII.

Como el valor-P de la tabla del análisis de varianza es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables, con un nivel de confianza del 95 %. Esto puede apreciarse en el cuadro XIII de ANOVA con la suma de cuadrados condicional.

Donde, dado que el valor-P para las pendientes es menor que 0.1, existen diferencias estadísticas entre las pendientes para los distintos valores de los grupos con un nivel de confianza del 90 %. Así mismo, debido a que el valor-P para los interceptos es menor que 0.05, existen diferencias estadísticamente significativas entre estos para los diferentes valores de los grupos con un nivel de confianza del 95 %.

La diferencia entre las pendientes se pone visiblemente de manifiesto ya que ninguna es paralela entre sí, menos aún con la del grupo de referencia (grupo 1), siendo la línea del grupo 3 la que mayor cambio experimenta

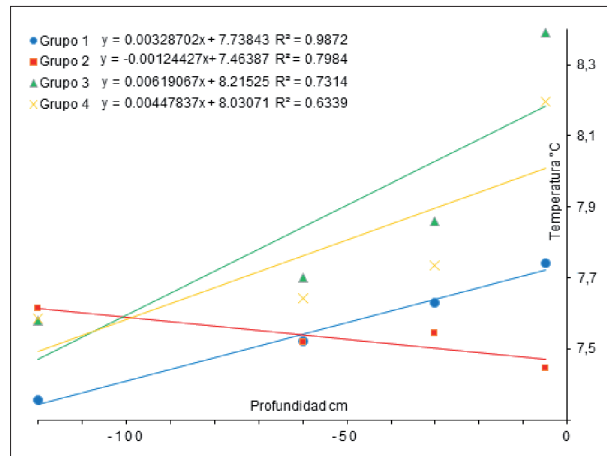


FIG. 5. Líneas de tendencia y regresión.

con la profundidad. El caso más significativo lo representa el grupo 2, que si bien posee la menor pendiente de todos, esta adquiere un valor negativo; es decir, que a diferencia de los otros tres grupos cuya temperatura tiende a disminuir con la profundidad conforme a lo señalado por la teoría (French, 2007), este muestra un aumento de la variable térmica a mayor profundidad. Por su parte, los interceptos u ordenadas que representan el inicio de cada línea de tendencia son también visiblemente distintos. En este caso, representan la temperatura más superficial de cada perfil, señalando variaciones de décimas de grado entre sí y con respecto al grupo de referencia. Las diferencias existentes entre los interceptos y las pendientes entre los grupos condicionan el comportamiento de los distintos perfiles de temperatura que se han estudiado; por lo que en relación al perfil del grupo de referencia los datos de los otros grupos difieren significativamente.

Por su parte, los distintos análisis de varianza realizados a los datos de los cuatro grupos comparados señalan que no existe una diferencia estadísticamente significativa a un nivel de confianza del 95 %, por lo que la hipótesis nula aceptada significa que sin importar el método de instalación empleado, los datos se distribuirán de manera parecida con respecto a sus respectivas medias poblacionales. Sin embargo, al momento de observar la gráfica de dispersión de los registros y su línea de tendencia se visualizan diferencias notables que el análisis comparativo de regresión confirma. De inicio, el grupo de referencia que corresponde al método de instalación de sensores en contacto directo con el suelo, muestra un coeficiente de determinación redondeado cercano a la perfección de 0.99, lo que expone la alta calidad del modelo para ser replicado. Su línea de tendencia indica un comportamiento

CUADRO VIII. *Temperatura media anual por profundidad*

Profundidad	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
-5	7.741	7.446	8.392	8.198
-30	7.629	7.545	7.860	7.734
-60	7.521	7.519	7.700	7.642
-120	7.356	7.613	7.578	7.586

CUADRO IX. *Análisis de regresión múltiple*

Parámetro	Estimado	Error	Estadístico	Valor-P
		Estándar	T	
CONSTANTE	7.73843	0.124447	62.1824	0.0000
Profundidad	0.00328702	0.00180925	1.81679	0.1068
Grupo = 2	-0.274557	0.175995	-1.56003	0.1574
Grupo = 3	0.476821	0.175995	2.70929	0.0267
Grupo = 4	0.292285	0.175995	1.66076	0.1353
Profundidad*Grupo = 2	-0.0045313	0.00255866	-1.77097	0.1145
Profundidad*Grupo = 3	0.00290365	0.00255866	1.13483	0.2893
Profundidad*Grupo = 4	0.00119135	0.00255866	0.465614	0.6539

CUADRO X. *Coefficientes*

Grupo	Intercepto	Pendiente	Coef. de corr.
1	7.73843	0.00328702	0.993587698
2	7.46387	-0.00124427	-0.89354433
3	8.21525	0.00619067	0.855207958
4	8.03071	0.00447837	0.796209328

CUADRO XI. *Residuos Y-y calculada*

Profundidad	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
-5	0.01900763	-0.0240916	0.20770483	0.18967939
-30	-0.01081679	0.04380153	-0.16952841	-0.16236132
-60	-0.02020611	-0.01952672	-0.14380831	-0.12001018
-120	0.01201527	-0.00018321	0.10563189	0.09269211

CUADRO XII. *Análisis de varianza*

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.876648	7	0.125235	5.19	0.0169
Residuo	0.192965	8	0.0241206		
Total (Corr.)	1.06961	15			

CUADRO XIII. *ANOVA adicional para variables según el orden de introducción*

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Profundidad	0.297678	1	0.297678	12.34	0.0079
Interceptos	0.355434	3	0.118478	4.91	0.0320
Pendientes	0.223535	3	0.0745117	3.09	0.0898
Modelo	0.876648	7			

CUADRO XIV. Corrección de temperaturas con respecto al Grupo 1

Prof.	Grupo 2 vs. Grupo 1	Grupo 3 vs. Grupo 1	Grupo 4 vs. Grupo 1	
	Resta de ecuaciones	$y = (-0.00124427x + 7.46387) - (y = 0.00328702x + 7.73843)$	$y = (0.00619067x + 8.21525) - (y = 0.00328702x + 7.73843)$	$y = (0.00447837x + 8.03071) - (y = 0.00328702x + 7.73843)$
	Diferencia	$y = -0.00453129x + (-0.27456)$	$y = 0.00290365x + 0.47682$	$y = 0.00119135x + 0.29228$
	Sustitución	$y = -0.00453129(-5) + (-0.27456)$	$y = 0.00290365(-5) + 0.47682$	$y = 0.00119135(-5) + 0.29228$
	Frac. de ajuste	$y = -0.25190355$	$y = 0.46230175$	$y = 0.28632325$
-5	Temp. Registrada-Frac. de ajuste	$7.446 - (-0.25190355)$	$8.392 - 0.46230175$	$8.198 - 0.28632325$
	Temp. Pre-ajustada	7.69790355	7.92969825	7.91167675
	Resta de residuos	$(-0.024091603) - 0.019007634$	$0.207704835 - 0.019007634$	$0.189679389 - 0.019007634$
	Dif. residual	-0.43099237	0.188697201	0.170671755
	Temperatura corregida	$7.69790355 - (-0.43099237) = 7.741$	$7.92969825 - 0.188697201 = 7.741$	$7.91167675 - 0.170671755 = 7.741$
	Resta de ecuaciones	$y = (-0.00124427x + 7.46387) - (y = 0.00328702x + 7.73843)$	$y = (0.00619067x + 8.21525) - (y = 0.00328702x + 7.73843)$	$y = (0.00447837x + 8.03071) - (y = 0.00328702x + 7.73843)$
	Diferencia	$y = -0.00453129x + (-0.27456)$	$y = 0.00290365x + 0.47682$	$y = 0.00119135x + 0.29228$
	Sustitución	$y = -0.00453129(-30) + (-0.27456)$	$y = 0.00290365(-30) + 0.47682$	$y = 0.00119135(-30) + 0.29228$
	Frac. de ajuste	$y = -0.1386213$	$y = 0.3897105$	$y = 0.2565395$
-30	Temp. Registrada-Frac. de ajuste	$7.545 - (-0.1386213)$	$7.860 - 0.3897105$	$7.734 - 0.2565395$
	Temp. Pre-ajustada	7.6836213	7.4702895	7.4774605
	Resta de residuos	$0.043801527 - (-0.010816794)$	$(-0.169528414) - (-0.010816794)$	$(-0.162361323) - (-0.010816794)$
	Dif. residual	0.054618321	-0.15871162	-0.151544529
	Temperatura corregida	$7.6836213 - 0.054618321 = 7.629$	$7.4702895 - (-0.15871162) = 7.629$	$7.4774605 - (-0.151544529) = 7.629$
	Resta de ecuaciones	$y = (-0.00124427x + 7.46387) - (y = 0.00328702x + 7.73843)$	$y = (0.00619067x + 8.21525) - (y = 0.00328702x + 7.73843)$	$y = (0.00447837x + 8.03071) - (y = 0.00328702x + 7.73843)$
	Diferencia	$y = -0.00453129x + (-0.27456)$	$y = 0.00290365x + 0.47682$	$y = 0.00119135x + 0.29228$
	Sustitución	$y = -0.00453129(-60) + (-0.27456)$	$y = 0.00290365(-60) + 0.47682$	$y = 0.00119135(-60) + 0.29228$
	Frac. de ajuste	$y = -0.0026826$	$y = 0.302601$	$y = 0.220799$
-60	Temp. Registrada-Frac. de ajuste	$7.519 - (-0.0026826)$	$7.700 - 0.302601$	$7.642 - 0.220799$
	Temp. Pre-ajustada	7.5216826	7.397399	7.421201
	Resta de residuos	$(-0.019526718) - (-0.020206107)$	$(-0.143808312) - (-0.020206107)$	$(-0.120010178) - (-0.020206107)$
	Dif. residual	0.000679389	-0.123602205	-0.099804071
	Temperatura corregida	$7.5216826 - 0.000679389 = 7.521$	$7.397399 - (-0.123602205) = 7.521$	$7.421201 - (-0.099804071) = 7.521$
	Resta de ecuaciones	$y = (-0.00124427x + 7.46387) - (y = 0.00328702x + 7.73843)$	$y = (0.00619067x + 8.21525) - (y = 0.00328702x + 7.73843)$	$y = (0.00447837x + 8.03071) - (y = 0.00328702x + 7.73843)$
	Diferencia	$y = -0.00453129x + (-0.27456)$	$y = 0.00290365x + 0.47682$	$y = 0.00119135x + 0.29228$
	Sustitución	$y = -0.00453129(-120) + (-0.27456)$	$y = 0.00290365(-120) + 0.47682$	$y = 0.00119135(-120) + 0.29228$
	Frac. de ajuste	$y = 0.2691948$	$y = 0.128382$	$y = 0.149318$
-120	Temp. Registrada-Frac. de ajuste	$7.613 - 0.2691948$	$7.578 - 0.128382$	$7.586 - 0.149318$
	Temp. Pre-ajustada	7.3438052	7.449618	7.436682
	Resta de residuos	$(-0.000183206) - 0.012015267$	$0.105631891 - 0.012015267$	$0.092692112 - 0.012015267$
	Dif. residual	-0.012198473	0.093616624	0.080676845
	Temperatura corregida	$7.3438052 - (-0.012198473) = 7.356$	$7.449618 - 0.093616624 = 7.356$	$7.436682 - 0.080676845 = 7.356$

apegado a lo que la teoría señala: una ligera disminución de la temperatura en función de la profundidad. En contraparte, el grupo 2 o método de contenedores aislados, si bien indica un  $R^2$  redondeado de 0.8, su línea de tendencia tiene un sentido inverso en relación al resto de los grupos y a lo que es señalado por la bibliografía general.

No obstante, a la diferencia comprobada entre las regresiones de los grupos debido a los componentes que integran cada método de instalación, existe la opción de corregir el valor de los datos de cada perfil para ser ajustados a los valores del grupo 1 que son considerados como más precisos por las razones que han sido señaladas con anterioridad. Para este fin resulta necesario restar, de la ecuación de regresión del grupo que se desea corregir, la ecuación del grupo de referencia y en la fórmula resultante será donde se sustituirán los valores de profundidad a los que se ajustarán las temperaturas; se resuelve la ecuación y el resultado se restará a la temperatura por corregir. Al nuevo resultado obtenido se le resta la diferencia entre el residual del grupo por corregir y el de referencia y se obtiene así el valor corregido para cada nivel en las líneas de regresión. El procedimiento y las temperaturas corregidas a los valores del grupo de referencia en cada profundidad de cada uno de los grupos se muestran en el cuadro XIV.

## V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Considerar la colocación de los *data loggers* directamente en el suelo es arriesgarse a sufrir su pérdida, así como la de los datos que contenga, como lo han experimentado Hoesle y otros (2003), entre otros.

Debido a que el método de instalación correspondiente al grupo de control (grupo 1) muestra una tendencia de disminución térmica conforme a la profundidad del subsuelo, tal como se espera que se comporte de manera general en el ambiente periglacial (FRENCH, 2007), y el ajuste de sus datos con respecto a la línea tendencial resulta casi perfecto con un coeficiente de correlación de 0.99, según el cuadro X, se subraya la existencia de diferencias en los registros de temperatura obtenidos mediante los métodos de instalación alternos con respecto al grupo de control. Por lo que el de la utilización del tubo sellado (grupo 4) es el que más se aproxima al comportamiento de los valores considerados como verdaderos, al menos en cuanto a la línea de tendencia, la cual si bien no resulta ser estrictamente paralela con la del grupo 1, tal como se mencionó previamente, en ambos casos sus datos tienen un comportamiento parecido en cuanto a su

proyección, como se aprecia en la figura 5. No obstante lo anterior, su coeficiente de correlación de 0.79, si bien es considerado alto desde la perspectiva estadística, difiere considerablemente del correspondiente al grupo de referencia. El método del tubo perforado (grupo 3), por su parte, posee el segundo mayor ajuste de correlación (0.85) pero sus datos se ubican más alejados en comparación con el grupo 4, y su tendencia no muestra paralelismo; por otro lado, el grupo correspondiente a los contenedores individuales (grupo 2) indica un comportamiento marcadamente inverso en su línea de tendencia y correlación (-0.89) con relación a los demás grupos, por lo que dadas las circunstancias se considera como el método menos indicado para utilizarse.

Resulta oportuno señalar que tanto Trombotto (2007), Abramov y otros (2008) y Trombotto y Bazorta (2009) reconocen la existencia de un margen de error en sus registros, el cual para Abramov y coautores llega a ser del 10 al 30 %, y de acuerdo con ellos, puede atribuirse al coeficiente de conductividad térmica y eléctrica del suelo o al grado de precisión de los sensores. Por su parte, Trombotto (2007) considera esta diferencia como resultado de la resolución y precisión de los dispositivos utilizados; asimismo, Trombotto y Bazorta (2009) atribuyen la imprecisión a las condiciones cambiantes de la atmósfera. Por su parte, Goyanes y otros (2014), conscientes del margen de error en sus registros, lo consideran despreciable a la hora de interpretar sus resultados. La importancia de lo anterior radica en que, para todos los casos, los datos de temperatura obtenidos para determinar la presencia o ausencia de permafrost están muy cercanos a 0 °C, llegando a ser de 0.13 y 0.36 °C en el caso particular de Trombotto (2007), sobre todo si se toma en cuenta el bajo umbral existente entre la línea que divide la fusión y el congelamiento del agua. Por lo tanto, considerando que la temperatura del permafrost de montaña se encuentra próxima a los 0 °C (FRENCH, 2007; GRUBER y HAEBERLI, 2009), un margen de error en los datos, aunado al grado de imprecisión propia de los dispositivos empleados, podría traducirse en valores sobreestimados o subestimados, que representen una interpretación distinta a la realidad, indicando la posible existencia de permafrost cuando en realidad sea inexistente o viceversa.

Por otra parte, es probable también que las diferencias encontradas dependan de la baja conductividad térmica en general de los materiales utilizados, puesto que todos los polímeros son considerados comúnmente como aislantes por su carencia de electrones libres (RAMOS y DE MARÍA, 1988), siendo esta de 0.15 a 0.20 W/K-m para el PVC y 0.22 W/K-m para el polipropileno.

Es necesario enfatizar que el método de los contenedores aislados del grupo 2 es el menos recomendado para la lectura de temperaturas del subsuelo. El calentamiento que con la profundidad experimenta este sistema hace suponer que, aunado a la baja conductividad térmica del material, depende de las dimensiones de cada contenedor que resguarda los sensores así como del volumen de aire que se encuentra en su interior. El modelo del grupo 3 que corresponde al método de instalación del tubo perforado muestra el mayor gradiente térmico entre las lecturas de la interface suelo-atmósfera (-5 cm) y los 30 cm de profundidad; es probable que la mayor temperatura superficial registrada obedezca a la capacidad calorífica del material plástico que cubre y aísla el tubo y que tiene mayor interacción con el sensor que se ubica justo debajo de él. Por abajo de este límite el enfriamiento es menos acusado y tiende a homologarse más o menos con los grupos 1 y 4. Es posible que las perforaciones a la altura de cada sensor permitan el almacenamiento calórico por más tiempo en el interior del tubo, al menos hasta la profundidad de 60 cm ya que al fondo del perfil la línea se une a la del grupo 4. El grupo 4 que corresponde a la instalación mediante un tubo totalmente sellado manifiesta un comportamiento muy similar al del grupo 3 para las temperaturas de la interface. El gradiente entre este límite y los -60 cm es muy parecido al del grupo 3, obedeciendo de nueva cuenta al calor transmitido por la cubierta del tubo, que a pesar de estar aislados de la radiación directa, almacena gran cantidad de energía transmitida desde la superficie. Debido a su coeficiente de correlación de 0.79, este modelo posee menor precisión de ajuste en comparación con el de los grupos 1 y 3.

Por lo tanto, se observa que los métodos que incluyen tubos, ya sean sellados o perforados, se ven afectados por la energía calorífica almacenada en los primeros centímetros de la superficie de suelo que interactúa probablemente con el espesor de la tapa plástica que los cubre, dando como respuesta una mayor temperatura en su parte superior. Sin embargo, el tubo perforado parece ajustarse a las temperaturas reales a mayor profundidad debido a las perforaciones que facilitan una mejor interacción suelo-sensor. Sin embargo, es importante mencionar que este sistema de tubos perforados pudiera no ser apropiado en ambientes con permafrost rico en hielo, como el de las regiones circumpolares; ya que el agua, producto de la fusión veraniega de la capa activa puede filtrarse al interior de los tubos, ocasionando que su recongelamiento invernal imposibilite la extracción de los sensores contenidos. Se concluye, por lo tanto, que para el caso de monitoreo térmico subsuperficial, hasta aproximada-

mente un metro de profundidad, la utilización del tubo sellado podría ser la mejor opción, mientras que para lecturas más profundas y en un ambiente de permafrost seco (FRENCH, 2007), es recomendable el uso de un tubo perforado, en ambos casos, con el menor diámetro posible.

Por otro lado, el modelo de regresión del grupo de referencia ha servido para que con base en su comportamiento casi perfecto puedan ser corregidas las lecturas de los grupos restantes cuyas diferencias, como se ha señalado, son el resultado de los métodos y características de los materiales empleados para registrar las temperaturas. A pesar de que se demostró que los registros a cualquier profundidad pueden ser corregidos conforme al grupo 1, la ecuación de su regresión puede funcionar como referente para elaborar correcciones de lecturas de temperatura de cualquier otro método distinto al del grupo 1, sin importar las profundidades a las que se realicen los registros ni la profundidad alcanzada en el perfil del suelo.

No obstante los resultados encontrados, resulta necesario también señalar las limitaciones que presenta este trabajo. En primera instancia, pudieran existir condiciones a nivel de microescala que afecten las conclusiones obtenidas; una de la más importante consistiría en la diferencia de la granulometría posiblemente existente en los sedimentos entre un perfil y otro a pesar de la distancia de 0.5 m que los separan. También en el orden del relleno y la variación en su compactación entre un hoyo y otro pese al cuidado que se tuvo en los cuatro perfiles. En conjunto, esto podría dar pie a interrogantes sobre el porcentaje de error en los registros de temperatura que corresponda a la diferencia ocasionada por las distintas variaciones en la granulometría, al contenido de humedad, a la diferencia en la capacidad calorífica y la conductividad térmica de los sedimentos y de los materiales usados, o inclusive a la posible variación en la profundidad, del orden de uno o dos centímetros, en los sensores entre un perfil y otro. Por otro lado, a pesar de la cercanía entre los perfiles y a la calibración previa realizada desde fábrica para cada uno de los *data loggers*, la colocación de al menos una cadena horizontal de sensores en contacto directo con el subsuelo a una profundidad dada podría haber representado un mayor grado de confianza y validez en la investigación, verificando inicialmente que todos los puntos fueran térmicamente homogéneos, o en caso contrario realizar la calibración correspondiente.

Una alternativa viable para profundizar posteriormente en lo encontrado con este trabajo puede llevarse a cabo en laboratorio, al interior de un ambiente controlado, para discutir el grado de afectación que representa la utilización de materiales polímeros (PVC y polipropileno en este

caso) entre los sensores de temperatura y las capas de subsuelo en las que sean colocados; sin duda, este ejercicio vendría a robustecer en detalle esta investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

- ABRAMOV, A., S. GRUBER y D. GILICHINSKY (2008): «Mountain Permafrost on Active Volcanoes: Field Data and Statical Mapping, Klyuchevskaya Volcano Group, Kamchatka, Russia», *Permafrost and Periglacial Process*, 19, pp. 261-277.
- AHUMADA, A., G. IBÁÑEZ y S. PÁEZ (2010): «Reconocimiento de permafrost andino en las nacientes del río Santa María, Catamarca», *Ciencia*, 5 (13), pp. 95-110.
- ANDRÉS, N., D. PALACIOS, J. ZAMORANO y L. VÁZQUEZ-SELEM (2010): «Distribución del permafrost e intensidad de los procesos periglaciares en el estratovolcán, Iztaccíhuatl (México)», *Ería*, 83, pp. 291-310.
- ANDRÉS, N., D. PALACIOS, J. ZAMORANO, C. MENDOZA, L. VÁZQUEZ-SELEM (2012): «Diez años de control térmico en el suelo del estratovolcán tropical Iztaccíhuatl (México)», en *Avances de la geomorfología en España 2010-2012* (Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología: Santander, 17-20 septiembre de 2012), PUBliCan, Ediciones de la Universidad de Cantabria, Santander, 690 pp.
- ANDÚJAR MÁRQUEZ, J. M., M. Á. MARTÍNEZ BOHÓRQUEZ y S. GÓMEZ MELGAR (2016): «Ground Thermal Diffusivity Calculation by Direct Soil Temperature Measurement. Application to very Low Enthalpy Geothermal Energy Systems», *Sensors*, 16 (3), 306, pp. 1-13.
- ARYA, P. S. (2001): *Introduction to micrometeorology* (2.<sup>a</sup> ed.), Academic Press, San Diego, CA., 420 pp.
- AVIAN, M., A. KELLERER-PIRKLBAUER y A. BAUER (2009): «LiDAR for monitoring mass movements in permafrost environments at the cirque Hinteres Langtal, Austria, between 2000 and 2008», *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 9, pp. 1087-1094.
- BARRAGÁN, D. (2009): «Producción de entropía y ley de enfriamiento de Newton», *Revista Ingeniería e Investigación*, 29 (2), pp. 88-93.
- BARRY, R. G., y R. J. CHORLEY (2003): *Atmosphere, weather, and climate, Roger and Barry eds.*, Routledge, Londres, 421 pp.
- BENVENUTI, S., y A. PARDOSSI (2016): «Germination ecology of nutraceutical herbs for agronomic perspectives», *European Journal of Agronomy*, 76, pp. 118-129.
- CARRASCO-NÚÑEZ, G. (2000): «Structure and proximal stratigraphy of Citlaltepétl volcano (Pico de Orizaba), Mexico», en *Cenozoic tectonics and volcanism of Mexico*, 334, pp. 247-262.
- y W. I. ROSE (1995): «Eruption of a major Holocene pyroclastic flow at Citlaltepétl volcano (Pico de Orizaba), México, 8.5-9.0 ka», *Journal of volcanology and geothermal research*, 69 (3), pp. 197-215.
- CERMAK, V., y L. BODRI (2016): «Air-Ground Temperature Coupling: Analysis by Means of Thermal Orbits», *Atmospheric and Climate Sciences*, 6 (01), pp. 112-122.
- CLAUSER, C., y E. HUENGES (1995): «Thermal conductivity of rocks and minerals», en Ahrens (ed.): *Rock physics & phase relations: A handbook of physical constants*, American Geophysical Union, pp. 105-126.
- ETZELMÜLLER, B. (2013): «Recent advances in mountain permafrost research», *Permafrost and Periglacial Processes*, 24, pp. 99-107.
- y R. FRAUENFELDER (2009): «Factors controlling the distribution of mountain permafrost in the Northern Hemisphere and their influence on sediment transfer», *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 41 (1), pp. 48-58.
- ETZELMÜLLER, B., M. HOELZLE, SOLBJØRG FLO HEGGEM, KETIL ISAKSEN, CATHRINE MITTAZ, D. VONDER MÜHLL, R. S. ØDEGÅRD, W. HAEBERLI y J. LUDVIG SOLLID (2001): «Mapping and modelling the occurrence and distribution of mountain permafrost, Norsk Geografisk Tidsskrift», *Norwegian Journal of Geography*, 55:4, pp. 186-194.
- FOKEN, T., (2008): *Micrometeorology. Springer Science & Business Media*, Bayreuth, 308 pp.
- FRENCH, H. M. (2007): *The periglacial environment* (3.<sup>a</sup> ed.), Wiley and Sons, Chichester, 458 pp.
- GOULSBRA, C. S., J. B. LINDSAY y M. G. EVANS (2009): «A new approach to the application of electrical resistance sensors to measuring the onset of ephemeral streamflow in wetland environments», *Water Resources Research*, 45 (9), pp. 1-7.
- GOYANES, G., G. VIEIRA, A. CASELLI, M. CARDOSO, A. MARMY, F. SANTOS, I. BERNARDO y C. HAUCK (2014): «Local influences of geothermal anomalies on permafrost distribution in an active volcanic island (Deception Island, Antartica)», *Geomorphology*, 225, pp. 57-68.
- GOYANES, G., G. VIEIRA, A. CASELLI, C. MORA, M. RAMOS, M. ANGEL DE PABLO, M. NEVES, F. SANTOS, I.



- BERNARDO, D. GILICHINSKY, A. ABRAMOV, V. BATISTA, R. MELO, A. NIEUWENDAM, A. FERREIRA y M. Oliva (2014): «Régimen térmico y variabilidad espacial de la capa activa en Isla Decepción, Antártida», *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 71, 1, pp. 112-124.
- GRUBER, S., y W. HAEBERLI (2009): «Mountain permafrost», en R. Margesin (ed): *Permafrost Soils, Soil biology*, Springer-Verlag, Berlín, pp. 33-44.
- GUGLIELMIN M., M. BALKS y R. PAETZOLD (2003): «Towards an antarctic active layer and permafrost monitoring network», en *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*, Zúrich, 21-25 de julio de 2003, vol. 1, M. Phillips, S. M. Springman, L. Arenson (eds.), Balkema Publishers, Lisse, pp. 367-372.
- HAEBERLI, W., B. HALLET, L. ARENSON, R. ELCONIN, O. HUMLUM, A. KÄÄB y otros (2006): «Permafrost creep and rock glacier dynamics», *Permafrost and periglacial processes*, 17 (3), pp. 189-214.
- HAEBERLI, W., J. NOETZLI, L. ARENSON, R. DELALOYE, I. GÄRTNER-ROER, S. GRUBER, K. ISAKSEN, Ch. KNEISEL, M. KRAUTBLATTER y M. PHILLIPS (2010): «Mountain permafrost: development and challenges of a young research field», *Journal of Glaciology*, vol. 56, núm. 200, pp. 1.043-1.058.
- HANSON, S., y M. HOELZLE (2005): «Installation of a shallow borehole network and monitoring of the ground thermal regime of a high alpine discontinuous permafrost environment, Eastern Swiss Alps», *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography*, 59, pp. 84-93.
- HEGINBOTTOM, A., J. BROWN, O. HUMLUM y H. SVENSSON (2012): *Permafrost and Periglacial Environments. In Williams Jr., Richard S. and Ferrigno, Jane (eds). State of the Earth's Cryosphere at the Beginning of the 21st Century: Glaciers, Global Snow Cover, Floating Ice, and Permafrost and Periglacial Environments*, U. S. Geological Survey Professional Paper 1386-A., 496 pp.
- HIPP, T., B. ETZELMÜLLER, H. FARBROT, T. V. SCHULER y S. WESTERMANN (2012): «Modelling borehole temperatures in Southern Norway – insights into permafrost dynamics during the 20th and 21st century», *The Cryosphere*, 6, pp. 553-571.
- HIPP, T., B. ETZELMÜLLER y S. WESTERMANN (2014): «Permafrost in alpine rock faces from Jotunheimen and Hurrungane, Southern Norway», *Permafrost and Periglacial Processes*, 25, pp. 1-13.
- HOELZLE, M., M. WEGMANN y B. KRUMMENACHER (1999): «Miniature Temperature Dataloggers for Mapping and Monitoring of Permafrost in High Mountain Areas: First Experience from the Swiss Alps», *Permafrost and Periglacial Processes*, 10, pp. 113-124.
- HOELZLE, M., W. HAEBERLI y C. STOCKER-MITTAZ (2003): «Miniature ground temperature data logger measurements 2000-2002 in the Murtèl-Corvatsch area, Eastern Swiss Alps», *Proceed. 8th Int. Conf. on Permafrost*, Zúrich, pp. 419-424.
- HUMLUM, O., y N. MATSUOKA (2004): *A handbook on periglacial field methods. International Permafrost Association, the Working Group on Periglacial Proc. and Environment*, 82 pp.
- INEGI (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA) (2017): *Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México, 1.066 pp.
- IPA (INTERNATIONAL PERMAFROST ASSOCIATION) (2008): *Manual for monitoring and reporting permafrost measurements*, 12 pp.
- ISAKSEN, K., H. FARBROT, L. H. BLIKRA, J. L. SOLLID, T. EIKEN, K. ISAKSEN, H. FARBROT, L. H. BLIKRA, B. JOHANSEN, J. L. SOLLID y T. EIKEN (2008): *Five Year Ground Surface Temperature Measurements in Finnmark, Northern Norway*, en *Proceedings Ninth International Conference on Permafrost*, University of Alaska Fairbanks, 29 de junio-3 de julio de 2008, vol. 1, D. L. Kane y K. M. Hinkel (eds.), Institute of Northern Engineering, University of Alaska, Fairbanks, pp. 789-794.
- ISLAM, K. I., A. KHAN y T. ISLAM (2015): «Correlation between Atmospheric Temperature and Soil Temperature: A Case Study for Dhaka, Bangladesh», *Atmospheric and Climate Sciences*, 5, pp. 200-208.
- JANKE, J. R., M. W. WILLIAMS y Jr. A. EVANS (2011): «A comparison of permafrost prediction models along a section of Trail Ridge Road, Rocky Mountain National Park, Colorado, USA», *Geomorphology*, 138, pp. 111-120.
- KARUNARATNE, K. C., y C. R. BURN (2004): «Relations between air and surface temperature in discontinuous permafrost terrain near Mayo, Yukon Territory», *Canadian Journal of Earth Sciences*, 41 (12), pp. 1.437-1.451.
- KIM, S. O., M. S. SUH y C. H. KWAK (2005): «Climatological characteristics in the variation of soil temperature in Korea», *Journal of the Korean earth science society*, 26 (1), pp. 93-105.
- MACÍAS, J. L. (2005): «Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de Méxi-

- co», *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57 (3), pp. 379-424.
- (2007): «Geology and eruptive history of some active volcanoes of México», *Geological Society of America Special Papers*, 422, pp. 183-232.
- MATSUOKA, N. (2011): «Climate and material controls on periglacial soil processes: Toward improving periglacial climate indicators», *Quaternary Research*, 75 (2), pp. 356-365.
- K. MORIWAKI, S. IWATA y K. HIRAKAWA (1990): «Ground temperature regimes and their relation to periglacial processes in the Sor Rondane Mountains, east Antarctica. Proc. NIPR Symp.», *Antarct. Geosci*, 4, pp. 55-66.
- MARTÍN DOMINGO, A. (2015): *Apuntes de transmisión de calor. Departamento de física e instalaciones, Universidad Politécnica de Madrid, España*, 71 pp.
- NÚÑEZ-CRUZ, A., y C. BONFIL (2013): «Establecimiento inicial de tres especies del bosque tropical seco en un pastizal degradado: efectos del uso de acolchado y compost», *Agrociencia*, 47 (6), pp. 609-620.
- OSTERKAMP, T. E., y M. T. JORGENSEN (2009): «Permafrost conditions and processes», *Geological monitoring: Geological Society of America*, pp. 205-227.
- RAMOS, M. A., y M. R. DE MARÍA (1988): *Ingeniería de los materiales plásticos*, Díaz de Santos, Madrid.
- ROSSOTTI, A., G. CARRASCO-NÚÑEZ, M. ROSI y A. DI MURO (2006): «Eruptive dynamics of the “Citlaltépetl pumice” at Citlaltépetl volcano, eastern Mexico», *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158 (3), pp. 401-429.
- RUIZ-FERNÁNDEZ, J., M. OLIVA, F. HRBÁČEK, G. VIEIRA y C. GARCÍA-HERNÁNDEZ (2017): «Soil temperatures in an Atlantic high mountain environment: The Forcadona buried ice patch (Picos de Europa, NW Spain)», *Catena*, 149, pp. 637-647, <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.037>>.
- SANTOS GONZÁLEZ, J. (2010): *Glaciarismo y periglaciarismo en el Alto Sil*, tesis doctoral, Departamento de Geología y Geografía, Universidad de León, León, 689 pp.
- SANUSI, A. N. Z., y A. A. AHMAD ZAMRI (2014): «Achieving Cooler Soil as an Effective Heat Sink for Earth-to-Air Heat Exchanger (EAHE) Cooling Technology in Malaysia Tropical Climate», *Natural Resources*, 5, pp. 804-809.
- SCHROTT, L. (2002): «Hidrología del permafrost de montaña y su relación con la radiación solar. Estudio de una cuenca colectora en Agua Negra, Altos Andes de San Juan, Argentina», en Trombotto y Villalba (eds.): *IANIGLA, 30 años de investigación básica y aplicada en ciencias ambientales*, Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Mendoza, Argentina. 269 pp.
- J. C. OTTO y F. KELLER (2012): «Modelling alpine permafrost distribution in the Hohe Tauern region, Austria», *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105 (2), pp. 169-183.
- SERRANO, E., C. MORALES, J. GONZÁLEZ-TRUEBA y R. MARTÍN (2009): «Cartografía del permafrost de montaña en los pirineos españoles», *Finisterra*, vol. XLIV, núm. 87, pp. 45-54.
- SERWAY, R. A. (1997): *Física*, t. I, 4.ª ed., McGraw-Hill Interamericana Editores, México, D. F., 645 pp.
- SHENG, Y., J. LI, J. WU, B. YE y J. WANG (2009): «A regional model to predict the distribution patterns of alpine permafrost in the western part of the Qilianshan Mountains, on the northeastern edge of the Qinghai-Tibetan Plateau», *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6 (4), pp. 5.243-5.278.
- STOFFEL, M., y Ch. HUGGEL (2012): «Effects of climate change on mass movements in mountain environments», *Progress in Physical Geography*, 36 (3), pp. 421-439.
- TELES-VIEIRA, G., C. MORA y M. RAMOS (2000): «Registadores automáticos de baixo-custo para a monitorização de temperaturas do ar, da rocha e do solo», *Finisterra*, XXXV, 69, pp. 139-148.
- TROMBOTTO, D. (2007): «Profundización del tope de permafrost y tendencias en la dinámica criogénica, a partir de 1989, en el glaciar de escombros compuesto del valle de Morenas Coloradas, Mendoza, Argentina», *Boletín Geográfico*, año XXIX, núm. 30, pp. 71-83.
- y E. BORZOTTA (2009): «Indicators of present global warming through changes in active layer-thickness, estimation of thermal diffusivity and geomorphological observations in the Morenas Coloradas rockglacier, Central Andes of Mendoza, Argentina», *Cold Regions Science and Technology*, 55, pp. 321-330.
- P. WAINSTEIN y L. U. ARENSON (2014): *Guía terminológica de la geocriología sudamericana / Terminological Guide of the South American Geocryology*, Vázquez Mazzini Editores, Buenos Aires, 128 pp.