

El permafrost, un suelo congelado afectado por las variaciones climáticas del Cuaternario

Permafrost, a frozen soil affected by the Quaternary climatic variations

VICTORIA ALONSO

Dpto. de Geología, Universidad de Oviedo. C/Arias de Velasco s/h 33005 (Oviedo). E-mail: valonso@geol.uniovi.es

Resumen El objetivo de este trabajo es aportar datos sobre el permafrost con el fin de favorecer su inclusión en los currículos de enseñanza secundaria. Para ello, además de describirlo, se comentan los diferentes tipos, algunas estructuras asociadas al mismo y su distribución actual a nivel global. Si bien el permafrost puede no ser un rasgo exclusivo del Cuaternario, se considera que, en muchos casos, está relacionado con los periodos glaciares e interglaciares que caracterizan este periodo. El interés de incluir su estudio en los programas de secundaria se basa principalmente en la importancia de este rasgo geológico en las regiones afectadas por el mismo, donde el ser humano debe convivir con un suelo congelado y buscar soluciones para los problemas que esto plantea. A nivel global, el permafrost es un elemento más a tener en cuenta en el cambio climático y el interés por su estudio está aumentando, llegando a tener incluso aplicaciones interplanetarias. Por último, la inclusión del permafrost en los currículos de secundaria puede ser abordada mediante actividades de reconocimiento de estructuras formadas en suelos congelados, tal y como se muestra en un ejemplo recogido en este trabajo.

Palabras clave: Actividad humana, calentamiento global, periglaciario, permafrost.

Abstract *The objective of this paper is to provide data on permafrost with the aim of promoting its inclusion in secondary school curricula. With that purpose in mind, definition, types and some structures related to permafrost as well as its global distribution are referred to. Although it is not an exclusively quaternary feature, in many cases permafrost is considered to be related to the glacial and interglacial periods characteristic of the Quaternary. The interest of including its study in the secondary school curriculum is mainly due to its importance in cold areas, where human beings must coexist with a frozen soil and look for solutions to the related problems. On global terms, permafrost is among the elements to be considered in climatic change; its study is increasing, it even has interplanetary applications. Finally, the inclusion of the topic permafrost as subject matter in secondary schools can be approached by means of activities centered on the recognition of structures formed in frozen soils; this example is explained in the paper.*

Keywords: Human activity, global warming, periglaciario, permafrost.

INTRODUCCIÓN

Un porcentaje elevado del suelo de la superficie terrestre se encuentra permanentemente congelado. Este suelo, conocido como permafrost, se atribuye en su mayor parte al Pleistoceno (Embleton y King, 1975) y su origen se asocia principalmente al descenso de la temperatura (T) atmosférica que tuvo lugar durante los periodos glaciares del Cuaternario. El calentamiento posterior durante los periodos interglaciares provoca el descongelamiento parcial del permafrost, liberando gases de efecto invernadero a la atmósfera. Esta fusión podría desencadenar un mecanismo

de realimentación positiva con efectos no deseados para la humanidad. Por ello, un buen conocimiento de la distribución y del comportamiento del permafrost, además de facilitar la adaptación de las actividades que se desarrollan sobre él, podría favorecer su preservación, minimizando así su contribución al calentamiento global. Además del interés que presenta en la Tierra, gran parte de los datos sobre el permafrost tienen una aplicación directa en estudios de geología planetaria, como ya se está comprobando en el planeta Marte.

El objetivo principal de este trabajo es dar a conocer los aspectos básicos del permafrost, su dis-

tribución y algunas estructuras asociadas al mismo, o a ambientes fríos con congelamiento estacional, de manera que los docentes, una vez reconocida su importancia, consideren la posibilidad de incluir su estudio tanto en los programas de Secundaria Obligatoria como en los de Bachillerato.

QUÉ ES EL PERMAFROST Y DÓNDE SE ENCUENTRA

Fue a principios del siglo pasado, en el Congreso Geológico Internacional de Estocolmo de 1910, cuando Lozinski (1912) introduce el concepto “*ambiente periglacial*” para referirse al clima y a los procesos geomorfológicos de las áreas periféricas a los hielos pleistocenos. Medio siglo más tarde, la Academia rusa (Akademija Nauk, 1960) rompe la relación que se había establecido entre ambientes fríos y glaciares ampliando el concepto a zonas con suelo congelado alejadas de hielo descubierto. Sin embargo, son muchos los autores que, con posterioridad a Lozinski, continúan aplicando el término “*periglacial*” para referirse a los procesos y a las formas no glaciares de climas fríos independientemente de su proximidad, temporal o espacial, a los glaciares (Washburn, 1973). En la actualidad, dentro del medio periglacial se incluye el medio con permafrost, refiriéndose este último a las zonas con el suelo congelado ya sea en superficie o a una cierta profundidad. El término permafrost es definido por la IPA (International Permafrost Association; Everdingen, 1998) como “suelo, en sentido amplio, que permanece a una temperatura inferior a 0 °C al menos durante dos años consecutivos”. Algunos autores (e.g. Haeberli *et al.*, 2006) se refieren al permafrost como “las condiciones térmicas del suelo, a 0 °C o por debajo, durante un mínimo de uno o, mejor, dos años” independientemente del contenido en hielo o de la litología. La condición de los dos años consecutivos se introdujo para evitar confundirlo con un suelo congelado por un invierno especialmente duro. En general, el permafrost se suele asociar con hielo que puede presentarse de forma intersticial, ocupando poros o, de forma más masiva, dando lentes, cuñas y venas. Si a pesar de las bajas temperaturas, por ausencia de humedad, no se forma hielo, se denomina entonces “permafrost seco”; la presencia de sales, que rebajan el punto de congelación del agua, también permite que esta se encuentre en estado líquido por debajo de 0 °C, como sucede en el lago Don Juan Pond, el de mayor contenido en sal de la Tierra y localizado en la Antártida, que permanece líquido a T de -40 °C (Dickson *et al.*, 2016). En estos casos se aplica el término criótico para referirse al material que, a pesar de encontrarse a una T inferior a 0 °C, permanece sin congelar (Everdingen, 1998).

En el Hemisferio Norte, el permafrost ocupa cerca de un 25% de las tierras emergidas y su potencia puede llegar a superar localmente los 1400 m o tener solamente 0,1 m (Heginbottom *et al.*, 2012). Este permafrost se encuentra en Alaska (un 90% de su superficie tiene permafrost por debajo), Siberia (un 60% de la superficie de la actual Rusia), Canadá (50% de la superficie), Escandinavia y Tíbet (también denominado “el tercer polo”). En el Hemisferio

Sur afecta a las zonas elevadas, como los Andes de Sudamérica y los Alpes de Nueva Zelanda, y a las zonas de la Antártida no cubiertas por el hielo glaciar. El permafrost que se encuentra en zonas montañosas de latitudes bajas se conoce como “permafrost de montaña” y tiene una especial relevancia por el papel que desempeña en el desarrollo de las actividades humanas localizadas en su proximidad.

Dependiendo del área afectada por el permafrost se distinguen varios tipos: *permafrost continuo*, cuando el 90-100% de la superficie presenta un suelo permanentemente congelado; *permafrost discontinuo* (entre el 50% y el 90%); *permafrost esporádico* (10-50%) y *permafrost aislado* (menos de un 10%) (Heginbottom *et al.*, 1993). Respecto a la temperatura, en las regiones boreales, puede variar entre menos de -10 °C (permafrost muy frío) y 1 o 2 grados por debajo de cero (permafrost templado). En zonas de permafrost discontinuo, la temperatura media anual cerca de la superficie puede ser algo superior a -2 °C, mientras que en zonas de permafrost continuo las temperaturas medias son mucho más bajas (por ejemplo, en Canadá se han obtenido datos de -14 °C; Burn, 2015).

CÓMO Y CUÁNDO SE HA FORMADO EL PERMAFROST: SU ESTRUCTURA

La temperatura de la superficie de la Tierra varía a lo largo del año, dependiendo en parte de la latitud y de la altitud. Estas variaciones se relacionan principalmente con dos fuentes de energía: la solar, que procede del exterior y calienta la Tierra desde la superficie (puede cambiar la radiación que emite el Sol o la cantidad de radiación que alcanza la superficie dependiendo de varios factores) y la geotérmica, con una influencia menor, que la calienta desde el interior. Se sabe que, a lo largo del tiempo geológico, la cantidad de energía solar que alcanza la superficie del planeta no ha sido constante; los últimos 2,6 millones de años se han caracterizado por una alternancia de etapas frías (glaciares) y etapas cálidas (interglaciares). Este lapso de tiempo, denominado Periodo Cuaternario (de acuerdo con la Tabla Cronoestratigráfica de la Asociación Española para el Estudio del Cuaternario, AEQUA), ha sido subdividido en Pleistoceno y Holoceno. A grandes rasgos, el Pleistoceno comprende el tiempo en el que se produjo la sucesión de periodos glaciares e interglaciares, mientras que el Holoceno, que se extiende desde hace 10 000 años hasta la actualidad, se corresponde con el último postglaciar.

Durante los periodos fríos, cuando la temperatura media anual es inferior a 0 °C, la pérdida de calor del suelo hacia la superficie hace que este se congele hasta una profundidad que excede a la de fusión en los momentos más cálidos; el permafrost existe porque el calor del verano es insuficiente para alcanzar la base del suelo congelado. Un frío continuado, como el que se produce durante los periodos glaciares, provoca que el suelo pierda más calor del que recibe; una vez formado, el permafrost puede ir aumentando de potencia hasta llegar a alcanzar varios cientos de metros. Por ello, gran parte del permafrost actual es heredado de las etapas glaciares del Cuaternario.

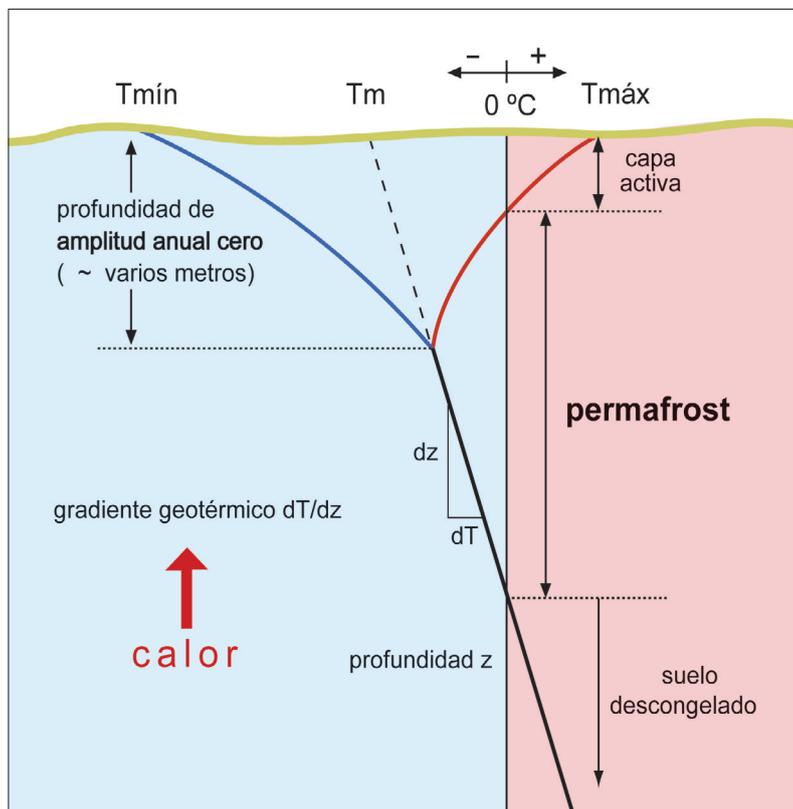


Fig.1. Perfil de temperaturas del suelo a diferentes profundidades. El perfil del verano, a la derecha, corresponde a las temperaturas más altas que se registran en superficie, mientras que el perfil de la izquierda corresponde a las más bajas. En profundidad, estos perfiles se intersectan; por debajo de este punto las temperaturas no están afectadas por los cambios que se producen en la atmósfera. Es posible que algunos datos caigan fuera de estas curvas, especialmente en zonas próximas a la superficie; en el caso de que esto se repitiera, el resultado final sería una modificación de la curva para esta zona. Así, en un planteamiento simplista, un calentamiento global haría que estas curvas se desplazaran hacia la derecha, aumentaría el espesor de la capa activa y el punto de intersección de la curva en profundidad con la línea de $T 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ subiría, disminuyendo la potencia del permafrost. Basado en Andersland y Ladanyi, 2003.



Fig. 2. Lago Baikal (Sur de Siberia, Rusia). Ladera con soliflucción en la isla de Olkhon; movimiento lento, ladera abajo, asociado a procesos de congelamiento-descongelamiento de la capa activa. En invierno, las bajas temperaturas hacen que la superficie del lago se congele, permitiendo la circulación de vehículos que abastecen a las poblaciones de la orilla.

Las oscilaciones de temperatura que tienen lugar en el suelo, provocadas por las variaciones estacionales en la superficie, son progresivamente atenuadas en profundidad. Con el registro de estas variaciones durante varios años, se construye el gráfico denominado “curva en trompeta”, debido a su forma (Fig. 1), que representa las temperaturas medias extremas que se pueden encontrar a cualquier profundidad. Cuando la influencia de la temperatura de la superficie deja de sentirse, cosa que ocurre a una profundidad de entre unos centímetros y varios metros, el único factor a tener en cuenta es el gradiente geotérmico: la temperatura media del suelo en superficie enlaza con el gradiente geotérmico en profundidad. En los periodos en los que la temperatura del aire aumenta, el permafrost se descongela desde la parte superior y desde la inferior. La capa superior del suelo que se congela y descongela estacionalmente se conoce como “capa activa”. Aún se podría considerar un tercer nivel “la zona de transición”, que es una capa intermedia localizada entre la capa activa, que queda por encima, y el permafrost estable, que queda por debajo; se funde esporádicamente y, si bien cumple las condiciones para ser incluida dentro del permafrost, se podría considerar como parte de la capa activa debido a su temperatura variable.

Tanto la potencia de la capa activa como la del permafrost dependen de las condiciones locales, de la topografía, de las características del suelo (como el contenido en materia orgánica o el contenido en humedad), del tipo y distribución de la vegetación, de la cubierta de nieve y de la existencia de masas de agua en la zona. Una cubierta vegetal densa, lo mismo que una capa de nieve caída a principios del invierno, ejercen un efecto aislante, no permitiendo que salga el calor del suelo cuando empiezan a bajar las temperaturas del aire y retrasando, o impidiendo, su congelamiento.

Las variaciones de temperatura en las zonas periglaciares se traducen en diferentes patrones en el suelo que en conjunto se conocen como suelos estructurados (Washburn, 1973). El congelamiento y descongelamiento de la capa activa puede dar lugar a bandas, polígonos, círculos y redes, con clasificación por tamaños o sin ella. En áreas con una cierta pendiente se pueden generar deslizamientos, procesos de soliflucción y glaciares rocosos; otras estructuras, como pingos y palsas, se localizan principalmente en regiones de latitudes elevadas.

Hay algunas formas que, aunque pueden estar relacionadas con el permafrost, también pueden indicar un congelamiento estacional. Se trata generalmente de microrrelieves, como los lóbulos de soliflucción (Fig. 2) o las terrazas con frente de bloques, o de patrones en la vegetación, como los suelos almohadillados y las terracitas. El reconocimiento de estos indicadores puede sugerir la presencia de un permafrost, si bien su ausencia no constituye un indicador de que no este no exista.

Por otro lado, durante una glaciación, gran parte del agua de los océanos se encuentra almacenada en los continentes en forma de hielo. Esto provoca un descenso del nivel del mar dejando expuestas las plataformas continentales que de esta forma pierden calor (Osterkamp y Burn, 2002). Este es el

origen del permafrost submarino, que se formó durante la última glaciación cuando el nivel del mar bajó unos 100 m con respecto a la posición actual. Por debajo de glaciares fríos, el suelo congelado puede alcanzar una potencia variable, entre 100 m y 1 km (Majorowicz, 2012), por lo que el permafrost que afecta a zonas deglaciadas podría ser heredado o de nueva formación. Se supone que el permafrost más frío y profundo ha podido sobrevivir a varios periodos interglaciares.

El permafrost de montaña

Además del permafrost de las zonas cercanas a los polos, hay otro relacionado principalmente con la altitud, presente incluso en latitudes bajas: el permafrost de montaña, también llamado permafrost alpino. Debido a que no siempre resulta sencillo de observar, este no fue investigado sistemáticamente hasta principios de la década de los 70 del pasado siglo, a pesar de que las excavaciones hechas en zonas montañosas a menudo revelaban un suelo congelado, que sin embargo no se reconocía como permafrost (Haerberli *et al.*, 2010).

En la formación de este tipo de permafrost hay tres factores importantes: el clima, la topografía y las condiciones del suelo (Gruber y Haerberli, 2009). La topografía controla las condiciones microclimáticas de una zona, que son además modificadas por las propiedades del suelo y por su influencia en la transferencia del calor. En principio, un indicador de la existencia de permafrost de montaña es que la temperatura media anual en el aire sea inferior a $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hay que tener en cuenta que, en zonas de montaña húmedas, el cinturón periglacial puede encontrarse reducido ya que parte de la superficie puede estar cubierta por hielo glaciar (Fig. 3). En general, el límite regional del permafrost se encuentra a menor altitud según aumenta la continentalidad de la zona, aunque algunos lugares como los Alpes del Sur en Nueva Zelanda no parecen seguir este modelo (Sattler *et al.*, 2014).

Si se compara con el permafrost de elevadas latitudes, el de montaña muestra una distribución espacial mucho más compleja, pues está muy influenciado por los microclimas, por la granulometría de los materiales de superficie y por la distribución de la cubierta de nieve. Durante el invierno, la temperatura del suelo es mayor que la de la capa de aire cercana al mismo, por lo que una capa de nieve, con efecto aislante, reduciría la convección impidiendo su enfriamiento. Un depósito de bloques (como los que se encuentran en la superficie de los glaciares rocosos) reduce el efecto aislante de la nieve en primavera, y cuando, a comienzos del invierno, la temperatura del aire empieza a ser inferior a la del suelo, la convección es más eficaz que si se tratara de materiales finos con huecos pequeños entre ellos. Esta capa de materiales gruesos, además de actuar como un buen transmisor del enfriamiento, ejerce un efecto aislante evitando que penetre el calor de la superficie. También un alto contenido en hielo puede retrasar el calentamiento del permafrost y, por ello, su degradación (el paso de hielo a agua líquida consume 80 cal g^{-1}).

Desde un punto de vista morfológico, el permafrost de montaña se caracteriza por la presencia de



Fig. 3. Ladera del Volcán Avachinski, Península de Kamchatka, a unos 2300 m de altitud en el mes de agosto. El hielo que se observa en primer plano se encuentra sobre un suelo congelado (permafrost). Al fondo, hielo glaciar con grietas transversales formadas al aumentar la pendiente por la que se desliza.

diferentes formas de reptación, entre las que destacan los glaciares rocosos (Fig. 4). Se puede definir un glaciar rocoso como un conjunto de derrubios congelados que se desplazan por gravedad ladera abajo (Wahrhaftig y Cox, 1959) con velocidades que oscilan entre 1 y 100 cm a^{-1} ; este movimiento puede ser actual o pasado. Al tratarse de un permafrost reptante, puede invadir zonas originalmente no congeladas, con lo que las altitudes de los frentes no siempre reflejan condiciones iguales en la temperatura en el aire. Por ello, para algunos autores, más que la altura alcanzada por los frentes de los glaciares rocosos, lo que tiene un especial significado es la altitud de los puntos en los que estos se inician, es decir, el lugar en el que comienza la reptación haciendo que los derrubios se separen del talud (por ejemplo, Humlum, 2000). Se han citado glaciares rocosos formados por materiales de diferentes litologías (rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas)

Fig.4. Glaciar rocoso en las proximidades del Paso de Agua Negra (San Juan, Argentina), $30^{\circ}13'39''\text{S}$ $69^{\circ}48'39''\text{O}$. El elevado ángulo de los taludes laterales y del frente indica que se trata de una forma activa. Las aguas de fusión alimentan el Arroyo del Agua Negra, que pasa por la población de San José de Jachal.



y en entornos que varían desde zonas muy próximas al mar (ej. Isla de Livingstone, Svalbard) a zonas con clima continental (ej. Karakorum, Himalayas). Y aunque no son las únicas estructuras que se presentan en zonas de montaña con permafrost, sí son las más sencillas de reconocer en ambientes antiguos por su tamaño y por su amplia distribución.

La rápida respuesta a los cambios climáticos del permafrost de montaña, además de la importancia que tiene para las actividades humanas en zonas próximas al mismo, lo hace especialmente interesante. Así, por ejemplo, Argentina ha incluido los glaciares rocosos (la principal expresión en superficie del permafrost de montaña) en el Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial (2010). Su elevado contenido en hielo los hace especialmente valiosos en el control de las reservas hídricas de la cordillera, ya que se considera que el principal aporte a las cuencas procede de la fusión estacional de su capa activa. Hay zonas próximas a la cordillera, como las provincias de Mendoza o de San Juan, con una gran dependencia de este aporte de agua de la capa activa de los glaciares rocosos para el desarrollo de su agricultura.

RELACIÓN DEL SER HUMANO CON EL PERMAFROST

En el caso del permafrost circumpolar, cualquier tipo de construcción, que a menudo conlleva la destrucción de la vegetación original, debe realizarse procurando minimizar los cambios en las condiciones térmicas del suelo. Las infraestructuras en terrenos congelados como oleoductos, edificios, vías de comunicación (carreteras, raíles) etc, y también las explotaciones mineras a cielo abierto, requieren diseños especiales para prevenir la fusión del permafrost y así evitar los dos procesos más frecuentes asociados a estas construcciones: la elevación por congelamiento y el asentamiento por fusión. Las zonas con un permafrost templado y rico en agua requieren una atención especial. Lo mismo sucede en áreas de permafrost discontinuo, en las que es muy importante cartografiar con precisión su distribución espacial.

Para minimizar los efectos negativos, además de tener en cuenta el tipo de material que va a estar en contacto con el suelo congelado (Fig. 5), se recurre principalmente a dos estrategias: añadir algún sistema de enfriamiento (colocación de termosifones, construcción de pedraplenes o el uso de conductos de ventilación) o simplemente elevar las construc-

Fig. 5. Postes del tendido eléctrico al sur de Ulán Bator, Mongolia. El hormigón es uno de los materiales de construcción más utilizados en regiones frías; con una porosidad del 10%, o inferior, su permeabilidad es similar a la de la arcilla. La crioadhesión es más baja en el hormigón que en la madera, disminuyendo, de esta forma, el levantamiento del poste por congelamiento-descongelamiento del suelo.



ciones separándolas del suelo (edificaciones sobre pilotes, puentes secos). También se pueden combinar medidas, como en el caso del oleoducto que atraviesa Alaska de norte a sur que se apoya sobre termopilotes; su función, además de sujetar los conductos a una cierta altura, es disipar el calor del suelo ayudando a evitar la fusión del permafrost.

Termosifones

Son extractores pasivos del calor del suelo que actúan cuando la temperatura del aire es inferior a la del terreno (Wagner, 2014). Las formas originales se desarrollaron en Alaska en 1965 con el fin de preservar los cimientos en un permafrost templado. En el oleoducto que une el Océano Ártico con el golfo de Alaska, que con 1287 km atraviesa todo el estado, se colocaron más de 124 000 termosifones para estabilizar el permafrost. El gas del interior del termosifón está encerrado bajo presión, pudiendo coexistir dos fases: líquido y gas (Fig. 6). En invierno, cuando la temperatura del aire es inferior a la del suelo, el gas que se encuentra en la parte alta se condensa y desciende. El aire frío hace que disminuya la presión del gas, provocando que el fluido de la parte baja se evapore. Este intercambio de calor se produce mientras la temperatura del aire se mantiene inferior a la del suelo. Además de su relativa fragilidad, los termosifones necesitan un especial cuidado durante el transporte y colocación, presentan el inconveniente de que, una vez colocados y pasado un tiempo, requieren mantenimiento (se realiza un seguimiento de su funcionamiento mediante imágenes térmicas).

Pero no solo se utilizan en el enfriamiento del suelo alrededor o a lo largo de una infraestructura, tam-

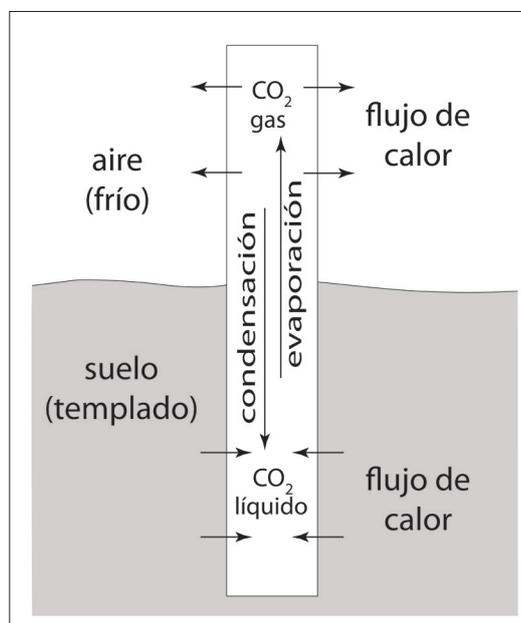


Fig. 6. El termosifón actúa como un extractor del calor. Una parte del termosifón, relleno con dióxido de carbono o con amoníaco, debe estar enterrada en el suelo, de donde extrae el calor mientras la T del aire sea inferior a la de este. En la parte inferior, el calor entra desde el suelo al termosifón, produciendo la evaporación del gas, mientras que en la parte superior el calor es liberado a la atmósfera haciendo que el gas se condense y descienda. Basado en Wagner, 2014.

bién sirven para construir barreras artificiales en zonas frías, creando balsas de residuos que impiden la circulación de contaminantes, de origen industrial o minero.

Pedraplenes y taludes con ventiductos

La mayor parte de los taludes, tanto en carreteras como en vías de ferrocarril elevadas, están formados por áridos de granulometrías variables. En áreas con permafrost, es recomendable que los tamaños elegidos permitan que existan poros entre ellos para que el aire circule libremente y pueda penetrar entre la estructura de manera que, por convección natural, el aire caliente salga al exterior. Dado que la conductividad térmica del aire es baja, una capa de rocas no compactadas, en la que los contactos entre los clastos son pequeños, actúa como aislante térmico. En la parte superior se puede añadir una capa impermeable que impida la entrada de agua, pero que permita la circulación del aire.

En algunas carreteras de Alaska, como la Thompson Drive cerca de la Universidad de Fairbanks, para conseguir el enfriamiento necesario del suelo, se han combinado termosifones horizontales, que extraen el calor en invierno, con taludes con convección de aire. En invierno, cuando el aire de los poros en la parte alta está más frío que el de los poros que se encuentran por debajo, este asciende, transportando el calor hacia arriba, mientras que el aire frío desciende aumentando el efecto del enfriamiento producido por los termosifones (Goering, 2005). Parte de esta carretera se construyó en invierno, cuando el suelo estaba congelado. El material se fue colocando en capas finas, dando tiempo para que cada capa se congelara antes de colocar la siguiente; de este modo se evitó introducir calor en el permafrost, algo que a menudo sucede cuando se construye en verano.

Otra medida adicional consiste en colocar conductos transversales a los pedraplenes (a modo de tuberías huecas), de manera que el aire circule por debajo y así se pueda extraer más calor. La efectividad aumenta si se sitúan a niveles bajos y si las paredes de estos conductos están perforadas, facilitando el intercambio de calor con el pedraplén (Cheng *et al.*, 2008). Dado que el aire puede circular en los dos sentidos, conviene colocar un sistema de cierre (manual o automático) para evitar la entrada de aire en las épocas de más calor. Haciéndolo de este modo, los ventiductos constituyen una buena solución para preservar el permafrost.

Puentes secos y construcciones sobre pilotes

Una de las obras más importantes realizadas sobre permafrost, por su tamaño y por su complejidad, es la línea de ferrocarril entre Qinghai (en China) y Lhasa, la capital de Tibet. Entre los recursos empleados para evitar la fusión del suelo, se construyeron puentes secos, uno de los métodos más drásticos, y caros, que se pueden usar en la estabilización del permafrost. Aproximadamente la mitad del trayecto que une las ciudades de Golmud y Lhasa, inaugurada en 2006, discurre sobre permafrost; gran parte de este es especialmente sensible ya que se trata de un permafrost templado, según se puede apreciar en la cartografía realizada por Jin *et al.* (2008) y rico en hielo. Para evitar su fusión, además del uso de



numerosos termosifones con amoniaco, similares a los empleados en la Trans-Alaska Pipeline, para extraer el calor del suelo, se construyeron un total de 675 puentes, algunos con el único propósito de alejar el tren de la superficie del terreno, sin necesidad de que fuera necesario salvar un curso de agua. Con ello se consigue alejar una fuente de calor del suelo y además, como el puente proporciona sombra, se contribuye a bajar su temperatura.

En el caso de edificaciones sobre pilotes, la elevación de estos debe tener en cuenta el tamaño de la construcción: el hueco entre el suelo y la base del edificio debe aumentar proporcionalmente al volumen del mismo (Fig. 7). El objetivo es dejar un hueco por el que circule libremente el aire, disipando el calor y permitiendo el enfriamiento del suelo en el invierno y favoreciendo la evaporación de una posible acumulación de agua en el verano. Es importante que este espacio esté libre de objetos con el fin de evitar la acumulación de nieve traída por el viento, ya que debido a su efecto aislante no permitiría la salida del calor si bajaran las temperaturas del aire.

Además de estas medidas, existen otras más agresivas para construir sobre el permafrost. Se puede eliminar el suelo congelado y sustituirlo con algún tipo de material que no sea susceptible de congelamiento o bien fundir el permafrost antes de comenzar la construcción. En todos los casos, es necesario hacer un estudio local del comportamiento del permafrost y de la capa activa a largo plazo, antes de tomar una decisión sobre el método más adecuado para cada zona.

CONSECUENCIAS DE LA FUSIÓN DEL PERMAFROST

Un ascenso de la temperatura atmosférica en la Tierra provocaría un aumento de la potencia de la capa activa (al descender su límite inferior o límite superior del permafrost), un aumento de la profundidad del punto de amplitud anual cero y/o un ascenso de la temperatura del permafrost a esta profundidad de amplitud cero. Suponiendo un gradiente geotérmico sin variaciones, al aumentar la temperatura del permafrost su límite inferior subiría.

*Fig. 7. Edificación próxima al lago Husvol, en el noroeste de Mongolia. Está elevada sobre el suelo, con los bordes abiertos para que el aire circule por debajo libremente, permitiendo que, a comienzos de la estación fría, el calor pueda salir del suelo para que este se congele. (De acuerdo con Brown *et al.*, 1997, el Lago Husvol se encuentra en una zona de permafrost continuo).*

Por tanto, un clima más cálido no solo haría bajar el límite superior del permafrost sino que también haría subir su límite inferior.

En zonas costeras del Ártico la fusión del permafrost, junto con la disminución del hielo marino, está provocando el retroceso de las líneas de costa por erosión, afectando a las construcciones, incluso a poblaciones, situadas a la orilla del mar. La erosión también afecta a los márgenes de los ríos, antes congelados. Al actuar el permafrost como una capa impermeable, se pueden producir encharcamientos en zonas llanas (termokarst, especialmente si se trata de un permafrost rico en hielo), provocar la desestabilización de la vegetación (bosques borrachos) o el colapso de estructuras como construcciones o vías de comunicación.

En zonas de montaña (donde se localiza aproximadamente un tercio del permafrost mundial), la fusión aumentaría la inestabilidad de las laderas y con ello la probabilidad de avalanchas de rocas, de deslizamientos y de coladas de barro. En este caso, el relieve facilita que estos fenómenos alcancen zonas bajas desprovistas de permafrost. Por ello, los mapas de riesgos para infraestructuras lineales (carreteras, ferrocarril, oleoductos/gaseoductos o tendidos eléctricos) que se encuentran en los fondos de los valles deberían tener en cuenta estos hechos (Permafrost, 2014). Por otro lado, se produciría un cambio en los recursos hídricos, tan importantes para las zonas secas.

Las previsiones para el Ártico contemplan un aumento de las temperaturas y de las precipitaciones. En verano, una mayor humedad en la materia orgánica provocaría un aumento de la conductividad térmica del suelo, favoreciendo la fusión del permafrost. En muchas zonas como las turberas, el permafrost constituye un almacén natural de materia orgánica y tanto en la costa como en las plataformas continentales del ártico, el permafrost contiene hidratos de metano. Hope y Schaefer (2016) estiman que en el permafrost hay almacenadas 1700 gigatoneladas de carbono que, con la fusión, sería liberado a la atmósfera como dióxido de carbono y metano. Estos gases de efecto invernadero provocarían un calentamiento de la atmósfera, que a su vez haría subir las temperaturas de la superficie causando una fusión aún mayor. Sería un mecanismo de alimentación positivo.

Uno de los mayores almacenes de carbono congelado lo constituye el yedoma de Siberia, depósitos cuaternarios mayoritariamente eólicos asociados a la glaciación. Es un gran reservorio de materia orgánica; almacena principalmente raíces de herbáceas y huesos de animales. Para que la acción bacteriana provoque la descomposición de esta materia orgánica ni siquiera es necesario que se produzca la fusión del permafrost; varios autores, entre otros Vishnivetskaya *et al.* (2006), han demostrado que algunas bacterias se encuentran activas a temperaturas inferiores a 0 °C. La subsidencia asociada a un descongelamiento del yedoma provocaría la formación de lagos. Bajo el agua, la descomposición del carbono tiene lugar en condiciones anaerobias, produciéndose metano que se libera a la atmósfera en forma de burbujas. En un escenario extremo, casi todo el yedoma estaría descongelado para finales del s. XXI (Zimov *et al.*, 2006).

Además de los efectos negativos en la atmósfera y en el suelo, el agua liberada del permafrost contribuiría al ascenso del nivel del mar asociado a la fusión del hielo glaciar y a la expansión térmica debida al calentamiento del agua.

Respecto a los efectos sobre las poblaciones animales y vegetales, la fusión asociada a un calentamiento, en áreas con permafrost rico en hielo, generaría grandes cambios en los ecosistemas de la zona. Osterkamp y Burn (2002) indican varios efectos entre los que se encontrarían la destrucción de algunos hábitats y creación de otros, especialmente para aves y mamíferos acuáticos asociados a la aparición de terrenos con termokarst.

Se ha calculado en 43 billones de dólares americanos (lo que equivaldría a 43 *trillion dollars*, en nomenclatura americana) el coste de los impactos que tendría en la agricultura, en los ecosistemas y en la salud las emisiones asociadas a la fusión del permafrost para finales de este siglo (Hope y Schaefer, 2016). Y no se trata solo de cifras hipotéticas; los habitantes de las regiones próximas al Polo Norte ya están pagando los costes del descongelamiento del suelo. El estadio de invierno de Iqaluit fue cerrado en 2003, al poco tiempo de haberse inaugurado, porque el suelo se estaba hundiendo; la reparación costó 2,2 millones de dólares canadienses y no pudo ser utilizado de nuevo hasta 2010 (CBC News, 2011).

Técnicamente se podría construir previendo una variación de T de hasta 4 °C, pero los costes serían tan elevados que no se contempla como la mejor opción para las zonas con permafrost.

APLICACIONES EXTRAPLANETARIAS

El uso de análogos terrestres es una de las claves para la interpretación de las formas superficiales en otros planetas. Es el caso de la comparación entre algunas formas erosivas y depósitos encontrados en Marte y otros terrestres; estos análisis están aportando datos sobre, entre otros aspectos, el clima, la atmósfera y la distribución de agua (o de salmueras) en ese planeta.

Las imágenes que recibimos de Marte han ido mejorando de calidad en los últimos años. HIRISE (High Resolution Imaging Science Experiment), una cámara de alta resolución en funcionamiento desde 2006, obtiene fotografías desde la órbita marciana con gran detalle, entre 0,25 m y 1,3 m/pixel. Existen imágenes de otras cámaras, algunos pares estereoscópicos, e incluso datos altimétricos, que complementan las fotos de HIRISE y que están siendo estudiadas por equipos muy diversos.

Con apoyo de estas técnicas, ya se han detectado en el planeta Marte formas que pueden ser atribuidas a la existencia de un permafrost, presente o pasado. La especial atención que se presta al permafrost marciano tiene que ver en parte por el interés en la posibilidad de vida extraterrestre en su superficie donde confluyen los factores de agua e insolación (Haeberli *et al.*, 2006). Las imágenes enviadas por la cámara HIRISE, entre otras, recogen suelos poligonales y diferentes depósitos con muestras de flujo, en los que se distinguen crestas y surcos transversales y longitudinales, e incluso formas superpuestas que podrían

indicar más de una fase (ej. 38° 50' S 97° 30' E). Algunos autores los interpretan como glaciares rocosos (Piatek *et al.*, 2007), aunque otros opinan que también podrían tratarse de glaciares cubiertos de derrubios (Banks *et al.*, 2008; Head *et al.*, 2010).

En 2014 tuvo lugar la octava Conferencia Internacional sobre Marte. En estas reuniones, que empezaron a celebrarse en 1973, se recogen los avances que se están realizando sobre el conocimiento del planeta y si bien aún quedan muchas dudas por resolver, parece que la comparación entre las imágenes de Marte y los análogos de la Tierra están dando buenos resultados.

EL PERMAFROST EN LAS AULAS

Tanto el permafrost, como la geomorfología periglacial no aparecen recogidos en los currículos de muchos países, entre otros España; esto sucede incluso en EE.UU. (Klene *et al.*, 2002), donde las áreas con permafrost o que experimentan congelamiento estacional son relativamente importantes. Existen excepciones, como en Alaska, donde los estudiantes y la población en general lo conocen, ya que se convive estrechamente con él. En los años 90, la mítica serie de TV “Doctor en Alaska” (cuyo título original “Northern exposure” resulta más sugerente para el tema que estamos tratando), además de mostrar las calles embarradas durante la primavera, cuando la capa activa empieza a fundir y el agua no puede filtrarse debido a que los niveles inferiores aún permanecen congelados, hacía referencia directa al congelamiento del suelo. En uno de los capítulos se producía un fallecimiento más de los que habían previsto para ese invierno y, ante la imposibilidad de excavar una nueva tumba en ese momento, se vieron obligados a guardar el cadáver en un almacén -por otro lado un congelador perfecto- hasta la entrada de la primavera, cuando las T del aire subirían de nuevo por encima de 0 °C.

Dentro de la Educación Secundaria, y también en el Bachillerato, se propone incluir el permafrost como parte de la “Hidrosfera” (diferenciando entre agua líquida y criosfera), en el bloque de contenidos “La Tierra en el Universo”. La criosfera, a su vez, se puede dividir en tres apartados: 1. nieve y hielo glaciar, 2. hielo periglacial y 3. hielo marino. Además de los aspectos generales sobre el permafrost (se podrían seguir los apartados recogidos en este trabajo) se puede completar el tema con el análisis morfológico de una zona geográficamente próxima y, por ello, conocida por el alumnado. El enfoque que se muestra a continuación, para la Cordillera Cantábrica, es extensible a otras cordilleras de la Península Ibérica.

Un ejemplo de paleopermafrost: la Cordillera Cantábrica

Cuando en una cordillera se encuentran formas periglaciares inactivas o relictas, como los glaciares rocosos, cuya formación no puede ser explicada por el clima actual, se pueden deducir condiciones pasadas de permafrost.

Los glaciares rocosos son las mesoformas periglaciares más frecuentes en toda la Península Ibérica;



ca; han sido reconocidos en Pirineos (por ejemplo, Chueca Cia, 1991; Serrano *et al.*, 1999), en el Sistema Central (Pedraza Gilsanz y Carrasco, 2006, entre otros) o en Sierra Nevada (por ejemplo, Gómez Ortiz *et al.*, 2013). En la Cordillera Cantábrica existen numerosos glaciares rocosos fósiles (Alonso, 1989; Menéndez Duarte y Marquínez, 1996; Redondo Vega *et al.*, 2010), formados principalmente por derrubios cuarcíticos de la Formación Barrios, de edad cambro-ordovícica (Fig. 8), siendo menos frecuentes los formados por otras litologías (Gómez-Villar *et al.*, 2011). Aunque se encuentran principalmente en laderas con orientaciones frías (entre NO y NE), existe una gran variedad de formas en cuanto a tamaño y tipo, desde *protalus ramparts* (formas incipientes, también conocidas como morrenas de nevero, localizadas al pie de taludes de derrubios) a glaciares rocosos en lengua (que se extienden ladera abajo separándose de los frentes rocosos). Su distribución altitudinal también es variada, situándose los frentes de la mayoría por encima de los 1500 m (para la obtención de imágenes aéreas, se sugiere consultar el SIGPAC). En esta cordillera, Rodríguez-Rodríguez *et al.* (2016) dataron mediante isótopos cosmogénicos un glaciar rocoso en el sector central (San Isidro) obteniendo una edad aproximada de 15,7 ka y deduciendo, con ello, la existencia de un permafrost para finales del Pleistoceno. En un trabajo anterior, Alonso & Trombotto Liaudat (2009), basándose en la distribución altitudinal y el desarrollo de varias formas en sector del occidente de la cordillera, atribuyen la formación de los glaciares rocosos no solo al Tardiglacial (finales del Pleistoceno), cuando pudieron coexistir con glaciares de circo durante la deglaciación, sino a uno o más criómeros (periodos fríos) durante el Holoceno, lo que parece indicar que las condiciones de permafrost en esta zona no se encuentran muy alejadas en el tiempo.

En la actualidad, el medio periglacial en la Cordillera Cantábrica se restringe a una dinámica importante de la capa superior del suelo con congelamiento estacional. Son frecuentes las formas de soliflucción, proceso que afecta a la parte más superior del suelo y que, como ya se ha comentado, se

Fig. 8. Glaciar rocoso fósil al sureste del Muxivén, 2027 m (Cordillera Cantábrica). En la parte más alta, el glaciar rocoso, con crestas y surcos longitudinales, enlaza con el talud de derrubios mientras que su frente muestra las características crestas y surcos transversales.

Fig. 9. **a** Terracitas formadas en cuarcitas arenizadas en una ladera orientada al N de la Sierra de Sentiles (San Isidro, Cordillera Cantábrica), a una altitud aproximada de 1900 m. Los procesos de congelamiento y descongelamiento de la parte superior del suelo contribuyen al movimiento de este ladera abajo. La vegetación herbácea retiene en parte el suelo dando origen a formas en media luna escalonadas.



b. Ladera orientada al suroeste de Peña Rueda (Macizo de las Ubiñas, Cordillera Cantábrica), a una altitud aproximada de 2100 m. Se aprecia la curvatura de la vegetación relacionada con el empuje del suelo, en este caso sobre un sustrato calcáreo.



manifiesta principalmente como lenguas de soliflucción, bloques aradores y terracitas (Fig. 9). Por ello, habría que diferenciar en el relieve formas inactivas y relictas (también denominadas fósiles) que suelen ser las de mayor tamaño y más fáciles de identificar, y formas activas que indicarían que, al menos, hay procesos de congelamiento y descongelamiento de la parte superior suelo en la actualidad (Fig. 10).

Una actividad para realizar en el aula

En relación con el elevado número de glaciares rocosos en la Cordillera Cantábrica, se propone una actividad que podría ser realizada por los alumnos de Bachillerato. Utilizando las ortofotos de la página del SIGPAC, se trataría de calcular las orientaciones y la altitud a la que se encuentran los frentes (más fáciles de reconocer por el alumnado que las zonas de raíz) de un conjunto de glaciares rocosos localizados en las proximidades del Puerto de San Isidro, en el cordal que se extiende entre el Pico Tono (43°2'57"N 5° 23'26" W) y el Pico Nogales (43°3'19"N 5° 28'32" W) y representar estos datos

en un diagrama en rosa. Para simplificar el trabajo, se pueden reducir las orientaciones a ocho cuadrantes. Se podrá comprobar como predominan las orientaciones NO y NE y como los datos de altitud presentan una dispersión pequeña. Para facilitar este trabajo, se pueden consultar las Figs. 2 y 10 de Gómez-Villar *et al.*, 2011.

CONCLUSIONES

Existe un gran desconocimiento del permafrost entre las personas que viven en latitudes medias de nuestro planeta. Sin embargo, numerosos trabajos científicos y las experiencias de las poblaciones que conviven con el mismo muestran su importancia, especialmente en el caso de que las temperaturas globales continúen en ascenso.

El impacto que tendría su fusión, incluso aunque no fuera total, sobre las infraestructuras antrópicas, su contribución al aumento de los gases de efecto invernadero y al ascenso del nivel del mar, aconsejan el seguimiento de su distribución y de los posibles cambios tanto en superficie como en profundidad, así como de sus variaciones de temperatura. Tampoco se deberían olvidar las alteraciones que se producirían en la distribución de especies animales y vegetales, con los consiguientes desequilibrios ecológicos.

Un estudio profundo del permafrost, su comportamiento y las estructuras asociadas a este permitirán en un futuro contrarrestar con mayor eficacia los posibles efectos del calentamiento y ampliar las aplicaciones que ya está teniendo en los estudios de geología planetaria, además de facilitar el diseño, la construcción y el mantenimiento de las estructuras realizadas sobre él.

La importancia del permafrost, y de las consecuencias que pueden derivarse de su evolución futura, justificaría su estudio tanto en la Educación Secundaria Obligatoria, dentro del bloque "La Tierra en el Universo (Hidrosfera)" como en el Bachillerato, donde podría incluirse en el bloque "Procesos Geológicos Externos".

AGRADECIMIENTOS

A Rosana Menéndez Duarte y a un revisor anónimo cuyos comentarios contribuyeron a mejorar este trabajo.



Fig. 10. Los huecos formados en torno a los clastos gruesos son un buen indicador de congelamiento. Por debajo de los clastos, con una conductividad térmica mayor que la del suelo que los rodea, y por la humedad que contiene el mismo, se forman cristales de hielo que los van empujando hacia arriba; durante la fusión, el hueco dejado por el hielo es ocupado por los materiales más finos que impiden que el clasto vuelva a su posición original. Además, durante el congelamiento, los materiales finos, con un mayor contenido en agua, se expanden. Al descongelarse disminuye su volumen provocando el "despegue" de este material alrededor de los clastos. Cordillera Cantábrica, mes de enero.

RECURSOS EN INTERNET

Con el fin de simplificar el acceso a la información existente en la red sobre el permafrost, se incluyen algunas direcciones con un pequeño comentario sobre su contenido.

http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml. Panel Intergubernamental sobre el cambio climático (en español)

<http://www3.epa.gov/climatechange/kids/impacts/signs/permafrost.html>. Guía para estudiantes sobre el cambio climático (en inglés)

<http://www.scienceinschool.org/2012/issue22/permafrost>. Science in School, The european journal for science teachers. Generalidades sobre el permafrost dentro del apartado Ciencias de la Tierra (en inglés, francés o alemán)

<http://ipa.arcticportal.org/> Página de la International Permafrost Association (en inglés)

<http://www.amap.no/swipa> Página con vídeos sobre el Ártico (comentados en inglés o francés, entre otros idiomas)

<https://nsidc.org/> National Snow and Ice Data Center (en inglés)

https://nsidc.org/fgdc/maps/ipa_browse.html Mapa del permafrost en el hemisferio norte

<http://permafrost.gov.yk.ca/permafrost101/> En esta página están los enlaces a todos los episodios de Tunnel Man (el permafrost explicado con sentido del humor por un profesor especialista que vive en Alaska) y a otros recursos (textos en inglés)

<https://www.youtube.com/watch?v=lxixy1u8GjY> Permafrost- what is it? Video de 13 minutos de duración, en el que se explica lo que es el permafrost, las consecuencias de su fusión y el seguimiento que se está haciendo del mismo (en inglés)

BIBLIOGRAFÍA

Akademija Nauk (1960). Fundamental concepts and terms in geocryology. *Permafrost studies. Corps of Engineers, U.S. Army, translations*, 28, 11 pp.

Alonso, V. (1989). Glaciares rocosos fósiles en el área Degaña-Leitariegos (Occidente de Asturias, Cordillera Cantábrica). *Cuaternario y Geomorfología*, 3, 9-15.

Alonso, V. y Trombotto Liaudat, D. (2009). Periglacial geomorphology of El Miro area, Cantanbrian Mountains, NW Spain. *Z. Geomorpho. N.F.*, 53, 335-357.

Andersland O.B y Ladanyi, B. (2003). *Frozen ground engineering*. The American Society of Civil Engineers and John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. 384 pp.

Banks, M.E., McEwen, A.S., Kargen, J.S., Baker, V.R., Strom, R.G., Mellon, M.T., Gulick, V.C., Keszthelyi, L., Herkenhoff, K.R., Pelletier, J.D. y Windly, L.J. (2008). High Resolution Imaging Science experiment (HiRISE) observations of glacial and periglacial morphologies in the circum-Argyre Planitia Highlands, Mars. *J. of Geophys. Res.*, 113, E12015, doi:10.1029/2007JE002994.

Brown, J., Ferrians, O.J., Heginbottom, J.A. Jr, Melnikov, E.S. (editores) (1997). Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. Washington, DC: U.S. Geological Survey in Cooperation with the Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources. *Circum-Pacific Map Series CP-45*, scale 1:10,000,000, 1 sheet.

Burn, Ch. (2015). Permafrost. Circumpolar Status Report: Canada. *The Circle, WWF Magazine*, 4, 11.

CBC News (2011). <http://www.cbc.ca/news/canada/north/thawing-permafrost-sinks-buildings-hikes-costs-in-north-1.1108686>. Última consulta 3 de febrero de 2016.

Cheng, G., Sun, Z. y Niu, F. (2008). Application of the roadbed cooling approach in Qinhai-Tibet railway engineering. *Cold Regions science and technology*, 53, 241-258.

Chueca Cia, J. (1991). Análisis de la distribución espacial de los glaciares rocosos en el Pirineo Central oscense. *Geographicalia*, 28, 85-100.

Dickson, J.L., Head, J.W. y Levy, J.S. (2016). Austral winter imaging of Don Juan Pond, Antártica: polar desert brine flow al -40 °C on Earth and implications for Mars. *47th Lunar and Planetary Science Conference*, 1545 pdf.

Embleton, C. y King, C.A.M. (1975). *Periglacial Geomorphology*. Edward Arnold, Londres. 203 pp.

Everdingen van, R.O. (Ed.) (1998). *Multi-Language glossary of permafrost and related ground-ice terms*. International Permafrost Association. (revised 2005).

Goering, D.J. (2005) Thompson Drive Test permafrost Protection Measures. *Alaska EPSCoR, Fall 2005*, 2-3.

Gómez Ortiz, A., Palacios, D., Palade, B., Vázquez Selem, L., Franch, F.S., Tanarro García, L.M. y Oliva Franganello, M. (2013). La evolución glaciar de Sierra Nevada y la formación de glaciares rocosos. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 61. 139-162

Gómez-Villar, A., R.B. González-Gutiérrez, J.M. Redondo-Vega y J. Santos-González (2011). Distribución de glaciares rocosos relictos en la Cordillera Cantábrica. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 37, 49-80.

Gruber, S y W. Haeberli (2009). *Mountain permafrost*. En: Margesin, R. (ed). Permafrost soils. Berlin. Springer, 33-44.

Haeberli, W., Hallet, B., Arenson, L., Elconin, T., Humlum, O., Kääb, A., Kaufmann, V., Ladanyi, B., Mat-suoka, N., Springman, S. y Vonder Mühl, D. (2006). Mountain permafrost- research. *Permafrost and Periglacial Processes*, 17, 189-214.

Haeberli, W., Noetzli, J., Arenson, L., Delaloye, R., Gärtner-Roer, I., Gruber, S., Isaksen, K., Kneisel, C., Krautblatter, M. y Phillips, M. (2010). Mountain permafrost: development and challenges of a young research field. *Journal of Glaciology*, 56 (200), 1043-1058 (special issue).

Head, J.W., Marchant, D.R., Dickson, J.L., Kress, A. M. y Baker D.M. (2010). Northern mid-latitude glaciation in the Late Amazonian period of Mars: Criteria for the recognition of debris-covered glacier and valley glacier landsystem deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 294, 306-320.

Heginbottom, J.A., Brown, J., Melnikov, E.S., y Ferrians, O.J. Jr. (1993). Circumartic Map of Permafrost and Ground Ice Conditions. *Permafrost: Sixth International Conference. South China University Press*, vol. 2, 1132-1136.

Heginbottom, J.A., Brown, J., Humlum, O. y Svensson, H. (2012). Permafrost and Periglacial Environments. *U.S. Geological Survey, Professional Paper 1396. Suplemental Criosfere Note* 6. 2 pp.

Hope, Ch. y Schaefer, K. (2016). Economic impacts of carbon dioxide and methane released from thawing permafrost. *Nature Climate Change*, 6, 56-59.

Humlum, O. (2000). The Geomorphic Significance of Rock Glaciers; estimates of rock glacier debris volumes and headwall recession rates in W. Greenland. *Geomorphology*, 35, 41-67.

Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial: Fundamentos y Cronograma de Ejecución (2010). Centro Científico Tecnológico -CONICET, Mendoza, 86 pp.

Jin, H., Wei, Z., Wang, S., Yu, Q., Lü, L., Wu, Q. y Yi, Y. (2008). Assessment of frozen-ground conditions for engi-

neering geology along the Qinghai-Tibet highway and railway, China. *Engineering Geology*, 101, 96-109

Klene, A.E., Nelson, F.E., Nevins, J., Rogers, F. y Shiklomanov, I. (2002) Permafrost science and secondary education: direct involvement of teachers and students in field research. *Geomorphology*, 47, 275-287.

Lozinski, W. von (1912). Die periglaziale Fazies der mechanischen Verwitterung. *Comptes Rendus, XI Congres Internationale Geologie*, Stockholm 1910, 1039-1053.

Majorowicz, J. (2012). Permafrost at the ice base of recent Pleistocene glaciations - Inferences from borehole temperature profiles. *Bulletin of Geography – Physical Geography Series*, 5, 7-28

Menéndez Duarte, R. y Marquínez, J. (1996). Glaciarismo y evolución postglaciar de las vertientes en el Valle de Somiedo. *Cordillera Cantábrica. Cuaternario y Geomorfología*, 10, 21-31.

Osterkamp, T.E. y Burn, C.R. (2002). *Permafrost*. En: Holton, J.R., J. Pyle y J.A. Curry (eds.). *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. New York Academic Press, 1717-1729.

Pedraza Gilsanz, J. de y Carrasco, R.M. (2006). El glaciarismo pleistoceno del Sistema Central. *Enseñanza de las ciencias de la tierra*, 13, 278-288.

Permafrost (2014). *Impacts of permafrost thaw in mountains*. Disponible en <http://carleton.ca/permafrost/workshop-mountain-permafrost/>. Última consulta 20 de enero de 2016.

Piatek, J.L., Hardgrove, C. y Moersch, J.E. (2007). Potential Rock Glaciers on Mars: Comparison with Terrestrial Analogs. *Seventh International Conference on Mars*.

Redondo Vega, J.M., Gómez-Villar, A., González-Gutiérrez, R.B. y Santos González, J. (2010). *Los glaciares rocosos de la Cordillera Cantábrica*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de León, León. 171 pp.

Rodríguez-Rodríguez, L., Jiménez-Sánchez, M., Domínguez-Cuesta, M.J., Rinterknecht, V., Pallàs, R. y Bourlès, D. (2016). Chronology of glaciations in the Cantabrian Mountains (NW Iberia) during the Last Glacial Cycle based on in situ-produced ¹⁰Be. *Quaternary Science Reviews*, 138, 31-48.

Sattler, K., Mackintosh, A., Anderson, B., Norton, K. y de Rósite, M. (2014). A permafrost distribution estimate for the Southern Alps, New Zealand, inferred from topoclimatic conditions at rock glaciers sites. *Geophysical research Abstracts*. 16, EGU2014-4665, 2014.

Serrano, E., Agudo, C. y Martínez de Pisón, E. (1999). Rock glaciers in the Pyrenees. *Permafrost and Periglacial Processes*, 10, 101-106.

SIGPAC. <http://sigpac.mapa.es/feqa/visor/> Última consulta 20 de febrero de 2016.

Vishnivetskaya T.A., Petrova, M.A., Urbance, J., Ponder, M., Moyer, C.L., Gilichinsky, D.A. y Tiedje, J.M. (2006). Bacterial Community in Ancient Siberian Permafrost as Characterized by Culture end Culture-Independent Methods. *Astrobiology*, 6, 3, 400-414.

Wagner, A. M. (2014). *Review of Thermosyphon Applications*. U.S. Army Corps of engineers, Washington D.C., 37 pp.

Wahrhaftig, C. y Cox, A. (1959). Rock glaciers in the Alaska Range. *Geol. Soc. Am. Bulletin*, 70, 383-436.

Washburn, A.L. (1973). *Periglacial Processes and Environments*. Edward Arnold, London. 320 pp.

Zimov, S.A., Schuur, A.G. y Chapin, F.S.III (2006). Permafrost and the Global Carbon Budget. *Science*, 312, 1612-1613. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 10 de septiembre de 2016 y aceptado definitivamente para su publicación el 3 de octubre de 2016.