

# DEGRADACIÓN DE HIELO FÓSIL Y PERMAFROST Y CAMBIO CLIMÁTICO EN SIERRA NEVADA

ANTONIO GÓMEZ ORTIZ<sup>1</sup>, FERRAN SALVADOR FRANCH<sup>1</sup>,  
JOSÉ J. SANJOSÉ BLASCO<sup>2</sup>, DAVID PALACIOS ESTREMERAS<sup>3</sup>,  
MARC OLIVA FRANGANILLO<sup>4</sup>, MONTSERRAT SALVÀ CATARINEU<sup>1</sup>,  
LUIS M. TANARRO<sup>3</sup>, JOSÉ M. RASO NADAL<sup>1</sup>, ALAN ATKINSON GORDO<sup>2</sup>,  
LOTHAR SCHULTE<sup>1</sup>, JOSÉ A. PLANA CASTELLVÍ<sup>1</sup>,  
BENEDITA MILHEIRO SANTOS<sup>1</sup> Y DAVID SERRANO GINÉ<sup>5</sup>

## RESUMEN

El Corral del Veleta (Sierra Nevada, 37°N 3°W, 3.150 m. de altitud), instalado en el nivel de cumbres del Parque Nacional de Sierra Nevada, es un antiguo circo glaciar que durante la Pequeña Edad del Hielo albergó un pequeño foco glaciar del que se tienen noticias escritas desde el siglo XVII. Este glaciar mantuvo restos de hielos hasta mediados del siglo XX. En 1998 no eran ya visibles pero aún persistían vestigios junto con *permafrost* discontinuo atrapados bajo mantos de bloques.

Los análisis y la interpretación de resultados obtenidos apuntan a que el estado físico y evolución del hielo relicto y *permafrost* se encuentran en proceso de degradación. Así se ha determinado a partir de la monitorización de un incipiente glaciar rocoso asentado sobre el techo de las masas heladas referidas. Los datos obtenidos de los controles anuales realizados durante el periodo 2007-2009 de la temperatura de la capa activa, grado de recubrimiento nival del suelo, movimientos del cuerpo del glaciar rocoso y prospecciones geofísicas realizadas (tomografía eléctrica) de su interior vienen a indicar la paulatina merma del hielo relicto y *permafrost* atrapados.

Los procesos que explican esta degradación se suceden en cadena a partir de la radiación externa que incide en el suelo en verano, que es cuando las temperaturas son más elevadas. En efecto, cuando esta radiación logra la fusión progresiva de la nieve se opera el progreso de la onda expansiva térmica en el seno de la capa activa del suelo pudiendo alcanzar el techo de las masas heladas (hielo fósil relicto y *permafrost*), que degrada y funde. En todo este proceso encadenado también la circulación de las aguas de fusión desempeñan un cometido muy destacado al actuar como trasmisoras de calor. De esta manera se explica la subsidencia y el reajuste continuado que experimenta todo el paquete clástico, así como la fusión del techo helado en el que se asienta. Esto sucede en verano y en pocas semanas.

Las razones de estos acontecimientos climáticos y geomorfológicos deben tener su explicación en las actuales condiciones climáticas que dominan las cumbres de Sierra Nevada, que resultan poco propi-

<sup>1</sup> Departamento de Geografía física y Análisis Geográfico Regional. Universidad de Barcelona.

<sup>2</sup> Departamento de Expresión Gráfica. Escuela Politécnica. Universidad de Extremadura.

<sup>3</sup> Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía física. Universidad Complutense de Madrid.

<sup>4</sup> Departamento de Geografía-Centro de Estudios Geográficos/IGOT. Universidade de Lisboa.

<sup>5</sup> Departamento de Geografía. Universidad Rovira i Virgili (Tarragona).

cias al mantenimiento de nieves en el suelo durante el verano y que pudieran estar relacionadas con variaciones recientes del clima iniciadas a partir de mediados del siglo XIX y más notorias desde la segunda mitad del siglo XX.

**Palabras clave:** Corral del Veleta, Sierra Nevada, monitorización, degradación de hielo glacial, *permafrost*.

## SUMMARY

The Corral del Veleta (Sierra Nevada, 37°N 3°W, 3150 m.asl) is an ancient glacial cirque that during the Little Ice Age hosted a small glacier spot, of which historical documents give written evidence since the XVII century. This glacier did not completely melt until mid-XX century. In 1998 no masses of glacial ice were visible but remains of them were trapped under blocks, together with permafrost. The Corral del Veleta is the only site in Sierra Nevada hosting remains of relict ice masses.

The analysis and interpretation of the results obtained during these years suggest that the physical state and evolution of relict ice and permafrost are experiencing a process of degradation. This has been inferred from the monitoring of a rock glacier lying on the referred ice masses. Data of the annual monitoring activities carried out during the 2007-2009 period (thermal evolution of the active layer, degree of snow cover in the ground, displacements of the rock glacier and geophysical surveys through electrical tomography) reveal the gradual decline in volume of the relict ice and permafrost trapped there.

Feed-back processes explaining this degradation are initiated by the incident radiation affecting the ground in summer, when temperatures are higher. Indeed, when this radiation melts the snow, the transmission of external energy goes through the active layer producing positive temperatures even on the top of the frozen masses (relict ice and permafrost), which tend to melt. Actually, this process is reinforced by the snow-melting waters flowing through the active layer, which have a very prominent role to act as heat transmitters. Thus, the subsidence and continuous adjustment detected by measuring the clastic package is explained, as well as the melting of the top ice in which it sits. This process happens in summer and in only very few weeks.

The causes of these climatic geomorphological events lie on the present-day climate conditions existing today in the high lands of Sierra Nevada which are not conducive to the duration of the snow throughout the summer. They may be related to recent climate fluctuations, probably owing to a temperature increase since the second half of the XIX century.

**Key word:** Corral del Veleta, Sierra Nevada, monitoring, glacial ice degradation, *permafrost*.

## INTRODUCCIÓN

Sierra Nevada (España) conforma un robusto macizo de edad alpina instalado en el sureste de la península Ibérica distante del Mediterráneo unos 35 km. En sus cumbres albergó los glaciares cuaternarios y los focos glaciares de la Pe-

queña Edad del Hielo más meridionales de Europa (Figura 1). De estos últimos destacó el del circo del Corral del Veleta (3.150 m, 37°N, 3°W), instalado en la cabecera del valle del Guarnón, en orientación norte. Este enclave está labrado en micasquistos feldespáticos paleozoicos muy afectados por la tectónica alpina (SANZ DE GALDEANO *et al.*, 1999).



**Figura 1.** Nivel de cumbres de Sierra Nevada y localización y detalle del Corral del Veleta (ortofoto y vuelo de 2008 de la Junta de Andalucía).

**Figure 1.** High lands in Sierra Nevada and location of the Veleta cirque (aerial photo and flight from 2008, Government of Andalusia).

La fijación del Corral del Veleta en Sierra Nevada coincide en la línea de cumbres máximas, en su extremo occidental, siempre por encima de los 3.000 m (picacho del Veleta, 3.398 m). Las condiciones climáticas que imperan en esta parte cimera de la Sierra son las de alta montaña de latitudes subtropicales, muy influenciada por el Mediterráneo. El total pluviométrico anual es de 778 mm y 4,4°C de temperatura media anual (en cota de 2.550 m). En cuanto a cumbres (>3.300 m) se registran valores térmicos entre los -0,41 y -1,49°C de media anual. Se trata de una montaña fría y seca caracterizada por una estación invernal muy larga con importante innivación, que contrasta con un verano corto y árido.

Acerca de las formas de relieve de estos tramos cimeros de la Sierra señalar que son glaciares, destacando los circos que, en su desarrollo, tendieron a reducir antiguas superficies de erosión somitales coronadas, actualmente, por figuras geométricas periglaciares (Figura 1). El interior de los circos, donde la crioclástia desmorona las paredes rocosas, se caracteriza por la existencia de glaciares rocosos y cubetas de sobreexcavación, convertidas, algunas de ellas, en lagunas. En el conjunto de la montaña, siempre por encima de los 2.650 m, como cota media, actualmente los procesos morfogenéticos crionivales imperan (com-

binación de frío, hielo, viento y nieve) significando graves inconvenientes a la formación de suelos y al arraigo de la vegetación, donde tiende a conformar pastizales psicroxerófitos de bajo porte y disposición abierta, como sucede en el denominado piso crioromediterráneo (p.e. *Festuca pseudoeskia*, *F. clementei*, *Artemisia granatensis*, etc.) (MOLERO MESA *et al.* 1992).

### Origen del hielo fósil o relicto y permafrost de Sierra Nevada

El hielo fósil o relicto y el *permafrost* que aún perdura en Sierra Nevada es herencia de la Pequeña Edad del Hielo (siglos XIV-XIX). Durante este periodo frío histórico, atestiguado a partir de fuentes documentales históricas (GÓMEZ ORTIZ *et al.*, 2009; RODRIGO *et al.*, 2012), registros palinológicos (ESTEBAN AMAT, 1996), así como también registros sedimentológicos (OLIVA *et al.*, 2012), Sierra Nevada estaría dominada por un régimen climático diferente al actual, sobre todo en temperaturas, que podrían haber sido entre 1,16 y 1,43°C más bajas que las actuales (GÓMEZ ORTIZ *et al.*, -in press-) lo que supondría mayor tramo altitudinal bajo condiciones crionivales que el que actualmente presenta. Estas circunstancias climáticas propiciaron el desarrollo de pequeños

focos glaciares en las cabeceras de los altos valles que se distribuyeron, mayoritariamente, a ambos lados del cordal cimero de la Sierra, entre el Picón de Jéres (3.090 m) y la cabecera del valle de Lanjarón (3.168 m), siempre por encima de los 2.900 m. Acerca de la existencia de estos focos glaciares la documentación de época, a partir del siglo XVII, es precisa, como también lo ha sido recientemente el estudio de los sedimentos lacustres de la laguna de la Mosca, en la Hoya del Mulhacén (OLIVA *et al.*, 2012). Del conjunto de focos glaciares que debió existir (MADOZ, 1849), el más importante fue el recluido en el Corral del Veleta, que perduró hasta la segunda mitad del siglo XX (GARCÍA SAINZ, 1947) y del que se tiene noticia precisa desde el siglo XVIII. Entonces fue descrito por PONZ (1797) así: “... el propincuo llamado Corral del Veleta, nombre ajustado a sus proporciones, por ser una profundidad ancha y cerrada de tajos muy peynados sin entrada por parte alguna, caxon ambicioso de nieve, que se cree guarda la primera que cayó después del Diluvio, reducida a piedra, pues estando abierto hacia el Norte, aquí es yelo lo que es nieve en otros lugares; y nunca se derrite más que la superficie, que es lo que el Sol le des-

ubre”. Sin embargo, fue BOISSIER (1837) quien lo calificó como glaciar: “El glaciar tiene una pendiente muy inclinada, su altura perpendicular tiene 200 a 300 pies, su ancho más o menos 600 pasos (...) Tiene la peculiaridad de ser el único en toda la Sierra y el más meridional de Europa: debe su formación a su posición, en el fondo de un circo abrigado y dominado en todas partes por las altas cumbres donde las tormentas barren la nieve en invierno (...) presenta en miniatura todos los caracteres de los glaciares alpinos, hendiduras, hielo impuro, morrenas fangosas...”. Y BIDE (1893), ya lo recoge como tal en su cartografía de síntesis de los valles de Sierra Nevada (Figura 2).

A partir de las últimas décadas del siglo XIX el foco glaciar del Corral del Veleta, al igual que el resto de otros focos de Sierra Nevada, entró en proceso de reclusión quedando arrinconados sus hielos, progresivamente, hacia el tercio oriental de la base del Corral (GÓMEZ ORTIZ *et al.*, 2003). Una de las últimas referencias de estos hielos glaciares se debe a SOLÉ SABARIS (1942) y GARCÍA SAINZ (1947) que informan de sus reducidas dimensiones y características físicas. A partir de la segunda mitad del siglo XX los restos de hielos debieron quedar progresivamente atrapados bajo los paquetes de bloques desprendidos de la pared del Corral del Veleta evolucionando todo el cuerpo glaciado hacia glaciar negro y derivar luego en glaciar rocoso, pudiéndose clasificar éste como *glacier-derived rock glaciers* (HUMLUM, 2000; JONHSON, 1987; FORT, 2003).

En la actualidad, en el Corral del Veleta no hay restos visibles de aquellos hielos glaciares, pues permanecen atrapados bajo manto clástico desprendido. Pero, sin embargo, la funcionalidad morfogénica que en él predomina puede considerarse como paraglaciar, muy particularmente en su tercio

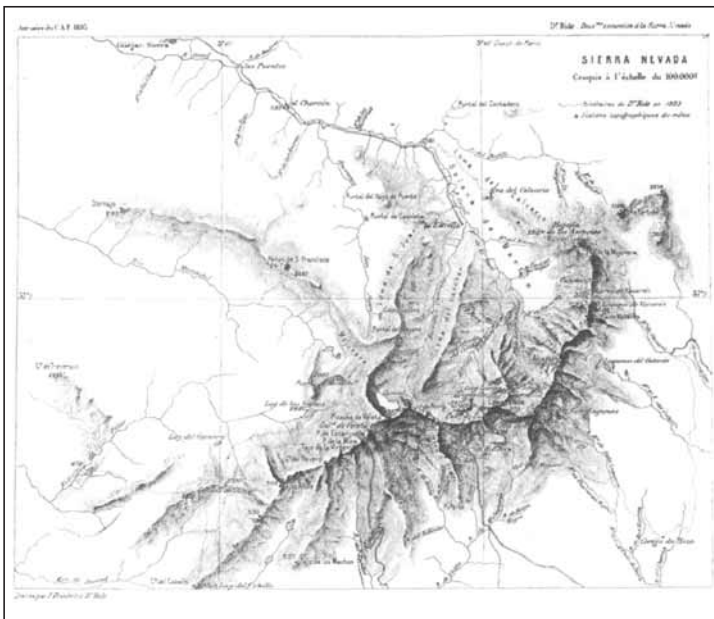


Figura 2. Esquema de los cordales cimeros y valles adyacentes de Sierra Nevada (BIDE, 1893).

Figure 2. Highest arêtes and valleys in Sierra Nevada (BIDE, 1893).



oriental, en la base y talud detrítico contiguo, que es donde las masas heladas aún persisten y donde los procesos asociados a la fusión de la nieve y degradación de niveles de *permafrost* o «lentejones» de hielo atrapado entre los derrubios generan inestabilidad (GÓMEZ ORTIZ, *et al.*, 2008; TANARRRO *et al.*, 2010, 2012), como sucede en otros sectores de montañas recién deglaciadas de diferentes latitudes (JAHN, 1967; Mc ROBERTS & MORGENSTERN, 1974; HARRIS, 1987; CHRISTIANSEN, 1998; PALACIOS, *et al.*, 2003).

## OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El objetivo central que se plantea en este estudio es determinar el proceso degradativo del hielo fósil relictivo y *permafrost* instalado en el tercio oriental del Corral del Veleta (Figura 3), así como sus parámetros desencadenantes durante el periodo 2008-2011.

Para determinar estos hechos se seleccionó el glaciar rocoso incipiente formado a partir de la segunda mitad del siglo XX, con masas de hielo fósil y *permafrost* en su seno (altitud media: 3.106 m; dimensiones: 129,6 m de longitud, 37,5 m de anchura, 8 m de espesor medio y superficie areal, 3.815 m<sup>2</sup>), instalado en la base del Corral del Veleta, entre el lagunillo del Corral y el declive del cerro de los Machos (Figura 4). De

este glaciar rocoso se ha venido monitorizando sistemáticamente su evolución morfogenética a partir del control de:

- a) Régimen térmico del suelo.
- b) Grado de recubrimiento nival en verano.
- c) Desplazamiento de los bloques que recubren las masas heladas, a partir de puntos fijos.
- d) Caracterización geofísica de las masas heladas internas.



Figura 3. Panorámica del conjunto del Corral del Veleta.

Figure 3. Panoramic view of the Veleta cirque.



Figura 4. Base del Corral del Veleta e indicación del glaciar rocoso en su tercio oriental.

Figure 4. Base of the Veleta cirque and location of the rock glacier in its eastern fringe.

Todos estos controles se han llevado a cabo anualmente durante las mismas fechas del verano (última semana de agosto), desde el 2001 hasta el 2011, ininterrumpidamente, aunque en esta ocasión interesa resaltar los resultados del periodo 2008-2011. La caracterización geofísica se realizó sólo en 2009.

En cuanto a la metodología que se utilizó hay que resaltar que participa de técnicas procedentes de diferentes disciplinas siendo complementarias entre sí, pues los resultados que se aportan tienden a converger en objetivos comunes: explicar el proceso de degradación de las masas heladas.

Los datos térmicos del suelo se obtuvieron a partir de sensores autónomos tipo *datalogger* (UTL-1, UTL-2 y HOBO) dispuestos en el interior del suelo del glaciar rocoso (3.107 m) a diferentes profundidades (superficie, -5 cm, -20 cm, -50 cm y -150 cm). También se registraron temperaturas del suelo y del aire del entorno del Corral del Veleta (collado de los Machos, 3.297 m, Albergue Universitario 2.500 m y picacho del Veleta, 3.380 m). Todos los datos fueron depurados y tratados estadísticamente.

El desplazamiento de bloques asentados sobre las masas heladas subyacentes se realizó a través del seguimiento de 27 puntos fijos (varillas) distribuidos por toda la superficie del glaciar rocoso (tramo frontal 6, tramo medio 13, tramo final 8). Para determinar el desplazamiento planar y vertical de ellos se sirvió de técnicas geomáticas con instrumentación de estación topográfica total y GPS, referenciado en los vértices geodésicos cercanos (picacho del Veleta, 3.398 m).

El grado de recubrimiento nival del suelo en verano se obtuvo a partir de pares de fotografías digitales captadas desde puntos diferenciados (vistas oblicua y vertical), convenientemente corregidas y tratadas con programa CAD MicroStation y programa de SIG ArcMap (módulo georeferencing).

Y en cuanto a la prospección geofísica del cuerpo interno del glaciar rocoso se realizó a partir de tomografía eléctrica con equipo ABEM SAS 4000,

cables Lund, y espaciado medio entre electrodos de 2.5 m.

## DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS MÁS RELEVANTES

Los resultados obtenidos de las diferentes campañas de control efectuadas, que cubren el periodo 2008-2011, permiten resaltar ideas clave de gran interés científico. De ellas, se eluden detalles particulares por haber sido expuestos con anterioridad (p.e.: GÓMEZ ORTIZ *et al.*, 2008; TANARRO *et al.*, 2010; SALVADOR FRANCH *et al.*, 2010, 2011; SANJOSÉ BLASCO *et al.*, 2007, 2011).

### Ritmo térmico del suelo del glaciar rocoso

El ritmo térmico de la capa activa del glaciar rocoso del Corral del Veleta sigue un patrón de conducta fijo caracterizado por cuatro episodios repetitivos a lo largo del año (Figura 5):

- a) Largo episodio frío con temperaturas negativas y suelo permanentemente helado (H). Se inicia en septiembre-octubre y perdura hasta mediados de junio.
- b) Corto episodio con temperaturas positivas muy moderadas y suelo deshelado (D). Su duración se estima en torno a siete semanas y coincide en la segunda mitad del verano.
- c) Dos episodios muy cortos que actúan de tránsito entre los anteriores durante los que se opera el cambio de signo en las temperaturas del suelo:
  - De positivas a negativas entre octubre y noviembre (T1).
  - De negativas a positivas a partir de mediados de junio (T2).

Como dato significativo de este patrón térmico hay que subrayar que el deshielo del suelo a partir de los 1,5 m de profundidad (presumible-

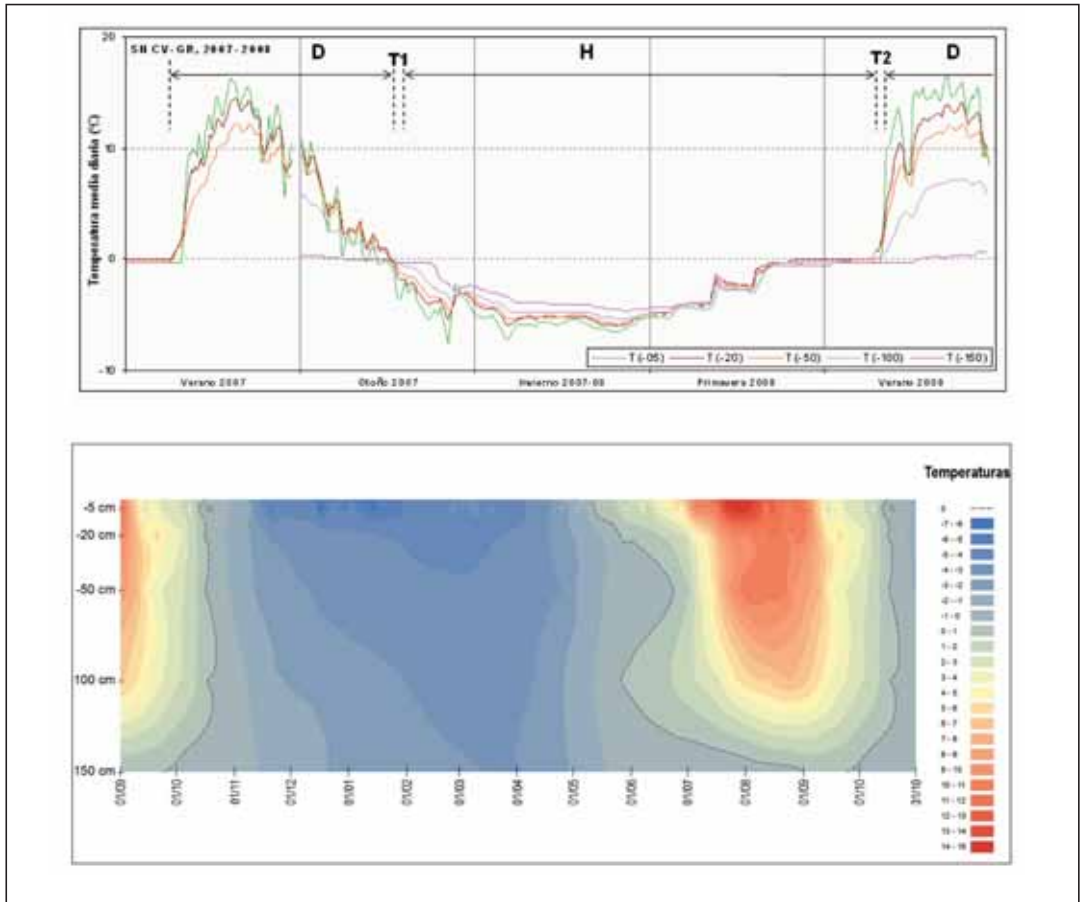


Figura 5. Ritmo anual de las temperaturas en el suelo en el seno del glaciar rocoso.

Figure 5. Annual ground temperatures in the rock glacier.

mente cercano al techo de las masas heladas) se opera durante un corto periodo de tiempo, siempre centrado en verano, mayoritariamente a partir de mediados de julio-septiembre, cubriendo un lapso medio de 49 días. Durante ellos los valores térmicos se instalan entre  $0,7^{\circ}\text{C}$  y  $-2,5^{\circ}\text{C}$ . A esta profundidad (1,5 m), la temperatura media anual se fija en torno a  $-1,4^{\circ}\text{C}$ .

Acerca de las temperaturas del interior del suelo y del aire en los alrededores del glaciar rocoso del Corral del Veleta (collado de los Machos, 3397 m y Albergue Universitario, 2500 m, respectivamente) hay que señalar que el patrón térmico resultante es similar al detectado en la capa activa

del glaciar rocoso referido, más en el collado de los Machos y levemente modificado en el Albergue Universitario. Las diferencias más significativas que se detectan entre ellos son:

*Collado de los Machos (temperatura interior del suelo) y glaciar rocoso (temperatura de la capa activa)*

Mayor homogeneidad y duración de valores negativos en el glaciar rocoso frente a continuada oscilación térmica en el collado de los Machos. El ritmo térmico es similar a lo largo del año entre ambos.

Los datos en tales puntos de observación se explican por la permanencia de la nieve en el suelo. Más prolongada sobre el glaciar rocoso y menos en el collado de los Machos. La razón de ello estriba en que el Corral del Veleta, donde se inscribe el glaciar rocoso, está afectado por una sobrealimentación nival, favorecida por su orientación y morfotopografía. En cambio, el collado de los Machos es enclave sumido a la acción persistente del viento, lo que permite definirlo como paraje sometido a desnivación repetitiva.

### *Albergue Universitario (temperatura del aire) y glaciar rocoso (temperatura de la capa activa)*

Mayor oscilación térmica en todos los meses en el Albergue Universitario frente a más homogeneidad en el seno del glaciar rocoso. Mayor duración de temperaturas negativas en el glaciar rocoso que en el Albergue Universitario. El ritmo térmico anual mantiene curva similar en ambos puntos pero a partir de valores muy diferenciados.

Los contrastes entre estos puntos de observación se explican, sobre todo, porque se trata de valores referidos al aire (Albergue Universitario, 2500 m) e interior de la capa activa (glaciar rocoso, 3107 m) y, además, porque ambos puntos se instalan en diferentes altitudes (desnivel de 606 m).

### *Picacho del Veleta*

También se disponen de datos de la temperatura del interior del suelo del picacho del Veleta. Los controles térmicos se han realizado con sensores autónomos tipo UTL-1 instalados en el seno de una perforación de 114,5 m, realizada en el año 2000 en el substrato del picacho del Veleta, a 3380 m. El tramo analizado cubre 11 puntos de los primeros 60 m. en los niveles de -0,2, -0,6, -1,2, -2,60, -4, -7, -10, -13, -15, -20 y -60 m con frecuencia de toma de temperatura cada dos horas. El periodo de observación que referimos abarca desde 2007 hasta 2010. Del análisis de los datos obtenidos ahora interesa destacar lo siguiente:

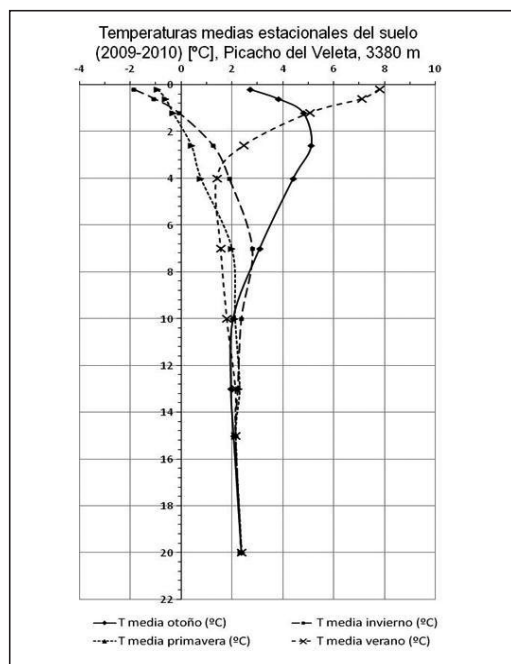
1. En todo el perfil analizado no existe temperatura negativa constante.

2. La penetración estacional de la onda térmica externa en el seno de la perforación alcanza profundidades entre -15 m y -20 m. Por debajo de ellos la temperatura tiende a mantenerse constante.

3. La mayor amplitud térmica anual del perfil muestreado se ha registrado a una profundidad de -20 cm alcanzando un valor de  $22,6^{\circ}\text{C}$ , siendo también significativas las estacionales hasta los -10 m (fig. 6).

4. Durante el periodo de 2006-2009 el sensor fijado a 60 m de profundidad ha registrado pequeñas variaciones térmicas entre  $2,38$  y  $2,61^{\circ}\text{C}$  y desde enero de 2010 las temperaturas se han situado constantemente en los  $2,61^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, éste último valor debe contemplarse con prudencia debido al margen de error de la instrumentación.

5. Los controles realizados muestran ausencia de *permafrost* en el sondeo del picacho del Veleta



**Figura 6.** Comportamiento térmico estacional (picacho del Veleta).

**Figure 6.** Seasonal ground thermal conditions in the Veleta peak.



(3.380 m) frente a la existencia que éste ofrece en el seno del Corral del Veleta (3.100 m). Ello podría deberse a:

a) La presencia de *permafrost* en el seno del Corral del Veleta es herencia del hielo fósil glaciar relicto de la Pequeña Edad de Hielo.

b) La desaparición y fusión temprana de la cubierta nival por efecto del viento y de la insolación contribuyen a la inexistencia de *permafrost* en el picacho del Veleta, frente a su mantenimiento en el fondo del Corral del Veleta, donde la mayor persistencia de las acumulaciones de nieve propicia continuadas temperaturas negativas en profundidad, como se ha demostrado en los Alpes suizos orientales (LUETCHG *et al.*, 2004).

c) La configuración morfotopográfica del edificio del Veleta favorece la eficacia de la radiación en el suelo y paredes, obstaculizando la presencia de temperaturas negativas en el sustrato.

### Desplazamiento del glaciar rocoso

Los desplazamientos que se han detectado en los 27 puntos fijos de la superficie del glaciar rocoso que actúan de referencia son de dos órdenes: planar (deslizamiento), a favor de la pendiente y vertical (hundimiento/subsistencia). A lo largo de todos los controles efectuados ha predominado el hundimiento. Los valores acumulados durante el periodo 2007-2009 se indican en la Tabla 1. En cuanto a las campañas de 2010 y 2011 no fue posible el control de los puntos fijos debido al espeso paquete de nieve que cubría el glaciar rocoso (>2,5 m) lo que imposibilitó la localización de los referidos puntos fijos y determinar su movilidad, que debió de ser mínima o nula al permanecer todo el cuerpo del glaciar rocoso congelado desde noviembre de 2009 hasta agosto de 2011.

Acerca de los valores totales de desplazamiento detectados para el periodo 2007-2009 se reflejan en

Periodo*	Tramo	Dpm	Dvm	IC	Smt	SmT**
2006-2007	Frontal	0,160	-0,497	0,068	-0,429	-0,401
	Medio	0,120	-0,350	0,016	-0,334	
	Final	0,212	-0,495	0,054	-0,441	
		0,164				
2007-2008	Frontal	0,108	-0,455	0,046	-0,409	-0,391
	Medio	0,073	-0,356	0,009	-0,347	
	Final	0,106	-0,446	0,027	-0,419	
		0,095				
2008-2009	Frontal	0,064	-0,255	0,027	-0,228	-0,240
	Medio	0,051	-0,244	0,006	-0,238	
	Final	0,077	-0,273	0,019	-0,254	
		0,064				
2009-2011***						
Valores acumulados		0,323				-1,032
Dpm. Desplazamiento planar medio a lo largo de la pendiente por cambio de cota (m). Dvm. Desplazamiento vertical medio por cambio de cota y subsistencia del suelo (m). IC. Índice corrector de desplazamiento vertical (m). Smt. Subsistencia media del tramo. SmT. Subsistencia media total del conjunto del cuerpo. Error de instrumentación +/- 0,030 m. * Hace referencia al periodo agosto/agosto. ** Subsistencia media total del conjunto del cuerpo. *** Sin datos. La espesa cubierta de nieve en agosto no permitió efectuar controles.						

Tabla 1. Desplazamientos planares y verticales (periodo 2007-2011).

Table 1. Vertical and horizontal displacements (period 2007-2011).

la Tabla 2, donde se indica lo acaecido en el tramo medio del glaciar rocoso, que puede ser tomado como muestra representativa del conjunto del cuerpo detrítico debido a que está asentado sobre superficie menos inclinada (tramo frontal, 15,5°; tramo medio, 8°; tramo final, 23°). Los valores a él referidos muestran 24,4 cm de avance planar, frente a 91,9 cm de hundimiento (Tabla 2).

### Recubrimiento nival del suelo

El grado de recubrimiento nival en verano en el Corral del Veleta resulta muy variable, según sectores. La nieve siempre tiende a permanecer más tiempo adosada a las paredes que enmarcan al conjunto del Corral. Lo habitual es que a partir del mes de mayo tienda a ir fundiendo, de forma tal que en agosto ya ha desaparecido en su mayoría. Sin embargo, los años 2010 y 2011 la nieve mantuvo un recubrimiento cercano al 95% durante todo el verano (Figura 7). Por lo que respecta al sector oriental, donde se instala el glaciar rocoso, igualmente la nieve tiene presencia irregular. Ésta

resultó ausente durante los años 2007 y 2008. El año 2009 albergó un 15% mientras que en los años 2010 y 2011 superó el 95%, lo que impidió, en estos dos últimos años, llevar a cabo determinados controles (registro térmico y desplazamientos).

### Estado físico de las masas heladas internas

En cuanto al estado físico y localización del cuerpo helado interno del glaciar rocoso (hielo glaciar y *permafrost*) interesa destacar que ha sufrido variaciones en el tiempo en cuanto a su distribución y espesor. En el año 1998, que fue cuando se llevó a cabo la primera auscultación tomográfica, el conjunto de la masa congelada conformaba paquetes continuos y relativamente homogéneos pudiéndose extender por todo el tercio oriental y zonas adyacentes de la base del Corral del Veleta (TERRADAT LTD & ETH, 1998). Dentro de la zona muestreada, en el sector central del glaciar rocoso y en agosto de 1999, se realizó una perforación mecánica que alcanzó el techo del *permafrost* a 1,20 m, y de la que se obtuvo testigo continuo (Tabla 3).

Periodo	Desplazamiento planar (deslizamiento, m)	Desplazamiento vertical (subsistencia, m)
2006-2007	0,120	-0,334
2007-2008	0,073	-0,347
2008-2009	0,051	-0,238
2009-2011*	sin datos	sin datos
Valores acumulados	0,244	-0,919

\* Sin datos. La espesa cubierta de nieve en agosto no permitió efectuar controles

Tabla 2. Desplazamientos planares y verticales del tramo medio (periodo 2007-2011).

Table 2. Vertical and horizontal displacements in the middle part of the rock glacier (period 2007-2011).

Tramo	Espesor	Tipo de material	Características sedimentológicas y petrográficas
A	120 cm	Micasquitos feldespáticos	Bloque plurimétrico del tramo medio del glaciar rocoso. Estructura compacta sin alteración.
B	30 cm	Sedimento	Amalgama de clastos de micasquitos centimétricos con gravas y arenas envueltas en fragmentos de hielo en estado de fusión.
C	40 cm	Hielo	C.1 (15 cm). Masa helada de fragmentos de micasquitos y hielo compuesto de cristales amorfos con elevada proporción de aire. C.2 (25 cm). Masa de hielo más densa y cristalina.

Tabla 3. Características del testigo continuo.

Table 3. Lithological and sedimentological properties of the sample.

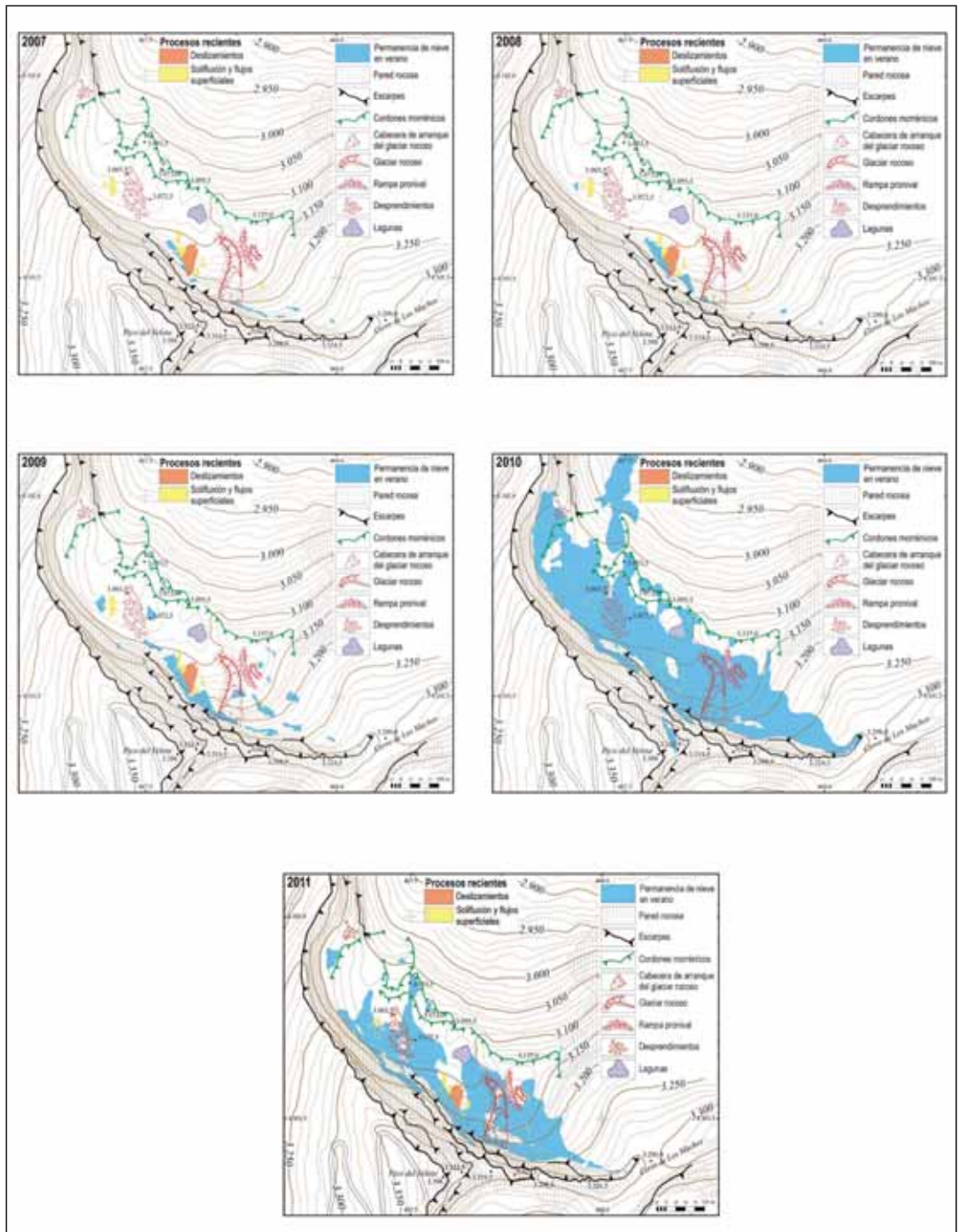


Figura 7. Recubrimiento nival del suelo (agosto, periodo 2007-2011).

Figure 7. Snow cover in the ground (August, period 2007-2011).

En 2009 se realizó una nueva prospección y los resultados indicaron una reducción significativa de masas heladas. En efecto, ahora el hielo fósil y *permafrost* se disponían en bolsas discontinuas repartidas irregularmente y cuyo techo tendía a instalarse a partir de los 2 m de profundidad correspondiendo a cuerpos resistivos que alcanzaban hasta los 150000 Ohm.m (Figuras 8, 9 y 10).

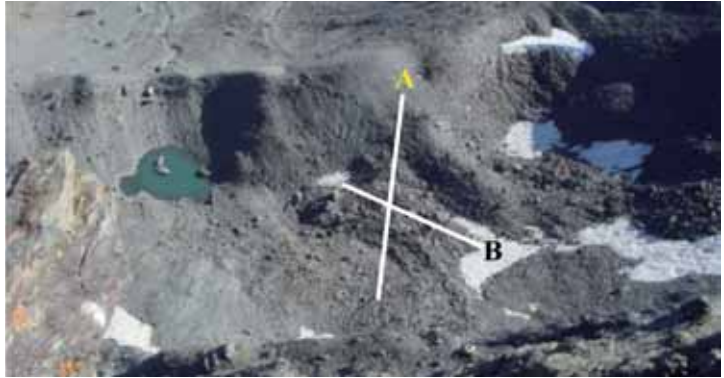


Figura 8. Localización de los transectos (A y B) realizados en el glaciar rocoso en 2009.  
 Figure 8. Location of the transects (A and B) carried out along the rock glacier in 2009.

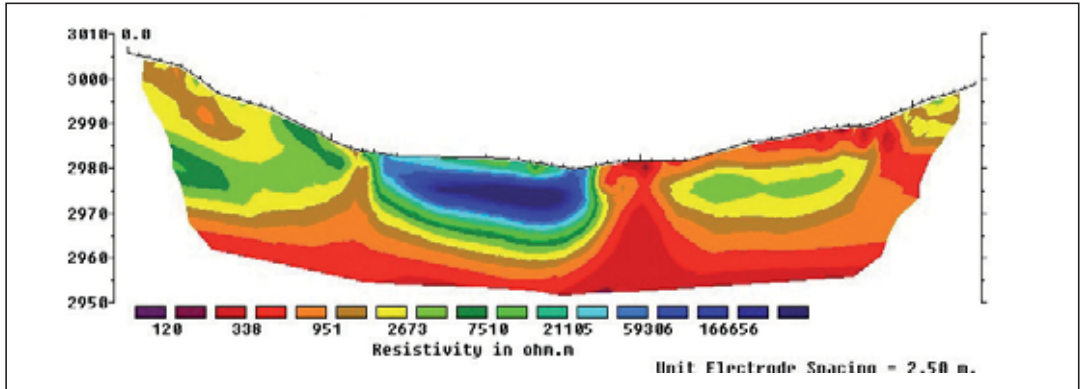


Figura 9. Transecto A, transversal al glaciar rocoso en su tramo medio y márgenes colindantes (N-S).  
 Figure 9. Transversal profile A, along the middle and edges of the rock glacier (N-S).

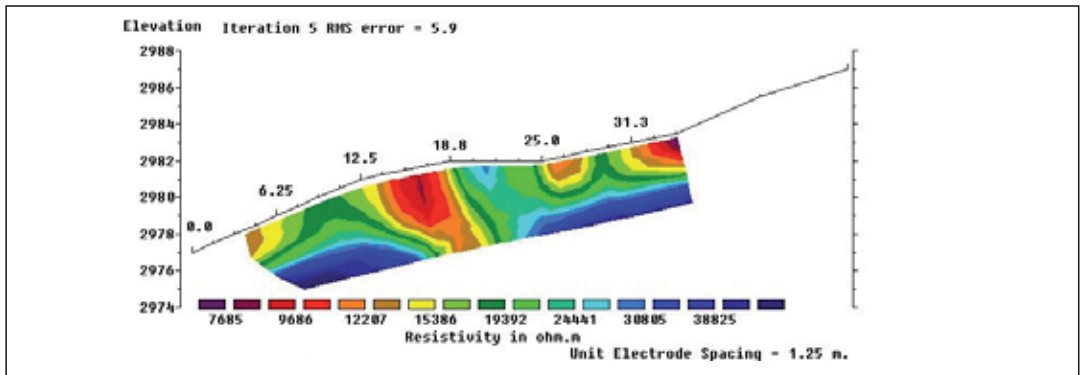


Figura 10. Transecto B, longitudinal del glaciar rocoso (W-E).  
 Figure 10. Longitudinal profile B along the rock glacier (W-E).

## INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La información obtenida viene a mostrar que las condiciones climáticas actuales resultan poco favorables al mantenimiento de las masas heladas atrapadas en el interior del glaciar rocoso. La interpretación de ella permite entender que los hielos glaciares relictos y el *permafrost* retenido bajo el manto de bloques en el tercio oriental de la base del Corral del Veleta se encuentran en proceso continuado de degradación, que se resuelve en repetidas subsidencias, reajustes del paquete clástico y progresiva merma de la masa helada en la que se apoya y muy tímidos avances del conjunto del glaciar rocoso. Esto último evidencia su estado decrepito, al contrario de lo que sucede en otros glaciares rocosos del Pirineo central y Alpes austríacos (SANJOSÉ BLASCO *et al.*, 2011). Esta degradación continuada de las masas heladas descritas debe ser resultado de la sucesión de procesos físicos en cascada, iniciados a partir de la radiación externa que incide en el suelo y funde la nieve, tal como se refleja en la Figura 11.

En efecto, la eliminación progresiva de la nieve en verano propicia que la energía de la radiación externa penetre progresivamente en la capa activa del suelo generando temperaturas positivas en todo su perfil logrando alcanzar el techo de las masas heladas (hielo fósil relictos y *permafrost*), que degrada y funde. En todo este proceso encadenado también la circulación de las aguas de fusión desempeñan un cometido muy destacado al actuar como trasmisoras de calor. De esta manera se explica la subsidencia y el reajuste continuado que experimenta todo el paquete clástico, así como la fusión del techo helado en el que éste se asienta. Esto sucede en verano, en pocas semanas (Figura 5, superior, episodio T2). Los datos que se presentan en la Tabla 4 referidos a las imágenes de la Figura 8 ilustran muy bien los hechos descritos.

El análisis de los datos de la Tabla 4, muy acordes con las imágenes de la Figura 12 (sobre todo con la superficie ocupada por la nieve), viene a indicar la relación directa que existe entre ellos, que se traduce en el valor anual de subsidencia del glaciar rocoso (tramo medio y conjunto). Es,

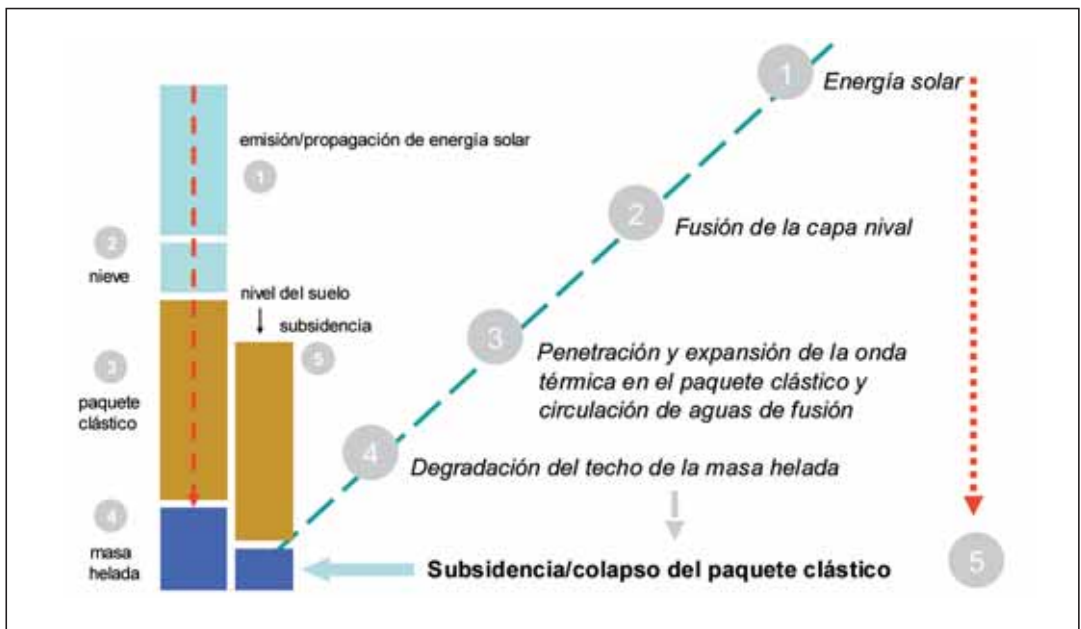


Figura 11. Esquema interpretativo de los procesos físicos en cascada.

Figure 11. Sketch of the feed-back physical processes affecting the rock glacier.



Periodo	Desplazamiento planar (m)	Desplazamiento vertical (m)	Subsidencia del tramo medio*	Subsidencia del glaciar rocoso**	Cobertura nival del suelo***	Días con valores térmicos (+) del suelo****
2006-07	0,120	-0,334	400,8	1274,2	0	68 (55,7%)
2007-08	0,073	-0,347	416,4	1323,8	0	66 (54,0%)
2008-09	0,051	-0,238	285,6	907,9	>15	52 (42,6%)
2009-11	sd.	sd.	sd.	sd.	>95	sd.
Totales	0,244	-0,919	1102,8	3505,9		

\* El tramo medio supone una superficie de 1200 m<sup>2</sup>. Valor en m<sup>3</sup>.  
 \*\* El conjunto del glaciar rocoso supone una superficie de 3815 m<sup>2</sup>. Valor en m<sup>3</sup>.  
 \*\*\* Se refiere al tercio oriental de la base del Corral. Se expresa en %.  
 \*\*\*\* Se refiere sobre el total de 122 días (mayo-agosto). Se expresa en valores absolutos y en %.  
 sd. Sin datos.

Tabla 4. Síntesis de los valores obtenidos de los parámetros topográficos y climáticos.

Table 4. Summary of the topographic and climatic results.



Figura 12. Fotografías del tercio oriental de la base del Corral del Veleta (agosto, 2007, 2008 y 2009).

Figure 12. Pictures of the eastern fringe of the base of the Veleta cirque (August 2007, 2008 and 2009).

pues, el grado de cobertura nival en verano quien favorece o dificulta la eficacia de la temperatura y circulación de aguas en el seno del suelo y, por consiguiente, la degradación de las masas heladas profundas como resultado final. Años con presencia de nieve aún a finales de agosto la magnitud de la degradación es siempre menor que aquellos otros años en los que la nieve desaparece tempranamente, como ocurrió entre el año 2008 y 2009 y como también sucedió entre 2004 y 2005 (GÓMEZ ORTIZ *et al.*, 2008). Acerca de los años 2010 y 2011 la degradación ha debido ser escasa o nula, pues la nieve desde el inicio del invierno en 2009 ha venido permaneciendo ininterrumpidamente en la base del Corral del Veleta, cubriendo en los veranos de esos años más del 95% del total de la superficie, lo que impidió llevar a términos los controles respectivos (Figura 13). En el futuro, apenas aquella quede liberada

de nieve, habrá que evaluar lo que ha supuesto este periodo continuado de nieves en la paralización o ralentización del ritmo de la degradación de las masas heladas.

Asimismo, la experiencia acumulada durante este tiempo de observación permite interpretar el comportamiento físico y distribución en profundidad que las masas heladas y *permafrost* han experimentado entre el periodo 1998-2009 obtenidos a partir de datos geofísicos. Los resultados de perfiles de tomografía eléctrica repetidos en 2009 sobre las mismas posiciones que se ejecutaron en 1998 muestran una disminución y desconexión de los cuerpos resistivos que corresponden a las masas congeladas profundas. La desconexión (Figuras 9 y 10) pudiera interpretarse por la presencia de zonas relativamente conductoras con extensión vertical limítrofe a las masas resistivas, coinciden-



Figura 13. Cubierta nival de la base del Corral del Veleta (agosto, 2010 y 2011).

Figure 13. Snow cover at the base of the Veleta cirque (August 2010 and 2011).

tes con pasillos por donde con cierta seguridad circulan aguas de deshielo. El transecto A (Figura 9), con penetración hasta 30 m, permite estimar un espesor de la masa congelada próximo a 10 m, frente a los 20 m, como mínimo, que presentaban en 1998.

## CONCLUSIONES

La idea principal que hay que subrayar es el proceso degradativo continuado a que están expuestas las masas glaciares relictas y *permafrost* alojados bajo manto de clastos en el tercio oriental del Corral del Veleta. Se justifica ello por las repetidas subsidencias que ha venido sufriendo el paquete clástico y la disminución y desconexión de los cuerpos resistivos congelados en profundidad durante el periodo 2007-2009 y años anteriores (GÓMEZ ORTIZ *et al.*, 2008). La interpretación que hacemos de estos acontecimientos es resultado de la sucesión de procesos físicos en cascada, iniciados a partir de la radiación externa que incide en el suelo y que alcanza el techo de las masas heladas, muy en particular desde que la superficie del glaciar rocoso queda liberada del manto nival y las aguas de fusión recorren la capa activa. La degradación de estas masas heladas sucede en verano, en pocas semanas, y de manera más notoria y acelerada desde que la nieve tiende a permanecer menos tiempo en las cumbres de Sierra Nevada, hace ya décadas. Durante el periodo 2007-2009 el volumen de pérdida

podría estimarse en  $1.102,8 \text{ m}^3$  para el tramo medio del glaciar rocoso, y de  $3.505,9 \text{ m}^3$  para su conjunto. Todo esto en el supuesto de que el reparto de las masas heladas en profundidad fuera homogéneo y con similar espesor.

Cabe señalar, sin embargo, lo contrariamente sucedido durante los años 2010 y 2011 en los que la nieve ha permanecido permanentemente en el suelo del Corral del Veleta (Figura 13), incluso durante la estación del estío de ambos años que alcanzó espesores superiores a 2,5 m impidiendo llevar a cabo los controles morfoodinámicos y térmicos programados (Figuras 13 y 14). En tales circunstancias el cuerpo del glaciar rocoso ha debido permanecer congelado desde el invierno de 2009 y, por consiguiente, sin sufrir merma de masa helada subyacente. Lo acontecido supone un cambio en la tendencia climática habida durante estos últimos años desconociéndose la evolución que ahora seguirá, por lo que resulta muy oportuno proseguir con los controles que se vienen llevando a cabo.

Los datos acumulados del comportamiento físico de las masas heladas y manto nival en el Corral del Veleta son aún limitados para obtener conclusiones sólidas de carácter climático. Sin embargo, las observaciones y experiencias de campo que venimos haciendo durante estas últimas décadas (desde 1975) sobre la permanencia de los neveros de fusión tardía en las

cumbres de Sierra Nevada y sobre el comportamiento reciente del régimen termopluviométrico (RASO NADAL, 2011; CASTRO DIEZ *et al.*, 2007; GARCÍA BARRÓN, 2007; MILIAN, 1996) nos permiten plantear una serie de reflexiones acerca de la trayectoria actual del clima (Figura 15). Al respecto, no resulta aventurado afirmar que las actuales condiciones climáticas

que dominan los tramos cimeros de Sierra Nevada no resultan favorables al mantenimiento permanente de la nieve en el suelo, bien porque los valores de las temperaturas sean superiores a los que se registraban durante periodos anteriores (Figura 15A), bien porque la innivación ha venido mermando (Figura 15B), bien porque coinciden ambos supuestos (Figura 15C), o bien porque los regímenes termopluviométricos en la Sierra han sufrido variaciones en su comportamiento temporal estacional (Figura 15D).

Lo cierto es que desde finales de la década de los setenta del siglo pasado, que es cuando empezamos a analizar la permanencia de la nieve en el suelo, el tiempo de su duración es cada vez menor, a juzgar por la distribución espacial de los neveros de fusión tardía: progresivo refugio en cotas cada vez más elevadas, predilección por enclaves topográficos al resguardo de la radiación y, en el caso de orientaciones meridionales, además, en concavidades a sotavento. Acontecimientos, todos ellos, que parecen incidir en una tendencia de aumento en las temperaturas, como pa-

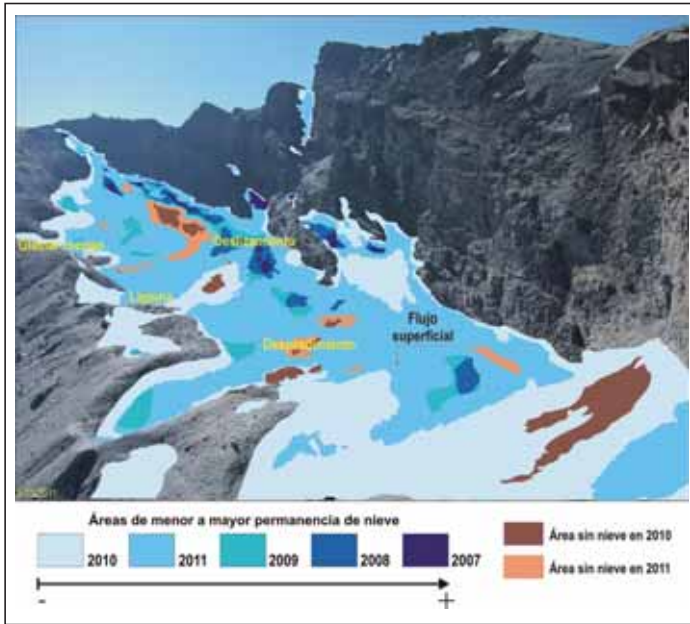


Figura 14. Evolución del manto nival en el Corral del Veleta (periodo 2007-2011).

Figure 14. Evolution of the snow cover at the Veleta cirque (period 2007-2011).

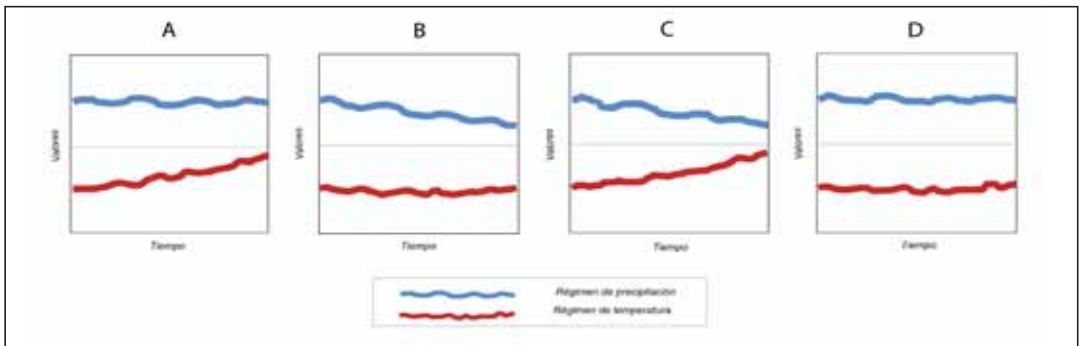


Figura 15. Hipotéticos escenarios de la evolución del régimen termopluviométrico.

Figure 15. Hypothetical scenarios of the future trends of the precipitation and temperature regimes.

rece mostrase en los Alpes, donde su repercusión es notoria en el incremento de la movilidad de muchos de sus glaciares rocosos (KÄÄB *et al.*, 2007; IKEDA *et al.*, 2003; ROER *et al.*, 2005).

Desconocemos el inicio de esta situación climática adversa al mantenimiento de la nieve durante el verano en el suelo, estudios más precisos deberán ocuparse de ello. Pero desde la perspectiva glaciológica y geomorfológica ya podría resultar efectiva a partir de la segunda mitad del siglo XIX (OLIVA *et al.*, 2009 y 2011) o comienzos del XX y, más aún, ya instalados al finalizar la primera mitad del mismo siglo (SOLÉ SABARÍS, 1942; GARCÍA SAINZ, 1947), que es cuando el glaciar histórico de la Pequeña Edad del Hielo del Corral del Veleta reduce aceleradamente extensión, tiende a recluirse hacia oriente, al amparo de la ladera de los Machos y cada vez más es recubierto por derrubios procedentes de la destrucción de las paredes del propio Corral, habiendo dado lugar ello al actual glaciar rocoso (GÓMEZ ORTIZ *et al.*, 2003).

A la vista de todos estos hechos y teniendo en cuenta la sensibilidad de las montañas a las variaciones del clima, en particular aquellas de latitudes medias de reciente deglaciación,

como ocurre en esta parte del extremo occidental del Mediterráneo, la experiencia llevada a cabo nos anima a plantear la hipótesis de que la degradación de las masas heladas atrapadas en el tercio más oriental del Corral del Veleta pudiera estar relacionada con variaciones recientes del clima de Sierra Nevada y, quizá últimamente, además, por los efectos del denominado cambio climático, aunque la limitación de datos disponibles todavía nos aconseja a ser prudentes, en particular en nuestro último planteamiento.

## AGRADECIMIENTOS

Al proyecto de investigación 018/2007 del Organismo Autónomo Parques Nacionales. Igualmente al Parque Nacional de Sierra Nevada, a su director Javier Sánchez Gutiérrez y a la Guardería, por su constante apoyo y logística de campo. Muy en particular también nuestro agradecimiento a los Dres. Jesús Galindo Zaldivar y Carlos Sanz de Galdeano, de la Universidad de Granada-CSIC, por su inestimable y eficaz labor en la realización de los trabajos geofísicos de la campaña de 2009.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIDE, J. 1893. Deuxième excursion dans la Sierra Nevada. *Annuaire du Club Alpin Français*, Vol. XX: 276-305.
- BOISSIER, E. 1839. *Voyage botanique dans le midi de l'Espagne pendant l'année 1837*. Versión castellana en C.E. BOISSIER «Viaje botánico al sur de España durante el año 1837». Fundación Caja de Granada y Universidad de Málaga. Granada, 1995.
- CHRISTIANSEN, H.H., 1998. Nivation forms and processes in unconsolidated sediments in Greenland. *Earth Surf. Process. Landforms*, 23: 751-760.
- ESTEBAN AMAT, A. 1996. Evolución del paisaje nevadense durante los últimos 1500 años a partir del análisis polínico de borreguiles. *1ª Conferencia Internacional Sierra Nevada*. Universidad de Granada-Sierra Nevada 96. Granada, vol. IV, pp. 233-264.
- FORT, M., 2003. Are high altitude, lava stream-like, debris mixtures all rock glaciers?. A perspective from the Western Himalaya. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, 130: 11-29.
- GARCÍA BARRON, L. 2007. La evolución climática en el suroeste de la Península Ibérica basada en registros instrumentales. *El cambio climático en Andalucía: evolución y consecuencias medioambientales*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, pp. 81-95.
- GARCÍA SAINZ, L. 1947. *El clima de la España cuaternaria y los factores de su formación*. Secretariado de Publicaciones. Universidad de Valencia. Valencia.



- GÓMEZ ORTIZ, A.; PALACIOS ESTREMER, D.; LUENGO, E.; TANARRO, LM.; SCHULTE, L. & RAMOS, M. 2003. Talus instability in a recent deglaciation area and its relationship to buried ice and snow cover evolution (picacho del Veleta. Sierra Nevada, Spain). *Geographiska Annaler*, 85A (2): 165-182.
- GÓMEZ ORTIZ, A.; SALVADOR FRANCH, F.; SANJOSÉ BLASCO, JJ.; PALACIOS ESTREMER, D.; SCHULTE, L.; ATKINSON GORDO, A. 2008. Evolución morfodinámica de un enclave montañoso recién deglaciado: el caso del Corral del Veleta (Sierra Nevada), ¿consecuencia del Cambio Climático?. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*. Barcelona: Universidad de Barcelona, 1 de agosto de 2008, vol. XII, 270 (26). <<http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-270/sn-270-26.htm>> [ISSN: 1138-9788].
- GÓMEZ ORTIZ, A.; PALACIOS, D.; SCHULTE, L.; SALVADOR FRANCH, F. & PLANA CASTELLVÍ, JA. 2009. Evidences from Historical Documents of Landscape evolution alter Little Ice Age of a mediterranean high mountain area, Sierra Nevada, Spain (Eighteenth to twentieth Centuries). *Geografiska Annaler*, 91A (4): 279-289.
- GÓMEZ ORTIZ, A.; OLIVA FRANGANILLO, M.; SALVADOR FRANCH, F.; SALVA CATARINEU, M.; MILHEIRO SANTOS, B.; PLANA CASTELLVÍ, J.A.; ESPINAR MORENO, M.; GARCÍA RUIZ, A.L.; SÁNCHEZ GÓMEZ, S. & SERRANO GINER, D. –in press–. El paisaje reciente de Sierra Nevada, documentos escritos de época y significado geográfico de la Pequeña Edad del Hielo. *Nimbus*.
- HARRIS, C., 1987. Mechanisms of mass movement in periglacial environments. En: *Slope Stability*, ANDERSON, M.G., RICHARDS, K.S., (Eds). John Wiley and Sons, pp. 531-559, Chichester.
- HUMLUM, O. 2000. The geomorphic significance of rock glaciers: estimates of rock glacier debris volumes and headwall recession rates in West Greenland. *Geomorphology*, 35: 41–67.
- IKEDA, A.; MATSOUKA, N. & KÄÄB, A. 2003. A rapidly moving small rock glacier at the lower limit of the mountain permafrost belt in the Swiss Alps. *8 th International Conference on Permafrost*. Zurich: Swets & Zeitlinger, Lisse, 2003, p. 455-460.
- JAHN, A., 1967. Some features of mass movement on Spitsbergen slopes. *Geografiska Annaler*, 49A: 213-225.
- JONHSON, P.G. 1987. Rock Glacier: glacier debris systems or high-magnitude lowfrequency flows. In: GIARDINO, J., SHOROEDER, J., VITEK, J.D. (Eds.) *Rock Glaciers*. Allen and Unwin, London, pp. 175–192.
- KÄÄB, A.; FRAUENFELDER, R. & ROER, I. 2007. On the response of rockglacier creep to surface temperature increase. *Global and Planetary Change*, 56: 172-187.
- LUETSCHG, M.; STOECKLI, V.; LEHNING, M.; HAEBERLI, W. & AMMANN, W. 2004. Temperatures in two boreholes at Flüela Pass, eastern Swiss Alps: the effect of snow redistribution on permafrost distribution patterns in high mountain areas. *Permafrost and Periglacial Processes*, 15: 283-297.
- MADOZ, P. 1849. *Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de ultramar* (voz Sierra Nevada). Tomo XIV, pp. 379-386. Edición facsimil, volumen Granada. Editoriales Andaluzas Unidas-Ámbito. Valladolid, 1987.
- McROBERTS, E.C. & MORGENSTERN, N.R., 1974. The stability of the thawing slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 11: 447-469.
- MILIÁN, T. 1996. *Variaciones seculares de las precipitaciones en España*. Tesis doctoral, inédita. Facultad de Geografía e Historia. Universidad de Barcelona. Barcelona
- MOLERO MESA, J.; PÉREZ RAYA, F. & VALLE TENDERO, F. (Eds.). 1992. Vegetación. Vegetación climática. *Parque Natural de Sierra Nevada. Paisaje, fauna, flora e itinerarios*. Rueda. Madrid, pp. 107-130.
- OLIVA, M.; SCHULTE, L. & GÓMEZ ORTIZ, A. 2011. The role of aridification in constraining the elevation range of Holocene solifluction processes and associated landforms in the periglacial belt of the Sierra Nevada (Southern Spain). *Earth Surface Processes and Landforms*, 36: 1279-1291.
- OLIVA, M.; SCHULTE, L. & GÓMEZ ORTIZ, A. 2009. Morphometry and Late Holocene activity of solifluction landforms in the Sierra Nevada (Southern Spain). *Permafrost and Periglacial Processes*, 20 (4): 369-382.



- OLIVA, M. & GÓMEZ ORTIZ, A. 2012. Late Holocene environmental dynamics and climate variability in a Mediterranean high mountain environment (Sierra Nevada, Spain) inferred from lake sediments and historical sources. *The Holocene*, doi: 10.1177/0959683611434235.
- PALACIOS, D.; De ANDRÉS, N. & LUENGO, E. 2003. Distribution and effectiveness of nivation in Mediterranean mountains: Peñalara (Spain). *Geomorphology*, 54: 157-178.
- PONZ, A. 1797. Relación del viaje que desde Granada hizo á Sierra Nevada D. Antonio Ponz a influxo del Excmo. Sr. Marqués de la Ensenada. *Mensajero económico y erudito de Granada*. Granada.
- RODRIGO, F.S; GÓMEZ NAVARRO, J.J & J. P. MONTÁVEZ GÓMEZ, J.P. 2012. Climate variability in Andalusia (southern Spain) during the period 1701–1850 based on documentary sources: evaluation and comparison with climate model simulations. *Climate of the Past*, 8: 117-133.
- ROER, I.; KÄÄB, A. & DIKAU, R. 2005. Rockglacier acceleration in the Turtmann valley (Swiss Alps) probable controls. *Norwegian Journal of Geography*, 59 (2): 157-163.
- RASO NADAL, J.M. 2011. Variabilidad de las precipitaciones en Sierra Nevada y su relación con distintos patrones de teleconexión. *Nimbus*, 27-28: 183-199.
- SALVADOR FRANCH, F.; GÓMEZ ORTIZ, A & PALACIOS ESTREMER, D. 2010. Comportamiento térmico del suelo en un enclave de alta montaña mediterránea con permafrost residual: Corral del Veleta (Sierra Nevada, Granada, España). *Ambientes periglaciares, permafrost y variabilidad climática*. Universidad Alcalá de Henares, pp. 61-68.
- SALVADOR FRANCH, F.; GÓMEZ ORTIZ, A.; SALVÀ CATARINEU, M. & PALACIOS ESTREMER, D. 2011. Caracterización térmica de la capa activa de un glaciar rocoso en medio periglacial de alta montaña mediterránea. El ejemplo del Corral del Veleta (Sierra Nevada, España). Periodo de observación: 1998-99/2008-09. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 37 (2): 25-48.
- SANJOSÉ BLASCO, J.J.; ATKINSON GORDO, A.; SALVADOR FRANCH, F. & GÓMEZ ORTIZ, A. 2007. Application of geomatic techniques to monitoring of the dynamics and to mapping of the Veleta rock glacier (Sierra Nevada, Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie NF.*, 51: 78-89.
- SANJOSÉ BLASCO, J.J.; KAUFMANN, V.; GÓMEZ ORTIZ, A.; SERRANO CAÑADAS, E.; ATKINSON GORDO, A.; SALVADOR FRANCH, F. & GONZÁLEZ TRUEBA, J.J. 2011. Técnicas geomáticas aplicadas al control de los glaciares rocosos. Comparación de los glaciares rocosos de Doesen (Alpes), Posets (Pirineos) y Corral del Veleta (Sierra Nevada). *Revista Cartográfica*, 85-86: 45-62.
- SANZ DE GALDEANO, C. & LÓPEZ, A.C. 1998. Nature and impact of the neotectonic deformation in the western Sierra Nevada (Spain). *Geomorphology*, 30 (3): 259-273.
- SOLÉ SABARIS, L. 1942. 2ª Reunión de Estudios Geográficos. *Estudios Geográficos*, 9: 687-726.
- TANARRO, L.M.; PALACIOS, D.; ZAMORANO, J.J; & GÓMEZ ORTIZ, A. 2010. Cubierta nival, permafrost y formación de flujos superficiales en el talud detrítico de alta montaña (Corral del Veleta, Sierra Nevada, España). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 36 (2): 39-59.
- TANARRO, L.M.; PALACIOS, D. & GÓMEZ ORTIZ, A. 2012. Control fotográfico de la evolución geomorfológica reciente de los movimientos en masa sobre el talud detrítico del Corral del Veleta, Sierra Nevada, España. *XII Reunión Nacional de Geomorfología*. SEG-UNICAN. Santander (en prensa).
- TERRADAT LTD & ETH. 1998. *Geophysical Survey report. Permafrost Investigation Veleta & Mulhacén. Sierra Nevada*. Proyecto PACE (documento inédito).