

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL SUSTRATO ROCOSO EN EL SECTOR DE CUMBRES DE SIERRA NEVADA (2002-2013)

Antonio GÓMEZ ORTIZ¹, Ferran SALVADOR FRANCH¹, Marc OLIVA²,
Montserrat SALVÀ CATARINEU¹, David PALACIOS ESTREMERÀ³,
Luis Miguel TANARRO GARCÍA³

¹*Departament de Geografia Física i A.G.R. Universitat de Barcelona*

²*Instituto de Geografia e Ordenamento do Território. Universidade de Lisboa*

³*Departamento de A.G.R. y Geografía Física. Universidad Complutense de Madrid*

gomez@ub.edu, fsalvador@ub.edu, oliva_marc@yahoo.com, salva@ub.edu, davidp@ghis.ucm.es,
pace@ghis.ucm.es

RESUMEN

En el verano del año 2000 se realizó una perforación de 114,5 m. de profundidad en el sustrato del picacho del Veleta, a 3380 m (Sierra Nevada, sector occidental). Las condiciones térmicas mostraron la inexistencia de *permafrost*. Desde el año 2002 y hasta el presente se viene obteniendo información térmica de los primeros 60 m. de la perforación aludida, a partir de una cadena de 11 sensores térmicos tipo UTL1. Los resultados más relevantes obtenidos durante el periodo 2002-2013, se sintetizan así.

Las mayores amplitudes térmicas medias diarias se registran en los sensores más superficiales, hasta los -1,2 m, que se alcanzan los 22,3°C. Las variaciones de esta amplitud térmica son significativas hasta -10 m y más atenuadas hasta -15-20 m. A 60 m de profundidad, se han registrado pequeñas oscilaciones de temperatura entre los 2,38 y 2,61°C, aunque a partir de enero de 2010 se han mantenido constantes en 2,61°C. No se ha detectado en todo el perfil muestreado temperaturas negativas permanentes. El espesor del horizonte congelado estacional es muy variable y dependiente de las condiciones climáticas externas (temperatura del aire y espesor y duración de la nieve). La profundidad más constante que alcanza es hasta 0,6 m con valor medio que oscila entre -3,32 y -1,40°C. Por debajo de -1,2 m los valores medios anuales de toda la serie son positivos oscilando entre 2,88°C, en los -2,6 m hasta los 2,47°C en los -60 m.

Acerca del comportamiento térmico medio estacional hay que resaltar que el invierno y la primavera son las estaciones que mantienen temperaturas negativas hasta los -0,6 m de profundidad, entre -0,06° y -0,89°C. Los valores más cálidos se registran en verano hasta los -1,2 m, entre 9,74 y 6,96°C y en otoño, aunque ahora se sitúan en la franja de -0,6 y -4 m, con valores que oscilan entre 4 y 4,56°C. Los niveles más profundos del sondeo muestreado, tramo de -20 y -60 m de profundidad, son los que mantienen temperaturas más estabilizadas a lo largo del año, entre 2,38 y 2,48°C.

Palabras clave: Picacho del Veleta, Sierra Nevada, temperatura del suelo, *permafrost*, suelo helado estacional.

ABSTRACT

A 114.5 m deep drilling was carried out in summer of 2000 in the bedrock of the Veleta peak, at 3380 m in the westernmost fringe of the Sierra Nevada massif. Thermal conditions showed

the absence of permafrost. Since 2002 and until today soil temperatures are being recorded at the first 60 m depth of this drilling based on 11 UTL-1 thermal loggers. The most relevant results obtained during the period 2002-2013, are summarized as follows:

The largest temperature ranges are recorded on the most external sensors until 1.2 m depth, where temperature ranges reached 22.3°C. Temperature variations are significant until 10 m depth and less pronounced until 15-20 m. At 60 m depth, temperatures have oscillated between 2.38 and 2.61 ° C, although since January 2010 temperatures have remained stable at 2.61°C. Permanent negative temperatures have not been detected in all the monitored levels. The thickness of the seasonal frozen layer is highly variable and dependent on external weather conditions (air temperatures as well as thickness and duration of snow). Frozen soil conditions reached on average 0.6 m depth, with values ranging between -3.32 and -1.4°C. Under -1.2 m the annual average values of the series are also always positive, between 2.88°C (at 2.6 m) and 2.47° (at 60 m).

Regarding the seasonal thermal dynamics, winter and spring are the seasons recording mean negative temperatures until 0.6 m depth, between -0.06° and -0.89°C, respectively. The highest summer temperatures are recorded in the first 1.2 m (between 9.74 and 6.96 °C) and in autumn in the levels between 0.6 and 4 m depth (4 and 4.56°C). The deeper levels between 20 and 60 m depth recorded stable temperatures throughout the year, between 2.38 and 2.48°C.

Key words: Sierra Nevada, Veleta peak, soil temperatures, permafrost, seasonal forst.

1. INTRODUCCIÓN

En el año 2000, en el marco del proyecto *Permafrost and Climate Change in Europa (PACE)*, se realizaron una serie de perforaciones decamétricas en diferentes macizos europeos a lo largo de un transecto que unía Svalbard (78°N) con Sierra Nevada (37°N). Su finalidad era detectar la existencia o no de *permafrost* y, al tiempo, hacer un seguimiento térmico de las condiciones climáticas del interior del suelo y del techo del *permafrost*, en el caso de que existiera. Las perforaciones más meridionales se ejecutaron en Sierra Nevada, pues fue en este macizo, en las cabeceras de sus barrancos, donde quedaron instalados los glaciares cuaternarios a más baja latitud de Europa, así como también aquellos otros históricos que tuvieron lugar durante la Pequeña Edad del Hielo. El sector preciso donde se desarrollaron estas perforaciones, en número de dos, fueron en el área de cumbres del extremo occidental. Una, en el picacho del Veleta, en sustrato de micascuistas, a 3.380 m de altitud y alcanzó 114,5 m. La segunda, en la base del circo del Corral del Veleta, a 3.150 m de altitud, en material detrítico de bloques y clastos de grueso calibre alcanzándose ahora una profundidad de 1,5 m. Los resultados de ambas perforaciones apuntaron a la inexistencia de *permafrost* en el picacho del Veleta, pero sí a la existencia de cuerpos helados en la base del Corral del Veleta (Gómez Ortiz *et al.*, 1999; Salvador Franch, *et al.*, 2011). Los datos en el picacho del Veleta procedieron de observaciones térmicas puntuales a -114,5 m, que mostraron un valor de 2,2°C, mientras que para el Corral del Veleta fue el testigo de hielo con clastos adheridos obtenido en el nivel de -1,5 m.

El objetivo de esta comunicación es aportar datos del comportamiento térmico del sustrato rocoso del picacho del Veleta durante el periodo 2002-2013 y, con ello, sustentar con más rigor las observaciones térmicas puntuales obtenidas de la perforación realizada en 2000. Además, analizar de la serie capturada durante el periodo 2002-2013, la variación que experimenta la temperatura a lo largo del año en los primeros sesenta metros de profundidad.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El picacho del Veleta (3.398 m) es un monolito rocoso que sobresale del nivel de cumbres de Sierra Nevada instalado en su extremo occidental, entre el cerro de los Machos (3.327 m) y el veredón que desciende al Corral. Labrado en series de micaesquistos y cuarcitas mantiene un desnivel vertical superior a los 300 m en su cara norte, en contraposición con aquel otro menos acusado de su cara oeste. La morfología que presenta refleja una combinación de acción glaciaria pasada y periglaciaria reciente y actual. En tal sentido, destacan en cumbres grietas y pasillos de descompresión glaciaria abiertos en sustrato así como cúmulos de bloques y lajas plurimétricas (p.e. Lastrones del Veleta) (figura 1).

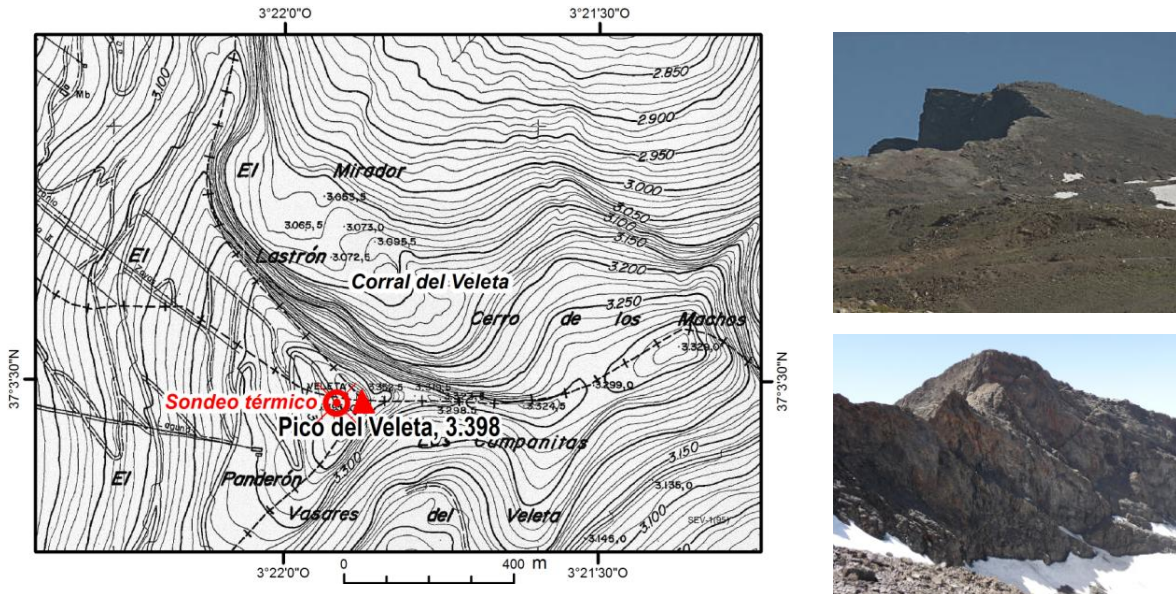


Fig. 1: Sector occidental de Sierra Nevada y Picacho del Veleta (vertiente oeste y norte).

Durante los periodos glaciarios cuaternarios el picacho del Veleta debió comportarse a manera de *hörn* presidiendo las cabeceras de los sistemas glaciarios del Guarnón, Dilar-Monachil, Veleta y Valdeinfierno. Dataciones cosmogénicas otorgan, como mínimo, a tal comportamiento geomorfológico una edad de 32,1 ka BP. (Gómez Ortiz *et al.*, 2012a). La cara norte del picacho del Veleta se define por su Corral, en cuya base, que conforma un cuenco ovalado, quedó alojado durante la Pequeña Edad del Hielo un pequeño foco glaciario, al igual que sucedió en otras cabeceras de cumbres de Sierra Nevada (Oliva *et al.*, 2012). De la existencia del foco glaciario del Corral del Veleta se dispone de abundante información de época, de gran interés a partir del siglo XVII (Gómez Ortiz *et al.*, 2012b). En la actualidad de él no existe rastro visible, pero aún mantiene restos de aquellos hielos glaciarios bajo paquetes de clastos, aunque en proceso continuado de degradación (Gómez Ortiz *et al.*, 2012b).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La perforación del picacho del Veleta se realizó a 3.380 m de altitud y a 75 m de distancia del tajo de su cara norte, que preside el Corral del Veleta. Los trabajos mecánicos tuvieron lugar en septiembre del año 2000. El sustrato perforado, de series de micaesquistos feldespáticos y grafitosos, alcanzó la profundidad de 114,5 m. El vacío de la perforación se entubó con PVC

en cuyo interior se dispuso una cadena de sensores de temperatura autónomos de registro continuo tipo *datalogger* UTL-1 (*Universal Temperature Datalogger*, rango $-29/+39^{\circ}\text{C}$, precisión $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$) (figura 2).



Fig. 2: Perforación en el picacho del Veleta y *datalogger* tipo UTL1 utilizado.

En una primera etapa, 2000-2002, el tramo cubierto por la cadena de sensores incluyó 18 dispositivos con alcance hasta los -100 m de profundidad. La captación de datos fue completa, aunque puntual, una toma por año. En una segunda etapa, desde 2002-2003 hasta la actualidad, se han controlado de forma continua los 60 primeros metros de profundidad a partir de una cadena de 11 sensores. El motivo de este cambio de proceder se debió a problemas técnicos de instrumentación detectados en agosto de 2002 y causados por las continuas corrientes de agua interna que inundaban las zonas más profundas el conducto entubado.

La captación de datos durante esta segunda fase se ha realizado de forma continua a intervalos regulares de 2 horas. Los registros capturados por sensor/año se fijan en torno a 4.380. Los niveles controlados han sido: 0,2; 0,6; 1,2; 2,6; 4; 7; 10; 13; 15; 20 y 60 m. El período de observación analizado abarca desde septiembre de 2002 hasta agosto de 2013. La recogida de información se ha realizado anualmente, siempre a finales del mes de agosto. Durante ella los datos acumulados en los sensores se volcaron y almacenaron en base de datos y, una vez depurados, se han tratado estadísticamente.

4. RESULTADOS

Los resultados que a continuación se ofrecen completan y detallan aquellos otros preliminares que recientemente hemos presentado (Gómez Ortiz *et al.*, 2014). Además, también se incluyen aquellos otros de la temperatura del aire (Salvador Franch *et al.*, 2011), para establecer relaciones con los del interior del sustrato o tener punto de referencia comparativo.

El comportamiento térmico medio anual en profundidad presenta tendencia generalizada decreciente oscilando entre $3,25^{\circ}\text{C}$, a $-0,6$ m y $2,25^{\circ}\text{C}$, a -15 m. La temperatura media del aire es de $0,07^{\circ}\text{C}$. La amplitud térmica máxima se registra a $-0,2$ m, con $22,34^{\circ}\text{C}$ y la menor a -60 m, con $0,23^{\circ}\text{C}$. El tramo entre los -13 y -60 m es el que más tiende a acercarse a la amplitud 0°C , aunque sin lograrse. La temperaturas medias diarias de las máximas se concentran en el

tramo superior del perfil muestreado con valores entre 16,54°C y 12,34°C. Y así también ocurre con las medias diarias de las mínimas, ahora entre -5,80°C y -0,75°C (tabla 1).

Prof. (m)	datos disp. (%)	T media serie (°C)	T med.diar. Máx. (°C)	T med.diar. mín. (°C)	Amplitud T med.diar. (°C)	σ SD T med.diar. (°C)
Aire	85,6	0,07	15,96	-21,94	37,90	7,31
-0,2	100,0	2,84	16,54	-5,80	22,34	5,40
-0,6	91,0	3,25	15,56	-3,15	18,72	5,01
-1,2	100,0	3,19	12,34	-0,75	13,09	3,91
-2,6	90,9	2,88	8,39	0,15	8,24	2,37
-4,0	100,0	2,57	6,28	0,36	5,92	1,54
-7,0	100,0	2,58	3,97	1,47	2,50	0,64
-10,0	75,5	2,35	2,91	1,70	1,21	0,31
-13,0	100,0	2,30	2,61	1,92	0,69	0,17
-15,0	100,0	2,25	2,42	1,92	0,50	0,14
-20,0	76,1	2,39	2,61	2,15	0,46	0,05
-60,0	100,0	2,47	2,61	2,38	0,23	0,11

Tabla 1: TEMPERATURAS MEDIAS ANUALES DEL AIRE Y EN PROFUNDIDAD EN EL PICO DEL VELETA (2002-2013)

El régimen estacional medio relativo a la variación térmica en profundidad sigue patrones diferenciados. Hasta -1,2 m de profundidad es VOPI (verano, otoño, primavera, invierno), al igual que en el aire. Los valores máximos se instalan en verano con rangos entre 9,76 y 6,97°C. En este mismo tramo de profundidad también se incluyen los más fríos abarcando el invierno y la primavera con rangos entre -0,89 y 0,68°C. Entre -2,6 m y -7 m el patrón es OVIP. Ahora los valores más elevados se fijan en otoño, entre 5,31 y 3,20°C y los más bajos en primavera, entre 2,22 y 0,68°C. Entre -10 y -13 m el patrón estacional es IPOV, mostrando los valores más elevados en invierno y los más bajos en verano y otoño, entre 2,62 y 2,10°C para todo el año. A partir de -15 m la variación térmica estacional tiende a homogeneizarse y de forma más acusada entre -20 y -60 m. En esta última cota la diferencia entre valores estacionales es de 0,03°C, situándose entre 2,48 y 2,45°C (tabla 2).

Prof (m)	T media (°C)				T media diaria Máxima (°C)				T media diaria mínima (°C)				Amplitud T media (°C)				σ SD T media diaria (°C)			
	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V
Aire	0,58	-6,49	-2,26	9,13	12,1	4,28	12,4	16	-14,3	-21,9	-15,9	-3,98	26,4	26,2	28,3	20	5,24	4,39	5,04	3,61
-0,2	2,94	-0,89	-0,45	9,76	13,97	0,25	12,65	16,54	-4,42	-5,80	-2,76	-0,31	18,39	6,05	15,41	16,85	3,83	0,81	1,29	5,18
-0,6	4,12	-0,08	-0,17	9,12	13,80	1,02	10,84	15,56	-0,53	-3,15	-1,87	-0,08	14,33	4,17	12,71	15,64	3,66	0,68	1,02	5,23
-1,2	5,03	0,68	0,08	6,97	11,82	1,92	6,24	12,34	0,80	-0,53	-0,75	-0,08	11,02	2,45	6,99	12,42	2,99	0,59	0,56	4,21
-2,6	5,31	1,77	0,68	3,77	8,39	3,29	1,81	8,17	2,15	0,58	0,36	0,15	6,24	2,71	1,45	8,02	1,60	0,60	0,29	2,56
-4,0	4,56	2,32	1,12	2,28	6,28	3,52	1,92	5,58	2,61	1,02	0,58	0,36	3,67	2,50	1,34	5,22	0,75	0,58	0,36	1,48
-7,0	3,20	3,00	2,22	1,90	3,97	3,74	2,83	3,06	1,92	2,36	1,70	1,47	2,05	1,38	1,13	1,59	0,41	0,33	0,31	0,32
-10,0	2,31	2,62	2,40	2,10	2,91	2,83	2,83	2,38	1,70	2,15	1,92	1,70	1,21	0,68	0,91	0,68	0,30	0,21	0,23	0,23
-13,0	2,22	2,35	2,38	2,25	2,61	2,61	2,61	2,61	1,92	2,15	2,15	1,92	0,69	0,46	0,46	0,69	0,14	0,15	0,15	0,18
-15,0	2,17	2,26	2,29	2,27	2,38	2,38	2,38	2,42	1,92	1,92	2,15	1,94	0,46	0,46	0,23	0,48	0,15	0,13	0,11	0,12
-20,0	2,39	2,38	2,39	2,41	2,61	2,38	2,61	2,61	2,38	2,30	2,38	2,15	0,23	0,08	0,23	0,46	0,03	0,00	0,03	0,08
-60,0	2,45	2,46	2,47	2,48	2,61	2,61	2,61	2,61	2,38	2,38	2,38	2,38	0,23	0,23	0,23	0,23	0,10	0,11	0,11	0,11

Tabla 2: TEMPERATURAS MEDIAS ESTACIONALES DEL AIRE Y EN PROFUNDIDAD EN EL PICO DEL VELETA (2002-2013)

La llegada y propagación hacia el interior del suelo de la onda térmica con valor negativo aparece en el mes de octubre pudiendo permanecer la temperatura con este signo hasta finales de primavera o inicios del verano. El espesor del horizonte congelado estacionalmente es muy variable y dependiente de las condiciones climáticas imperantes. Durante el periodo de

observación ha fluctuado entre los 30-60 cm y de forma excepcional hasta los 2 metros de profundidad. Los valores negativos medios mayoritarios se han fijado entre -3,32 y -1,4°C en los primeros 60 cm. de profundidad. Por debajo de este nivel los valores medios anuales durante el resto del año se mantienen positivos hasta el nivel muestreado (tabla 2).

5. DISCUSIÓN

Los datos térmicos del sustrato del picacho del Veleta hasta los 60 m muestran valores alejados del punto de congelación. En Sierra Nevada no hay condiciones de *permafrost* salvo en enclaves aislados de topografía favorable (Gómez Ortiz *et al.*, 2001), tal y como sucede en el resto de las más altas cumbres peninsulares, como en Pirineos (Lugon *et al.*, 2004; Serrano *et al.*, 2001, 2006) y, probablemente, Picos de Europa (Ruiz Fernández, 2012).

Las temperaturas medias anuales para el periodo 2002-2013 son ampliamente positivas en todos los sensores, oscilando éstas entre 3,25 y 2,25°C. Si bien la amplitud térmica anual entre las temperaturas medias de las cotas muestreadas no supera 1°C, el rango entre temperaturas extremas en cada sensor denota un comportamiento significativamente diferenciado, sobre todo hasta los -13 m de profundidad (figura 3). La amplitud térmica máxima se concentra por encima de los -7 m, en particular por encima de los -1,2 m con valores instalados entre los 22,34 y 18,72°C. La razón se debe a la influencia de la radiación externa, con claro reflejo en el comportamiento del patrón estacional.

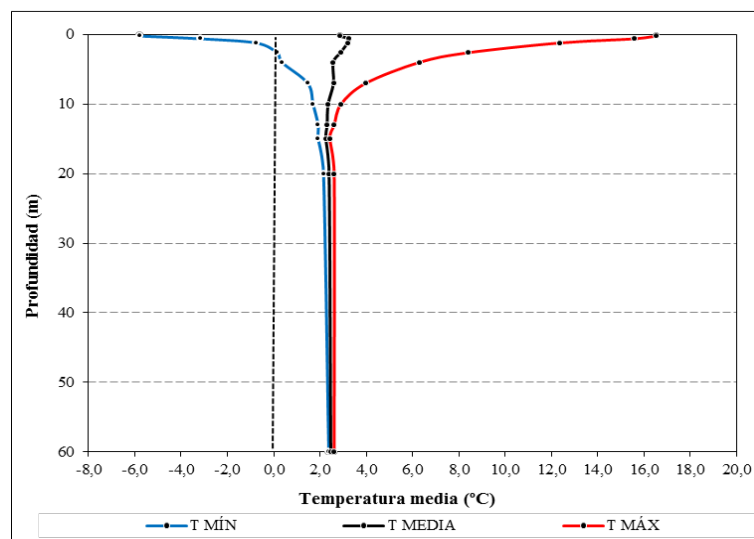


Fig. 3: Comportamiento térmico medio anual en profundidad (periodo 2002-2013).

El comportamiento térmico anual, contemplado estacionalmente se ofrece diferenciado en profundidad y mantiene, a grandes rasgos y en sus niveles más superficiales, ritmo similar a la temperatura del aire (figura 4 superior), aunque con magnitudes de valores inferiores. Por lo que respecta al interior del sustrato hasta los -4 m se distingue una estación fría de congelamiento, sobre todo por encima de los -1,2 m (en particular en los primeros -60 cm), que abarca desde octubre a mayo-junio. También se distingue otra estación cálida con temperaturas superiores a los 10°C en los niveles más elevados, ahora centrada en julio y

agosto (figuras 4 y 5). El tránsito de la estación cálida a la fría y viceversa se opera en un corto periodo de tiempo, como también sucede en el aire.

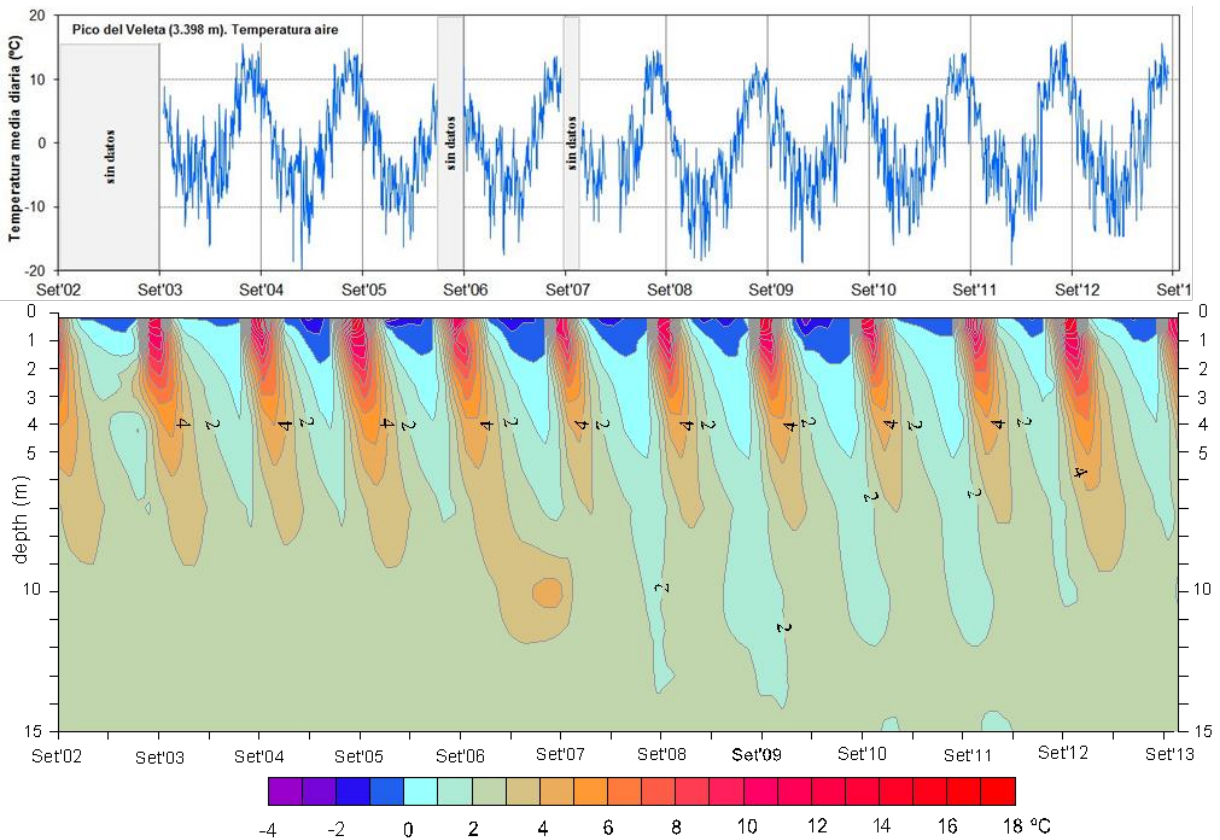


Fig. 4: Parte superior, variación térmica diaria del aire. Parte inferior, distribución de las isotermas diarias en profundidad hasta -15 m (periodo 2002-2013).

El tránsito hacia valores positivos ocurre generalmente apenas la nieve desaparece del suelo, generalmente a finales de mayo-junio y en pocas semanas los primeros decímetros del suelo consolidan temperaturas próximas a los 10°C. El tránsito hacia valores negativos se produce a partir de mediados de septiembre-octubre y se consolida en noviembre con las primeras nevadas. Por debajo de los -4 m las variaciones térmicas son más amortiguadas hasta el punto de que la amplitud térmica no supera 1°C por lo que no existe diferenciación estacional.

La casi nula amplitud térmica que se detecta por debajo de los -20 m (entre 0,46 y 0,23°C, con $SD \leq 0,11^\circ\text{C}$) debe estar relacionada con la debilidad o ausencia de llegada de la onda térmica externa, de signo negativo o positivo. Por encima de esa profundidad, durante la estación fría, que resulta larga, el contraste que presenta el nivel entre -0,2 y -1,2 m del interior del sustrato (-0,89/0,68°C) frente al del aire (-6,49°C) se explica por el elevado albedo de la nieve que recubre el suelo, que reduce muy considerablemente la transmisión de temperaturas negativas en el seno de la perforación. Durante la estación cálida también existe diferencia térmica pero tenue, afectando ahora a los niveles superiores de la perforación, por encima de los 0,6 m, que son más cálidos que la del aire (9,76°C en el nivel -0,2m frente a 9,13°C del aire), lo que demuestra de nuevo la limitada eficacia de la expansión de la onda térmica quedando sus efectos anulados entre los -4 y -7 m. Las causas principales quizá, ahora, se deban a la corta

duración de la estación cálida y a la considerable y repetitiva amplitud térmica del aire entre el día y la noche, impuesta por la altitud y la escasa humedad atmosférica.

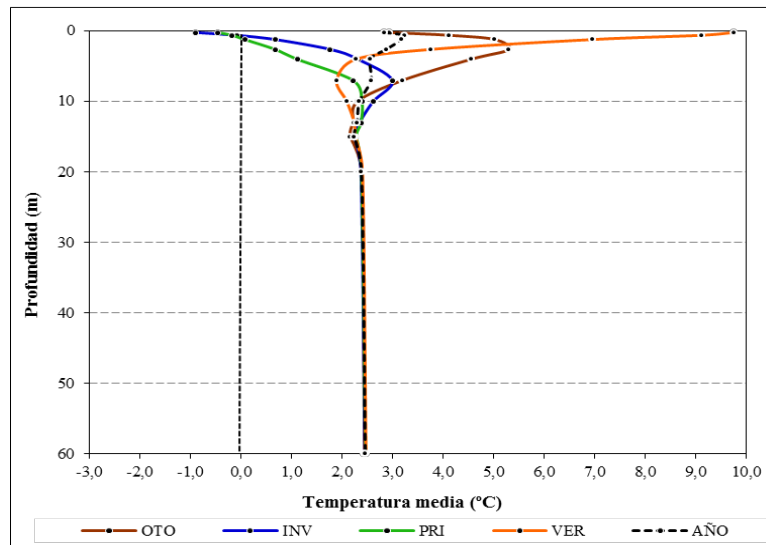


Fig. 5: Comportamiento térmico medio estacional en profundidad (período 2002-2013).

Prof. (m)	T (°C)	
	08/09/2001 12:00 TMG	27/08/2002 12:00 TMG
-0,2	9,9	7,4
-0,6	10,8	9,6
-1,2	10,2	9,7
-2,6	7,6	7,8
-4,0	5,3	5,5
-7,0	2,8	2,9
-10,0	2,3	2,5
-13,0	2,3	2,4
-15,0	2,6	2,6
-20,0	2,5	2,6
-30,0	2,4	2,5
-40,0	2,5	2,6
-50,0	2,5	2,6
-60,0	2,4	2,5
-70,0	2,4	2,5
-80,0	2,3	2,4*
-90,0	2,3	2,3*
-100,0	2,2	2,3*

* nivel sumergido en agua

Tabla 3: TEMPERATURAS PUNTUALES EN EL INTERIOR DEL SONDEO MEDIDAS EN SEPTIEMBRE 2001 Y AGOSTO 2002

Para concluir cabe preguntarse cual debe ser el comportamiento de la temperatura por debajo de los -60 m muestreados, pues sobre ello sólo tenemos conocimiento puntual que se remonta al año 2001, apenas realizada la perforación. Entonces, a -100 m se registraron 2,2 y 2,3°C en 2001 (8 de septiembre) y 2002 (27 de agosto), respectivamente (tabla 3). Ante tales valores y dada la evolución de la temperatura a -60 m. cabe suponer que en la base del sondeo sus condiciones térmicas actuales deben continuar estando lejanas al punto de congelación por lo

que impiden la existencia de *permafrost*. Sin embargo, cabe preguntarse que comportamiento térmico debe caracterizar la cota de -300 m, coincidente con la base del Corral del Veleta, donde aún persisten cuerpos helados en profundidad.

6. CONCLUSIONES

Los datos térmicos del picacho del Veleta presentados en este estudio complementan otros estudios sobre dinámica de temperaturas ya realizados en diferentes geformas de las altas cumbres de Sierra Nevada (Gómez Ortiz *et al.*, 1999; Salvador Franch *et al.*, 2011; Oliva *et al.*, 2014). La lejanía de los valores térmicos medios anuales en el suelo (2,84 y 3,25°C) respecto a los 0°C sugiere que condiciones de *permafrost* espacialmente extendidas en las altas cumbres de Sierra Nevada probablemente no se han dado durante el Holoceno (Oliva *et al.*, 2012, 2014). Regímenes térmicos de *permafrost* durante el presente interglaciar debieron de tener carácter puntual, quedando circunscritos a enclaves de topografía favorable a la sobrealimentación nival y fusión tardía de la nieve, probablemente coetáneos a la existencia de focos glaciares y durante periodos inmediatamente posteriores a ellos.

En la actualidad, las temperaturas medias anuales del sustrato del picacho del Veleta oscilan entre los 3,25°C, a los -0,6 m. de profundidad y los 2,47°C en la cota de los -60 m. Los datos de los valores extremos anuales atestiguan variabilidad significativa interanual e intranual hasta los -1,2 m, tienden a reducirla hasta los -20 m y a partir de tal profundidad se instalan en torno a los 2,47°C.

Respecto al alcance de la expansión de onda térmica de signo negativo, ésta cubre repetidamente hasta los -0,6 m. Esto sucede durante la estación fría que abarca desde octubre a junio. Durante este periodo la temperatura oscila entre -3,32 y -1,40°C. La llegada de la onda térmica de signo negativo se opera en un muy corto tiempo, al igual que su desaparición.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la inexistencia de condiciones actuales de *permafrost* en las más altas cumbres de Sierra Nevada. Se constata un comportamiento diferenciado con respecto a lo que acontece en el fondo de los circos septentrionales más elevados. Por ejemplo, en el adyacente Corral del Veleta, donde se ha atestiguado la existencia de *permafrost* e hielo glaciar relicto bajo espesos paquetes de bloques, donde las temperaturas son negativas permanentemente por debajo de la capa activa.

Esta comunicación es un análisis del comportamiento térmico del sustrato rocoso del picacho del Veleta. Posteriores trabajos deberán valorar la bondad de los datos tratados de esta serie y afrontar las tendencias que pudieran inferirse acerca del clima del pasado histórico de Sierra Nevada, enclave montañoso de especial sensibilidad climática en el contexto de las montañas mediterráneas del sur de Europa.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido amparado por los proyectos de investigación CSO2009-06961 y CSO2012-30681 del Ministerio de Economía y Competitividad. Nuestro agradecimiento a Miguel Ramos Sainz, de la Universidad de Alcalá de Henares, por su decisivo cometido durante el desarrollo del proyecto PACE, a Lothar Schulte por su contribución en las campañas de campo de control térmico, y a Paulo da Silva Pereira y Joan Albert López Bustins por sus consejos en el tratamiento de datos. Marc Oliva agradece a la *AXA Research*

Fund la concesión de un contrato postdoctoral durante el cual se ha escrito la presente comunicación.

8. REFERENCIAS

- Gómez Ortiz, A., Palacios, D., Ramos Sainz, M., Schulte, L., Salvador Franch, F. y Tanarro, L.M. (1999). Degradación de permafrost en Sierra Nevada y repercusiones geomorfológicas: el caso del Corral del Veleta. Resultados preliminares. *Boletín de la AGE*, 27, 7-21.
- Gómez Ortiz, A., Palacios, D., Ramos, M., Tanarro, L.M., Schulte, L., & Salvador Franch, F. (2001). Location of Permafrost in Marginal Regions: Corral del Veleta, Sierra Nevada, Spain. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 93-110.
- Gómez Ortiz, A.; Salvador Franch, F.; Sanjosé Blasco, JJ.; Palacios, D.; Oliva Franganillo, M.; Salvà Catarineu, M.; Tanarro, L.M.; Raso Nadal, J.M.; Atkinson, A.; Schulte, L.; Plana Castellví, J.A.; Santos, B.M. y Serrano Giné, D. (2012a). Degradación de hielo fósil y permafrost y Cambio climático en Sierra Nevada. *Proyectos de Investigación en Parques Nacionales 2008-2011*. Organismo Autónomo Parques Nacionales, Madrid, pp. 25-43.
- Gómez Ortiz, A., Palacios, D., Palade, B., Vázquez Selem, L. y Salvador Franch, F. (2012b). The deglaciation of the Sierra Nevada (Southern Spain). *Geomorphology*, 159-160, 93-105.
- Gómez Ortiz, A.; Salvador, F.; Salvà, M.; Oliva, M.; Palacios, D.; Tanarro, L. y Schulte, L. (2014). Inexistence of permafrost at the top of Veleta peak (Sierra Nevada, Spain). *Geophysical Research Abstracts*. European Geoscience Union, General Assembly 2014. Vienna (Austria), 27th April - 2nd May, 2014, Vol. 16, EGU2014-6690.
- Lugon, R., Delaloyé, R., Serrano, E., Reynard, E., Lambiel, C. y González Trueba, J.J. (2004). Permafrost and Little Ice Age relationships, Posets massif, Central Pyrenees, Spain. *Permafrost and Periglacial Processes*, 15, 207-20.
- Oliva, M. y 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*, 22 (8): 915-927.
- Oliva, M., Gómez Ortiz, A., Salvà, M. y Salvador Franch, F. (2014). Present-day solifluction processes in the semiarid range of Sierra Nevada (Spain). *Arctic, Antarctic and Alpine Research*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1657/1938-4246-46.2.73>
- Salvador Franch, F., Gómez Ortiz, A., Salvà, M. y Palacios, D. (2011). Caracterización térmica de la capa activa de un glaciar rocoso en medio periglacial de alta montaña Mediterránea. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 37 (2), 25-48.
- Ruiz Fernández, J. (2012). *Las formas de modelado glaciar, periglacial y fluvio-torrencial del macizo occidental de los Picos de Europa (Cordilleras Cantábricas)*. PhD tesis. Universidad de Oviedo.
- Serrano, E., Agudo, R., Delaloye, R. & González-Trueba, J.J. (2001). Permafrost distribution in the Posets massif, Central Pyrenees. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 55, 245-252.
- Serrano, E., Sanjosé, J.J. y Agudo, C. (2006). Rock glacier dynamics in a marginal periglacial high mountain environment: flow, movement (1991-2000) and structure of the Argualas rock glacier. The Pyrenees. *Geomorphology*, 74, 286-296.