

Temperatura del suelo en un medio montañoso crionival (Corral del Veleta, Sierra Nevada, España)

Ferran SALVADOR-FRANCH¹, Antonio GÓMEZ-ORTIZ¹, David PALACIOS-ESTREMER², Montserrat SALVÀ-CATARINEU¹ & Josep Antoni PLANA-CASTELLVÍ¹

(¹) Universitat de Barcelona, (²) Universidad Complutense de Madrid

fsalvador@ub.edu

Resumen

Se presenta el análisis del régimen térmico del suelo de un pequeño glaciar rocoso activo situado en el Corral del Veleta (Sierra Nevada, Cordilleras Béticas), a partir de una serie de 9 años de observación, con datos obtenidos mediante el uso de una cadena de sensores térmicos situados a 5 profundidades del suelo y en el aire. Se constata la existencia de un comportamiento térmico estacional y anual muy contrastado entre los niveles superficiales del suelo respecto a los más profundos, y de estos respecto al aire. Se atribuye a la existencia y duración del manto nival un papel determinante en las características de este comportamiento térmico del suelo.

Palabras clave: glaciar rocoso activo, períodos de hielo-deshielo, Sierra Nevada, temperatura del aire, temperatura del suelo.

1. Introducción. Objetivos

El macizo de Sierra Nevada (Cordilleras Béticas, 37º lat. N, 3º long. W) constituye el conjunto montañoso más elevado de la península Ibérica (Mulhacén, 3.482 m; Veleta, 3.395 m) y el enclave glaciado más meridional de Europa durante las crisis climáticas frías pleistocenas (figura 1). Durante la Pequeña Edad del Hielo glaciares de reducido tamaño volvieron a desarrollarse en los circos más elevados y mejor orientados. Actualmente, solo se conservan algunos retazos de hielo y *permafrost* residual, en proceso de degradación, cubiertos por mantos de derrubios que contribuyen a retardar su desaparición (Gómez Ortiz *et al.*, 2002). En la cabecera del valle del Guarnón, el circo del Corral del Veleta (3.100 m, orientación N) ejemplifica de forma singular el predominio de los procesos fríos periglaciares y crionivales en la morfodinámica actual (Gómez Ortiz *et al.*, 2006). Especialmente significativa es la presencia de pequeños glaciares rocosos activos, objeto de control topográfico desde

1995 y de forma sistemática desde 2001 mediante distintas técnicas geomáticas (Sanjosé *et al.*, 2007a, 2007b).

El Corral del Veleta, por su altitud, orientación y morfotopografía favorable, presenta una prolongada innivación, desde final de otoño hasta bien entrado verano. Frecuentemente, algunos neveros persisten durante todo el verano en los lugares mejor resguardados y de menor insolación. En agosto de 1999 un sondeo mecánico de 2 m de profundidad, realizado en el tramo medio del glaciar rocoso sometido a control, permitió confirmar la presencia y alcanzar el techo de la masa helada sobre la que descansa y se desplaza dicho glaciar rocoso, procediéndose al entubado e instalación de una cadena de sensores térmicos en su interior con objeto de conocer el comportamiento físico de la capa activa y del *permafrost* subyacente (Gómez Ortiz *et al.*, 2001; Ramos *et al.*, 2002).

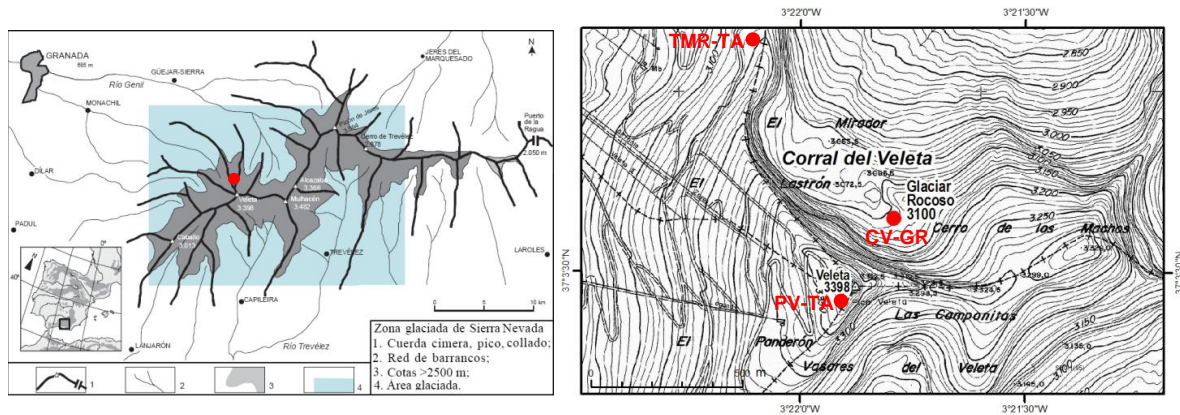


Figura 1. Localización del glaciar rocoso del Corral del Veleta en Sierra Nevada y puntos de toma de datos térmicos.

En distintas aportaciones anteriores ya se ha mostrado la relación existente entre los valores térmicos más significativos registrados en el seno del glaciar rocoso, el grado de recubrimiento nival durante la estación cálida y la dinámica de dicho cuerpo detrítico (deslizamiento, hundimiento, pérdida de volumen) (Gómez Ortiz *et al.*, 2008). Nos interesa ahora caracterizar con más detalle el estado térmico medio del cuerpo sedimentario del glaciar rocoso analizando climáticamente, por primera vez en su conjunto, la totalidad de la serie disponible.

2. Métodos e instrumentación

La toma de datos térmicos del glaciar rocoso del Corral del Veleta se inició en 1999 mediante el uso de sensores de alimentación autónoma (*data logger*) tipo TINYTALK II (rango -35 a +70 °C, precisión +/-0,35 °C) (Ramos *et al.*, 1998, 2002), siendo sustituidos más tarde por otros tipo UTL-1 (rango -30 a +40 °C, precisión +/-0,1 °C) (Hoelzle *et al.*, 1999) (figura 2). Los niveles del suelo muestreados fueron inicialmente -2, -15, -40, -90 y -190 cm, pasando luego (agosto 2005) a -5, -20, -50, -100 y -150 cm con objeto de ajustarlos a los usados en otros enclaves de Sierra Nevada y Pirineo. La frecuencia de observación ha oscilado entre 4'48 y 1 h en campañas sucesivas, según el tipo y capacidad de almacenamiento de datos del sensor o el protocolo de observación ensayado. Actualmente es de 2 h lo cual asegura su funcionamiento continuo durante casi 2 años. La temperatura del aire, como serie de referencia, procede los primeros años de una estación automática propia (TMR, torre meteorológica de referencia) situada en la Loma del Veleta (3.098 m), fuera del Corral pero a cota similar, debiendo ser sustituida más tarde por un sensor UTL situado en el Pico del Veleta (3.395 m) (tabla I, figura 1).

Tabla I. Período, características y disponibilidad de datos térmicos.

campana térmica	99-00	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	08-09	
Sensor	TinyTalk	TinyTalk	UTL	UTL	UTL	UTL	UTL	UTL	UTL	
Frecuencia (h:mm)	4:00	4:48	1:00	1:12	1:12	2:24	2:00	2:00	2:00	
Datos/día	6	5	24	20	20	10	12	12	12	
Total datos disp. (%)	84,1	91,4	99,5	96,3	98,3	97,0	98,4	99,6	97,4	
niveles de muestreo (cm)										
TMR (3.098 m) TA	X	X	s/d							
PV (3.398 m) TA				X	X	TA	s/d	X	s/d	X
CV-GR (3.107 m) - 02	X	s/d	s/d	s/d	X	- 05	X	X	X	X
- 15	X	X	s/d	X	X	- 20	X	X	X	X
- 40	X	X	X	s/d	s/d	- 50	X	X	X	X
- 90	X	s/d	X	X	X	- 100	X	s/d	X	X
- 190	X	X	X	s/d	s/d	- 150	X	s/d	X	X

TMR: torre meteorológica de referencia; PV: Pico del Veleta; CV-GR: Corral del Veleta-glaciar rocoso; TA: temperatura aire. s/d, en gris: sin datos por falta, fallo o pérdida del sensor.

Hasta la fecha, se dispone de información térmica, del suelo y del aire, procedente de 9 campañas anuales (de agosto a agosto), entre 1999-2000 y 2008-2009 con desigual distribución por niveles debido a falta, fallo o pérdida de sensores. El volumen anual de datos útiles obtenidos supera habitualmente el 90% respecto al máximo posible, excepto la primera campaña que se inició en noviembre. Solo faltan completos los datos de 2000-2001 debido a la acumulación de nieve que impidió su recuperación.

3.1. Temperatura media (Tx)

La tabla II muestra que la temperatura media anual decrece progresivamente entre los 0,8 °C de superficie (-5 cm) hasta los -1,5 °C del nivel más profundo (-150 cm). Sin embargo la distribución mensual de la Tx presenta contrastes acusados. De noviembre a abril los valores de la Tx son negativos en todos los niveles, escalonadamente más fríos en superficie que en profundidad, incrementando su valor negativo hasta febrero en superficie (-5, -20 cm) y marzo en profundidad, iniciándose después su recuperación. Julio y agosto son los meses más cálidos, invirtiéndose el escalonamiento térmico, ahora más cálido en superficie que en profundidad, debido siempre a la penetración de la influencia térmica del aire desde la superficie. Mayo-junio y septiembre-octubre son meses de tránsito entre ambas situaciones con los valores extremos de Tx, cálidos o fríos respectivamente, situados a nivel intermedio (entre -20 y -100 cm). El nivel más profundo tiende a mantener valores siempre negativos aunque, algunos meses, muy cercanos a 0 °C o incluso ligeramente positivos (septiembre).

Tabla II. Temperatura media mensual, estacional y anual del aire (TA) y del suelo (promedio período 99-00 a 08-09).

lugar / nivel	Otoño			Invierno			Primavera			Verano			Anual				
	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Oto.	Inv.	Prim.	Ver.	Sep-Ago
PV / TA	4,9	0,0	-4,7	-6,7	-6,4	-5,9	-5,4	-4,8	0,4	6,4	9,5	8,4	-1,3	-6,3	-3,3	8,0	-0,7
CV-GR / -5	4,8	0,4	-3,2	-4,1	-4,9	-4,1	-3,9	-3,0	0,5	3,9	11,7	12,2	0,3	-4,4	-2,1	9,3	0,8
-20	5,7	0,5	-2,4	-3,1	-3,6	-4,1	-3,9	-3,0	-0,8	1,2	7,0	10,5	0,5	-3,6	-2,6	6,2	0,1
-50	5,1	0,3	-2,0	-2,8	-3,3	-3,5	-3,6	-3,0	-1,1	-0,2	5,4	9,8	0,6	-3,2	-2,6	5,0	-0,1
-100	3,9	0,6	-1,5	-2,2	-2,7	-3,3	-3,4	-2,6	-0,7	0,7	3,1	6,3	0,8	-2,7	-2,2	3,4	-0,3
-150	0,1	-0,7	-1,1	-1,8	-2,4	-2,8	-3,0	-2,6	-1,2	-0,8	-0,7	-0,3	-0,8	-2,3	-2,3	-0,6	-1,5

PV: Pico del Veleta (3.395 m); CV-GR: Corral del Veleta-glaciar rocoso (3.107 m).

En azul: Temperatura media ≤ 0°C.

Se constata por tanto la llegada, aunque muy atenuada, de la oscilación térmica anual externa (aire) hasta la máxima profundidad muestreada (-150/-190 cm, techo del *permafrost*) (figura 3), permitiendo aunque sea puntualmente condiciones de fusión.

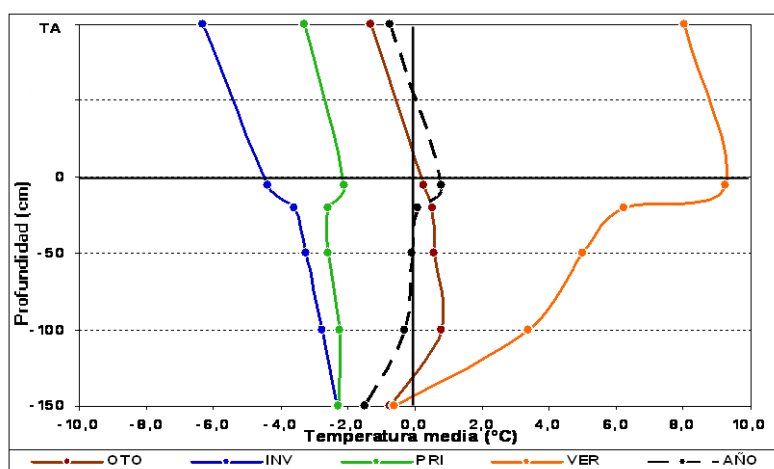


Figura 3. Temperatura média estacional e anual (período 99-00 a 08-09).

3.2. Temperaturas extremas

Tabla III. Temperaturas extremas medias y absolutas del aire (TA) y del suelo (período 99-00 a 08-09).

lugar / nivel	Otoño			Invierno			Primavera			Verano			Oto.	Inv.	Prim.	Ver.	Anual Sep-Ago	
	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.						
PV / TA	Mex	19,9	16,3	15,7	11,1	11,6	17,6	15,5	24,2	26,5	28,6	28,3	23,2	19,9	17,6	26,5	28,6	28,6
	Mx	9,3	2,6	-1,7	-3,1	-2,8	-2,1	-1,4	-0,4	5,0	10,8	13,7	12,1	1,8	-2,7	1,1	12,2	3,1
	mx	1,7	-2,5	-7,3	-9,6	-9,1	-8,9	-8,6	-8,3	-3,1	2,7	6,1	5,4	-3,9	-9,2	-6,7	4,7	-3,8
	mex	-9,3	-16,0	-20,1	-22,7	-27,8	-19,9	-21,8	-17,5	-15,3	-13,0	-3,1	-1,9	-20,1	-27,8	-21,8	-13,0	-27,8
CV-GR / -05	Mex	21,4	9,1	12,0	13,1	8,8	12,0	14,2	9,1	17,0	22,3	28,3	28,6	21,4	13,1	17,0	28,6	28,6
	Mx	7,6	1,4	-1,9	-3,1	-3,9	-2,9	-2,7	-2,2	1,8	6,2	17,3	18,1	1,5	-3,3	-1,1	13,8	3,0
	mx	2,8	-0,4	-3,9	-4,8	-5,5	-4,8	-4,6	-3,6	-0,3	2,0	7,6	8,2	-0,6	-5,0	-2,8	5,9	-0,7
	mex	-0,8	-3,9	-16,4	-19,6	-12,9	-8,3	-10,2	-13,4	-6,3	-9,7	-0,3	0,1	-16,4	-19,6	-13,4	-9,7	-19,6
-20	Mex	12,9	6,3	0,6	-0,8	-1,0	-0,8	-1,0	-0,1	8,4	13,4	26,8	28,9	12,9	-0,8	8,4	28,9	28,9
	Mx	6,3	0,7	-2,3	-3,1	-3,6	-4,0	-3,9	-2,9	-0,8	1,3	8,1	12,8	0,8	-3,6	-2,5	7,4	0,5
	mx	5,3	0,3	-2,4	-3,2	-3,7	-4,1	-3,9	-3,0	-0,9	1,0	6,1	8,8	0,3	-3,6	-2,6	5,3	-0,2
	mex	0,6	-3,0	-5,4	-5,9	-6,5	-7,0	-6,5	-5,2	-4,0	-2,5	-2,5	-1,5	-5,4	-7,0	-6,5	-2,5	-7,0
-50	Mex	9,9	5,1	0,4	-0,5	-0,8	-0,8	-1,0	-0,5	-0,1	7,0	15,4	15,7	9,9	-0,5	-0,1	15,7	15,7
	Mx	5,4	0,4	-2,0	-2,8	-3,3	-3,5	-3,5	-3,0	-1,1	-0,2	5,8	10,6	0,7	-3,2	-2,5	5,4	0,0
	mx	4,8	0,2	-2,1	-2,8	-3,4	-3,6	-3,6	-3,1	-1,2	-0,2	5,1	9,1	0,4	-3,3	-2,6	4,7	-0,2
	mex	1,0	-2,7	-4,8	-5,4	-5,2	-5,9	-5,0	-4,9	-3,5	-2,7	-2,7	0,2	-4,8	-5,9	-5,0	-2,7	-5,9
-100	Mex	8,4	4,0	-0,3	-0,4	-0,6	-0,8	-1,0	-0,5	4,2	8,4	10,6	10,3	8,4	-0,4	4,2	10,6	10,6
	Mx	4,1	0,7	-1,5	-2,2	-2,7	-3,3	-3,4	-2,6	-0,7	0,8	3,2	6,4	0,8	-2,7	-2,2	3,5	-0,2
	mx	3,8	0,5	-1,5	-2,2	-2,7	-3,3	-3,4	-2,7	-0,8	0,7	3,0	6,1	0,7	-2,8	-2,3	3,3	-0,4
	mex	0,8	-1,0	-4,5	-4,8	-5,4	-6,3	-6,1	-5,2	-4,0	-1,0	-0,6	-0,3	-4,5	-6,3	-6,1	-1,0	-6,3
-150	Mex	0,6	0,1	-0,3	-0,3	-0,4	-0,8	-1,0	-0,6	-0,3	-0,3	0,4	0,7	0,6	-0,3	-0,3	0,7	0,7
	Mx	0,1	-0,7	-1,1	-1,8	-2,4	-2,7	-3,0	-2,6	-1,2	-0,8	-0,7	-0,3	-0,7	-2,3	-2,2	-0,6	-1,5
	mx	0,1	-0,7	-1,1	-1,8	-2,4	-2,8	-3,0	-2,7	-1,2	-0,8	-0,7	-0,3	-0,8	-2,3	-2,3	-0,6	-1,5
	mex	-0,2	-2,5	-2,8	-3,9	-4,1	-4,8	-4,5	-4,3	-3,1	-2,6	-2,6	-2,5	-2,8	-4,8	-4,5	-2,6	-4,8

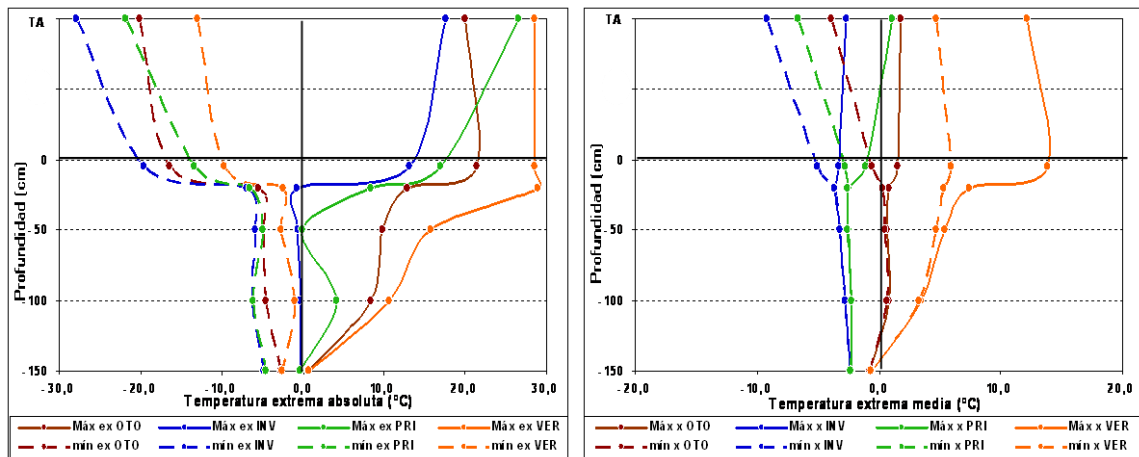
PV: Pico del Veleta (3.395 m); CV-GR: Corral del Veleta-glaciar rocoso (3.107 m).

En azul: Temperaturas extremas $\leq 0^{\circ}\text{C}$.

Mex: Máxima extrema absoluta; Mx: media de las Máximas extremas; mx: media de las mínimas extremas; mex: mínima extrema absoluta.

La distribución de los valores térmicos extremos mostrados en la tabla III confirma, mejor si cabe, lo expuesto en el apartado anterior. Así la acusada amplitud térmica registrada en el aire (28,6/-27,8) y en la superficie del suelo (28,6/-19,6) se reduce rápidamente en profundidad, más aún si consideramos los valores medios de dichas extremas (máximas y mínimas) (figuras 4 y 5). Solo a partir de -20 cm y durante

algunos meses (diciembre-abril a -20, noviembre-junio a -150 cm) la temperatura permanece constantemente negativa. En contraste, es significativo que el nivel -5 cm conoce máximas positivas durante todo el año. Más interesante aún, es constatar la llegada hasta -150 cm de temperaturas extremas positivas durante 4 meses (julio a octubre), e inclusive el valor medio de dichas extremas (septiembre).



Figuras 4 y 5. Temperaturas extremas absolutas y medias, estacionales y anuales (período 99-00 a 08-09).

3.3. Oscilación y amplitud térmica

Tabla IV. Oscilación media y Amplitud media y extrema del aire (TA) y del suelo (período 99-00 a 08-09).

lugar / nivel	Otoño			Invierno			Primavera			Verano			Anual					
	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Oto.	Inv.	Prim.	Ver.	Sep-Ago	
PV / TA	Osx	7,66	5,17	5,62	6,48	6,37	6,78	7,19	7,93	8,03	8,08	7,51	6,78	5,77	6,54	7,72	7,53	6,95
	Atx	22,0	21,0	23,5	24,6	25,2	22,7	27,1	25,2	24,9	23,3	17,1	16,7	28,8	28,7	32,8	24,6	40,9
	Atex	29,3	32,2	35,8	33,8	39,4	37,6	37,2	41,7	41,8	41,6	31,3	25,1	40,1	45,5	48,3	41,6	56,4
CV-GR / -05	Osx	4,77	1,80	2,00	1,63	1,61	1,89	1,85	1,31	2,08	4,16	9,63	9,92	2,11	1,71	1,75	7,90	3,72
	Atx	17,2	9,8	8,8	7,1	4,8	3,9	4,7	6,5	7,2	12,3	21,7	20,7	22,2	8,0	11,5	25,7	33,0
	Atex	22,2	13,0	28,4	32,7	21,7	20,3	24,4	22,5	23,3	32,0	28,6	28,5	37,8	32,7	30,4	38,3	48,2
-20	Osx	1,02	0,46	0,15	0,06	0,03	0,03	0,04	0,09	0,12	0,31	2,06	3,99	0,47	0,04	0,08	2,12	0,70
	Atx	9,3	5,4	2,3	1,3	1,0	0,6	0,4	2,0	2,5	2,9	10,4	13,0	13,7	2,2	4,8	17,2	22,0
	Atex	12,3	9,3	6,0	5,1	5,6	6,2	5,6	5,1	12,4	15,9	29,3	30,4	18,3	6,2	14,9	31,4	35,9
-50	Osx	0,54	0,20	0,09	0,06	0,03	0,04	0,03	0,06	0,05	0,06	0,70	1,43	0,25	0,04	0,04	0,73	0,27
	Atx	7,6	3,8	1,9	1,2	0,6	0,6	0,3	1,6	1,4	1,4	10,3	8,3	9,4	1,9	3,1	14,0	17,4
	Atex	8,9	7,8	5,1	4,9	4,4	5,1	4,0	4,4	3,4	9,7	18,1	15,5	14,6	5,3	4,9	18,4	21,6
-100	Osx	0,23	0,14	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,07	0,07	0,09	0,22	0,33	0,15	0,04	0,06	0,22	0,11
	Atx	4,8	3,0	1,8	0,8	0,8	0,5	0,5	1,7	1,9	1,5	4,3	4,7	8,4	1,9	3,9	8,3	12,2
	Atex	7,6	4,9	4,2	4,4	4,8	5,6	5,1	4,7	8,2	9,4	11,2	10,7	12,9	5,9	10,3	11,6	16,9
-150	Osx	0,05	0,02	0,03	0,02	0,04	0,03	0,02	0,09	0,04	0,02	0,04	0,07	0,03	0,03	0,05	0,04	0,04
	Atx	0,5	0,2	0,8	0,7	0,7	0,4	0,4	1,4	0,9	0,1	0,3	0,8	1,4	1,7	2,3	1,2	3,5
	Atex	0,8	2,6	2,5	3,6	3,7	4,0	3,6	3,7	2,8	2,3	3,0	3,2	3,3	4,5	4,2	3,3	5,5

PV: Pico del Veleta (3.395 m); CV-GR: Corral del Veleta-glaciár rocoso (3.107 m).

Ox: Oscilación diaria media; Atx: Amplitud térmica media; Atex: Amplitud térmica extrema.

En naranja: Oscilaciones y amplitudes > 10°C.

En azul: Oscilaciones y amplitudes < 1°C.

Los valores de la tabla IV complementan, en términos de oscilación diaria media y de amplitud media y extrema, parte de lo expuesto mediante los valores extremos del

apartado anterior. La oscilación media diaria, siempre reducida, lo es muy acusadamente (< a 0,1 °C) en los niveles más profundos, pero no impide que la amplitud media mensual alcance entre 0,2 y 1,4 °C (3,5 °C la anual) y la amplitud extrema entre 0,8 y 4,0 °C (5,5 °C la anual). Esto indica que aún habiendo algunos periodos de práctica estabilidad térmica ésta no llega a alcanzarse de forma completa en ninguna época del año.

3.4. Días de helada

Tabla V. Número de días de helada (en %) en el aire (TA) y en el suelo (período 99-00 a 08-09).

lugar / nivel	Otoño			Invierno			Primavera			Verano			Anual					
	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Oto.	Inv.	Prim.	Ver.	Sep-Ago	
PV / TA	D+	67,3	25,3	1,1	0,0	0,5	0,0	1,6	3,3	25,8	85,0	97,8	96,8	31,2	0,2	10,3	93,2	33,7
	D±	19,3	46,2	31,1	21,0	34,9	26,8	30,6	34,4	53,8	12,8	2,2	3,2	32,2	27,6	39,6	6,1	26,4
	D-	4,0	28,5	67,8	79,0	64,5	73,2	67,7	62,2	20,4	2,2	0,0	0,0	33,4	72,2	50,1	0,7	39,1
CV-GR / -05	D+	90,7	30,3	1,9	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	9,1	40,6	87,1	100,0	41,0	0,2	3,0	75,9	30,0
	D±	9,3	27,1	12,0	9,1	9,1	15,5	14,0	8,9	12,9	3,3	3,8	0,0	16,1	11,3	11,9	2,4	10,4
	D-	0,0	42,6	86,1	90,9	90,9	83,9	86,0	91,1	78,0	56,1	9,1	0,0	42,9	88,5	85,0	21,8	59,6
-20	D+	100,0	49,3	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	25,0	65,3	95,2	50,3	0,0	1,6	61,8	28,4
	D±	0,0	7,4	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,3	1,6	2,4	2,7	0,0	0,1	1,8	1,2
	D-	0,0	43,3	97,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	94,8	73,8	33,1	2,4	46,9	100,0	98,3	36,4	70,4
-50	D+	100,0	50,0	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,5	13,8	68,7	100,0	50,8	0,0	1,8	59,8	27,9
	D±	0,0	2,2	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	1,8	0,0	0,9	0,0	0,0	1,1	0,5
	D-	0,0	47,8	97,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	84,8	29,5	0,0	48,3	100,0	100,0	38,1	71,6
-100	D+	100,0	55,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,9	59,9	96,8	51,8	0,0	1,8	59,8	28,4
	D±	0,0	4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,0	0,9	0,9	1,6	0,0	0,2	0,9	0,7
	D-	0,0	39,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	94,0	76,2	39,2	2,3	46,6	100,0	98,0	39,2	71,0
-150	D+	57,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	51,9	19,2	0,0	0,0	18,2	9,3
	D±	10,8	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	10,5	4,0	0,0	0,0	4,6	2,2
	D-	31,7	98,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	94,1	37,6	76,8	100,0	100,0	77,2	88,5

PV: Pico del Veleta (3.395 m); CV-GR: Corral del Veleta-glaciar rocoso (3.107 m).
D+: Días sin helada; D±: Días con hielo-deshielo; D-: Días con helada continua.

En naranja: Presencia de días sin helada.
En rosa: Presencia de días con hielo-deshielo.
En azul: Presencia de días con helada continua.

Tanto más interesante resulta considerar la estructura de la distribución media, a lo largo del año y en profundidad, del número de días sin helada (Tmínima positiva), de helada continua (Tmáxima negativa) y de hielo-deshielo (Tmínima negativa, Tmáxima positiva) (tabla V, figuras 6). Destaca el elevado número de días de helada continua ya en superficie (59,6%) aumentando paulatinamente en profundidad (88,5%). Desde final de otoño y durante invierno-primavera el englamamiento es permanente a partir de -20 cm. Muy significativa es la escasa presencia de días de hielo-deshielo (solo 10% en superficie, insignificante en profundidad), su aparente repunte a -150 cm (2,2%) es debido a que la temperatura a este nivel se sitúa en el umbral de los 0 °C. Se constata nuevamente la presencia de días sin helada en todos los niveles muestreados (28-30%), incluso en el más profundo (9,3%).

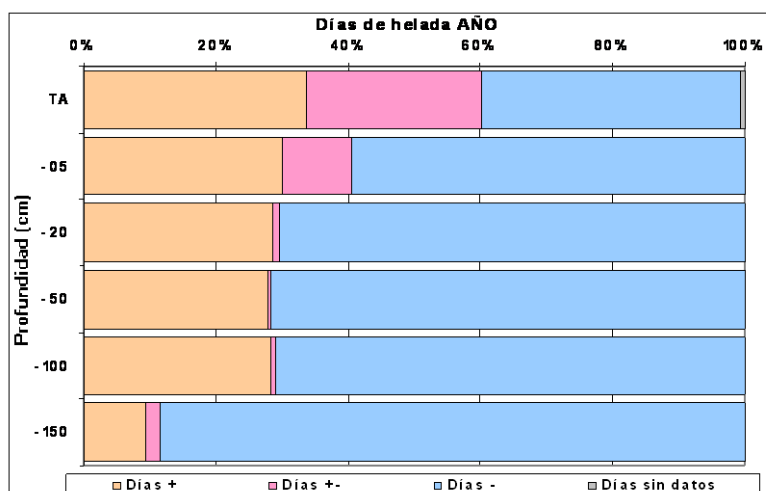


Figura 6. Distribución media, anual, del número de días de helada (período 99-00 a 08-09).

3.5. Ciclos de hielo-deshielo

Tabla VI. Número de ciclos de hielo-deshielo, en el aire (TA) y el suelo (período 99-00 a 08-09).

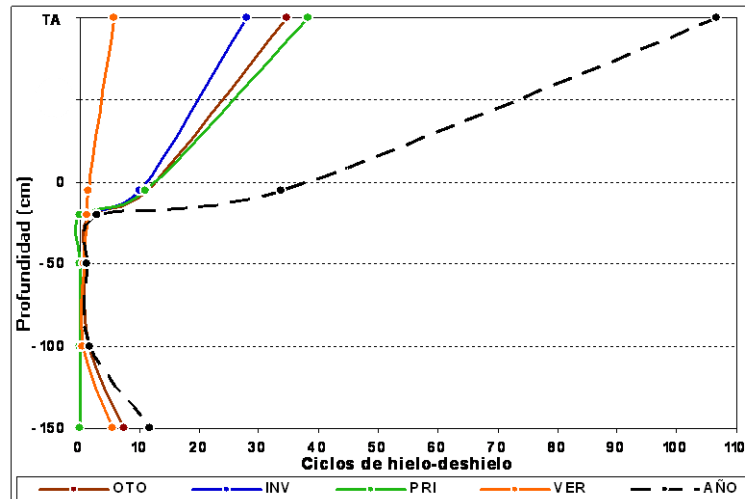
Lugar / nivel	Otoño			Invierno			Primavera			Verano			Oto.	Inv.	Prim.	Ver.	Anual Sep-Ago
	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.					
PV / TA	8,1	17,8	10,2	7,3	12,8	8,0	9,8	10,9	17,6	4,0	0,7	1,0	34,8	28,0	38,3	5,7	106,7
CV-GR / -05	2,7	7,3	2,8	2,7	2,7	4,7	4,3	2,7	4,0	0,7	0,8	0,0	11,2	10,0	11,0	1,5	33,7
-20	0,0	1,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	1,7	0,0	0,1	1,2	2,8
-50	0,0	0,7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,0	0,8	0,0	0,0	0,6	1,3
-100	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,1	1,3	0,0	0,1	0,6	1,8
-150	8,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	4,4	7,5	0,0	0,0	5,5	11,8

PV: Pico del Veleta (3.395 m); CV-GR: Corral del Veleta-glaciar rocoso (3.107 m).

En rosa: Presencia de ciclos hielo-deshielo.

Por su significado morfoclimático y su relación directa con las condiciones periglaciares, resulta del máximo interés tener en consideración el número de ciclos hielo-deshielo (2 cambios de fase térmica = 1 ciclo) registrados en el suelo en contraste con los habitualmente contabilizados en el aire (tabla VI, figura 7). El centenar de ciclos presentes en el aire, se reduce a un tercio en la superficie del suelo (33,7), aunque distribuidos durante todo el año, mientras que a mayor profundidad apenas se registran entre 1 y 3 ciclos en los meses de transición fría-cálida-fría. Como ya se vio en el apartado anterior (número de días de hielo-deshielo) el repunte de ciclos a -150 cm es atribuible a muy ligeras oscilaciones de pocas décimas entorno a 0 °C. Aún tratándose de ciclos “teóricos” o “potenciales” pues no consideramos por el momento su intensidad ni duración, su distribución entre niveles resulta altamente significativa, mostrando que la morfogénesis periglacial actual (capa activa) se reduce a los

primeros centímetros del suelo. El número “real” de ciclos debe ser, muy probablemente, aún menor.



Figuras 7. Distribución, estacional y anual, del número de ciclos de hielo-deshielo (período 99-00 a 08-09).

3.6. Ritmo térmico

Además de los valores climáticos medios hasta ahora comentados, resulta de gran interés mostrar conjuntamente la evolución térmica del suelo a través del ritmo de la temperatura diaria a lo largo del año (figura 8). Se ha constatado la existencia de un marcado patrón de comportamiento térmico, altamente regular en toda la serie disponible, formado por:

- 1 período prolongado “cálido” o de deshielo (D), con temperaturas siempre positivas, de principio-mitad de verano a mitad de otoño.
- 1 período prolongado “frío” o de suelo helado (H), con temperaturas siempre negativas, de mitad de otoño a principio-mitad de verano.
- 2 períodos cortos de transición o de hielo-deshielo (T1, T2) con cambio de estado del suelo, uno otoñal y otro preveraniego.

Sin coincidir necesariamente con los límites de los períodos anteriores, se distinguen también 7 fases térmicas, diferenciadas por el cambio de sentido y ritmo de la evolución térmica, presentes en todos los años estudiados. Las fechas de inicio y final, de buena parte, de estos 4 períodos y 7 fases vienen determinadas por el papel termorregulador ejercido por la presencia-ausencia de manto nival, su espesor y humedad (circulación de agua de fusión) (Salvador Franch *et al.*, en prensa).

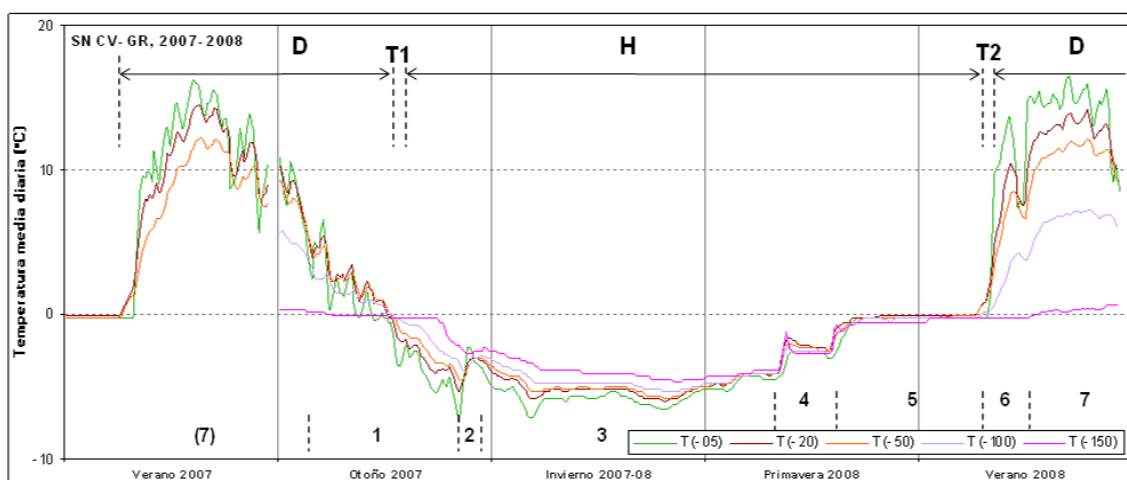


Figura 8. Ejemplo de ritmo térmico anual del suelo (campana 2007-2008).

4. Discusión y conclusiones

A pesar del carácter sucinto y aún incompleto del análisis climático realizado, éste revela la existencia de valores y de un comportamiento térmico claramente diferenciado del nivel superficial del suelo (-5 cm) respecto a los intermedios (-20 a -100 cm) y fundamentalmente al más profundo (-150 cm). Predomina la situación de englamamiento prolongado en detrimento del período de deshielo (menor duración) y sobretodo del de hielo-deshielo, prácticamente solo superficial. Se confirma la llegada, aunque puntual, de temperaturas positivas hasta el nivel más profundo (techo del *permafrost*), suficientes para explicar su estado de degradación-fusión (corta estación cálida) y provocar la dinámica comprobada de hundimiento-deslizamiento del glaciar rocoso suprayacente. No se alcanza, en profundidad, el nivel de estabilidad térmica (oscilación anual 0 °C).

Bibliografía

- Gómez Ortiz, A. (coord.) et al. 2002, *Mapa geomorfológico de Sierra Nevada. Morfología glaciar y periglacial*, Junta de Andalucía, Granada, 84 pp.
- Gómez Ortiz, A. (coord.) et al. 2006, *La unidad geomorfológica del Veleta: enclave singular de Sierra Nevada*, Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio Medio Ambiente, Bilbao, 69 pp.
- 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, pp. 93-110.
- Gómez-Ortiz, A., Salvador-Franch, F., Sanjosé, J.J., Palacios, D., Schulte, L. & Atkinson, A.D.J. 2008, 'Degradación de hielo glaciar fósil y *permafrost* en Sierra Nevada (periodo 2001-2007)' in *Trabajos de Geomorfología en España*, ed. Benavente & Gracia, Cádiz, pp. 257-260.
- Hoelzle, M., Wegmann, M. & Krummenacher, B. 1999, 'Miniature Temperature Dataloggers for Mapping and Monitoring of Permafrost in High Mountain Areas: First Experience from the Swiss Alps'. *Permafrost and Periglacial Processes*, 10, pp. 113-124.
- Ramos, M., Gómez-Ortiz, A., Palacios, D., Tanarro, L.M., Salvador-Franch, F., Crespo, F. & Bretón, L. 2002, 'Método térmico para el estudio de la distribución de permafrost en Sierra Nevada' in *Periglaciarismo en montaña y altas latitudes*, ed. Serrano & García, Valladolid, pp. 91-123.
- Ramos, M., Gómez-Ortiz, A., Salvador-Franch, F. & Schulte, L. 1998, 'Evolución térmica de la capa activa en la estación geomorfológica de la planicie La Feixa-La Màniga, 2.150 m (Macizo de Calmquerdós, Pirineo oriental)' in *Procesos biofísicos actuales en medios fríos* ed. Gómez, Salvador, Schulte & García, Barcelona, pp. 73-97.
- Salvador-Franch, F., Gómez-Ortiz, A. & Palacios, D. en prensa, 'Comportamiento térmico del suelo en un enclave de alta montaña mediterránea con *permafrost* residual: Corral del Veleta (Sierra Nevada, Granada, España)' in *Ambientes periglaciares, permafrost y variabilidad climática*, (II Congr. Ibérico de la IPA, Sigüenza, 2009).

Sanjosé, J.J., Atkinson, A.D.J., Gómez Ortiz, A. & Salvador Franch, F. 2007a, 'Técnicas geodésicas y fotogramétricas aplicadas al análisis de la dinámica y cartografía del glaciar rocoso activo del Corral del Veleta (Sierra Nevada) durante el periodo 2001 – 2007'. *Mapping. Revista Internacional de Ciencias de la Tierra*, 22, pp. 26-32.

Sanjosé, J.J., Atkinson, A.D.J., Salvador-Franch, F. & Gómez-Ortiz, A. 2007b, 'Application of geomatic techniques to monitoring of the dynamics and to mapping of the Veleta rock glacier (Sierra Nevada, Spain)'. *Zeits. f. Geomorph. N.F.*, 51 (2), pp. 79-89.