

PROCESOS GEOMÓRFICOS PERIGLACIARES EN EL PANDERO DEL MULHACÉN (SIERRA NEVADA). EXPERIMENTACIÓN DE CAMPO SOBRE LA EFECTIVIDAD DE LA GELITURBACIÓN Y DEL HIELO EN EL SUELO

A. GÓMEZ ORTIZ & F. SALVADOR FRANCH

Area de Geografía Física y Servei de Gestió i Evolució del Paisatge.
Universitat de Barcelona.

Resumen: Se describen e interpretan las experiencias de terreno sobre procesos periglaciares en dos estaciones del Pandero del Mulhacén (3.200 m, Sierra Nevada). A lo largo de los controles llevados a efecto (1991-1995) en coladas de piedras y microfiguras geométricas se ha determinado la precariedad de la geliflución y del hielo intersticial en las primeras y la eficacia de la crioturbação y del *pip krake* en las segundas. La magnitud de los movimientos de la formación detrítica ha sido determinada a través de marcas de pintura en clastos, varillas y clavos metálicos asentados en el terreno. Los resultados, contrastados con la información de los registros térmicos, indican predominio de estabilidad en las coladas de piedras pero movimientos continuos en las microfiguras, reflejados en ascensos del orden de 1-3 cm. en las varillas y clavos metálicos.

Palabras clave: coladas de piedras, experimentación, figuras geométricas, procesos periglaciares, Sierra Nevada (España).

Abstract: Periglacial processes were studied at two experimental plots at the Pandero of the Mulhacén (3.200 m, Sierra Nevada). During the period from 1991 to 1995 dynamics of gelifluction of block fields and geometrical micro figures, just as interstitial ice in the first and cryoturbation and pip krake of the second were determined. The quantity of the movements of the detrital formations has been defined by drawing marks on the clasts and setting metallic sticks and nails in the ground. The results, contrasted with temperature records, indicate stability of the block fields, but continuous movements of the micro figures, demonstrated by the lifting of the metallic sticks and nails.

Key words: Block fields, experimentation, geometric figures, periglacial processes, Sierra Nevada.

1. Introducción: Procesos periglaciares en Sierra Nevada

Sierra Nevada forma parte de las Béticas y es el macizo más elevado de la Península Ibérica. Sus altas cumbres durante el Pleistoceno fueron modeladas por los hielos quedando albergados los glaciares más

meridionales de Europa. En la actualidad, aún resultan también muy nítidas las huellas periglaciares heredadas y subactuales (Gómez Ortiz, Díaz del Olmo & Simón, 1994; Gómez Ortiz & Salvador, 1994).

Debido a la considerable altitud y volumen que ofrece la Sierra, cota media en su sector occidental por encima de los 3.000 m, los procesos geomórficos fríos mantienen interés morfológico y parecen ser los principales responsables de la evolución de los modelados, como mínimo por encima de los 2.600 - 2.700 m. Tres tipos de indicadores geoecológicos confirman la importancia de este tipo de procesos:

- climáticos*, entre los que sobresalen las frecuencias térmicas en torno a los cero grados, la persistencia de nieves y vientos y la acción combinada de la humectación-deseccación y del hielo-deshielo (tabla 1).
- biológicos*, reflejados en la existencia de determinadas especies vegetales oromediterráneas adaptadas a suelos móviles (Soutadé & Baudière, 1970; Serve, 1972; Molero *et al.*, 1992).
- geomorfológicos*, evidenciados por la existencia de modelados específicos, propios de países fríos.

Tabla 1. Ritmo térmico y de precipitación en el observatorio de Sierra Nevada-Albergue Universitario, 2.510 m. Período de observación: 1973-1977; 1984-1987; 1990-1992 (*Thermic rhythm and precipitation of the observatory Sierra Nevada-Albergue Universitario, 2.510 m. Observed periods: 1973-1977; 1984-1987; 1990-1992*).

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Año	%
D ⁺	2,9	1,8	2,7	4,5	16,4	27,1	31,0	30,8	27,7	18,8	11,2	5,4	180,3	49,4
D ⁺ -	15,0	11,4	16,8	17,6	13,4	2,8	0,0	0,2	2,1	10,4	13,2	14,7	117,6	32,2
D ⁻	13,1	15,0	11,5	7,9	1,3	0,1	0,0	0,0	0,2	1,8	5,6	10,9	67,3	18,4
Pt (mm)	77,8	116,8	86,4	70,7	47,6	63,1	9,5	5,4	30,4	83,5	84,4	100,1	775,7	100,0
DPT	9,0	10,5	7,3	8,3	8,7	6,7	1,8	1,8	2,5	7,5	10,5	6,3	80,7	100,0
Pn (mm)	55,3	85,0	55,7	50,5	18,4	0,2	0,0	0,0	4,6	13,3	51,7	36,2	371,1	47,8
DPn	7,0	8,3	6,3	6,7	2,3	0,3	0,0	0,0	0,3	1,3	6,0	4,3	42,6	52,8

D⁺: Número de días sin-helada; D⁺ -: Número de días de hielo-deshielo; D⁻: Número de días de helada contínua; Pt: Precipitación total; DPT: Número de días de precipitación; Pn: Precipitación en forma de nieve; DPn: Número de días de precipitación en forma de nieve.

Pero a pesar del valor que poseen estos tres tipos de indicadores que suministran, ante todo, información cualitativa y empírica de la dinámica morfogénica periglaciares (tabla 2), se desconoce, al igual que sucede en la mayoría de las montañas ibéricas, la magnitud de los procesos originarios y el alcance que tienen en los modelados resultantes y en la dinámica de los ecosistemas. Conscientes de ello, venimos desarrollando, desde 1990, un programa de actuación que incluye una serie de trabajos experimentales de campo encaminados a determinar el grado de funcionalidad de los procesos periglaciares en diferentes ambientes geoecológicos de Sierra Nevada, habiéndose obtenido ya resultados parciales, aunque valiosos (Gómez Ortiz & Salvador, 1994).

2. Morfotopografía del Pandero del Mulhacén

El Pandero del Mulhacén coincide con el tramo más elevado del declive oriental del picacho del Mulhacén (3.483 m) quedando instalado entre los rebordes meridionales del circo de Siete Lagunas y el Alto del Chorrillo (2.707 m), y a sotavento de la Allana (3.420 m). El roquedo que arma el enclave es

Tabla 2. Procesos y formas periglaciares actuales (*Actual periglacial processes and forms*).

Porción de espacio	Situación preferencial	Procesos principales		Geoforma y afinidad biogeográfica
		Meteorización	Evacuación	
Circo glaciar	Cabeceras de barrancos	Gelifracción	Avalanchas, caída libre y deslizamientos	Morrenas de <i>nevé</i> (Corral del Veleta), conos y coladas de bloques
Valles glaciares	Tránsito a los circos (paredes rocosas)	Gelifracción	Caída libre	Conos y taludes de bloques (litófilos en los márgenes distales)
"Borreguiles"	Fondos de circo y de barrancos	Físico-químico	Gelisoliflucción	Lóbulos vegetalizados con <i>Carex</i> , <i>Ranúnculus</i> y <i>Sphagnum</i>
Vertientes	Altiplanicies cimeras (>3.000 m)	Gelifracción, crioeolización y erioturbación mantienen las formas heredadas (figuras geométricas, "mers de roches"), (pastizal psicoxerófilo muy puntual)		
	Tramos altos de lomas (>2.900-3.400 m)	Gelifracción, crioeolización, erioturbación y arroyada nival mantienen las formas heredadas (coladas y mantos de piedras), (pastizal psicoxerófilo y enebreal rastrero de <i>Festuca indigesta</i> <i>Arenaria imbricata</i> , <i>Genista baetica</i> , etc.)		
	Tramos medios de lomas (2.500-2.900 m)	Gelifracción Humectación-deseccación Crio-eolización	Geliturbación Geliflucción Arroyada nival Crio-reptación	Coladas y lóbulos de piedras, rellanos de vertiente, terracitas, microfiguras geométricas

cristalino (Unidad de la Caldera del manto del Mulhacén) predominando los micaesquistos fuertemente tectonizados. El conjunto del sector aglutina una franja altitudinal de 370 m (3.420 - 3.050 m) y tributa aguas al río de Trevélez. El perfil que ofrece la ladera del Pandero es convexo-cóncavo y esta modelado por un mar de bloques de calibre muy variado. La parte culminante coincide con algunos resaltes rocosos (*tors*) que marcan el tránsito hacia la línea de cumbres conformada, en esta ocasión, por un retazo de planicie erosiva (la Allanada) (fig. 1).

Desde la óptica glaciar no parece probable que el enrasamiento culminante del Mulhacén, la Allanada, fuera labrada por los hielos pero sí cabe que éstos actuaran en su declive oriental, en el Pandero, durante un período frío anterior a la formación de su actual morfología. Probablemente debería de tratarse de una placa de hielo de dimensiones considerables alojada por debajo de los resaltes rocosos (*tors*) ya citados. Por las formas de modelado que ofrece este tramo de ladera la acción glaciar sería ténue e incapaz de excavar el substrato y generar circo bien definido, al contrario de lo sucedido en los vecinos cuencos de Siete Lagunas. Esta hipótesis de trabajo está avalada por la presencia de un cierto número de bloques elongados pulidos y estriados esparcidos en las partes bajas del Pandero y, también, por el rastrillado y acanaladuras detectadas en los *tors* y espigones rocosos que coronan el cuenco de Peñón Negro.

Las morfologías que definen el Pandero del Mulhacén son, ante todo, de origen periglaciar. Se trata de extensos mantos detríticos asentados en formaciones de vertiente ricas en gravas y arenas. Los clastos de grueso calibre tienden a dibujar amalgamas de megacoladas, guirnalda, lóbulos y figuras geométricas. Pero cuando en superficie la fracción mineral la componen cantos decimétricos, gravas y arenas empastados en finos, las formas predominantes son geométricas del tipo flotante. En el primer caso, ofrecen medidas decamétricas y métricas y su origen es heredado. En el segundo caso, sus dimensiones son métricas y decimétricas y de funcionalidad activa.

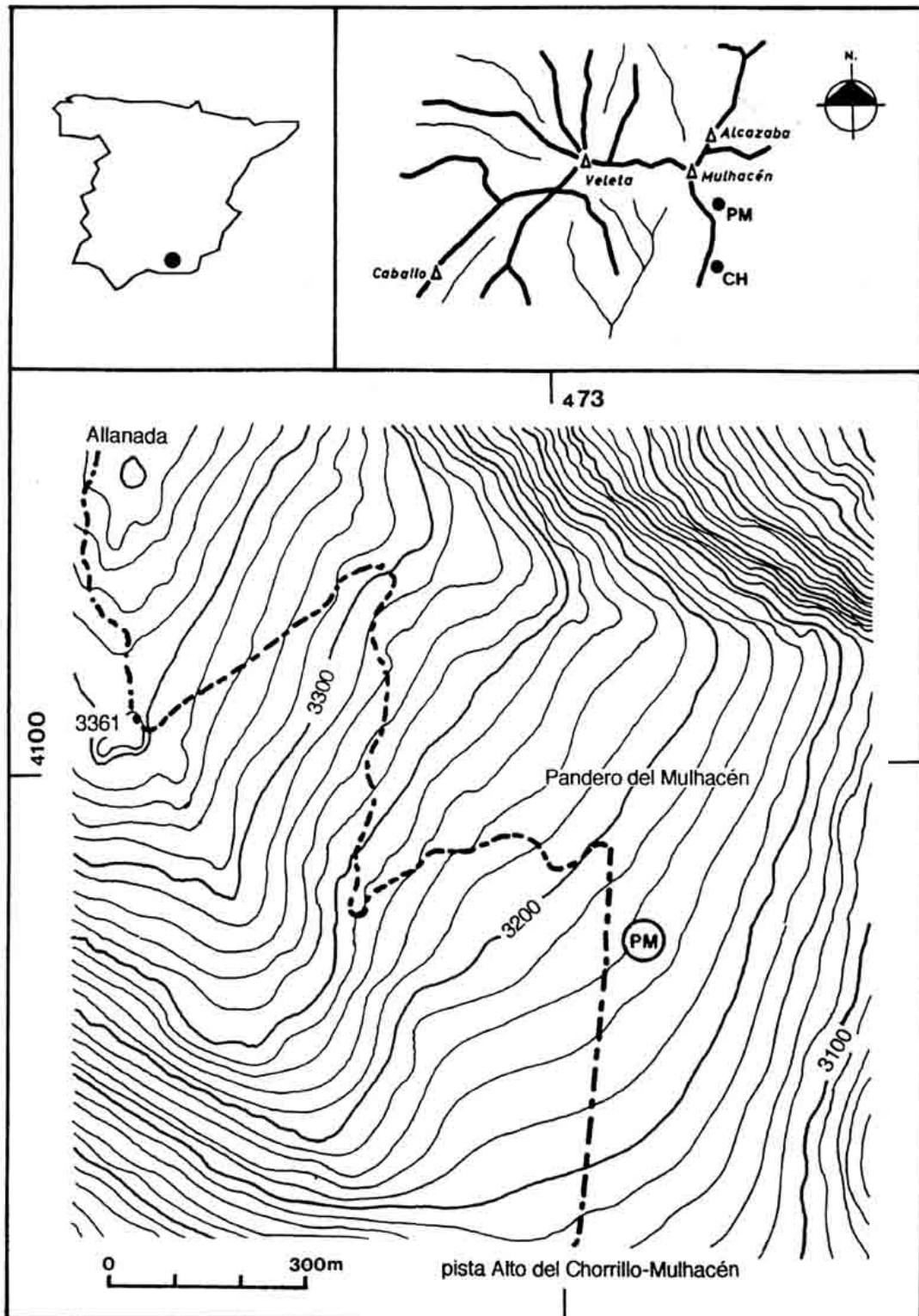


Fig.1. Esquema general del nivel de cumbres de Sierra Nevada y topografía del Pandero del Mulhacén con indicación de la estación experimental (General scheme of summit level of Sierra Nevada and topography of the Pandero del Mulhacén with location of the experimental plots).

3. Experimentación en el Pandero del Mulhacén

3.1. Objetivos

Dos cuestiones principales han interesado estudiar en esta ocasión:

- el grado de deslizamiento planar de los clastos en las coladas, generada por soligeliflujión, y reptación, principalmente.
- el grado de movimiento vertical de la fracción mineral en la que se asientan las microfiguras geométricas tipo flotante, motivada, ante todo, por crioturbación e hielo de exhudación.

3.2. Metodología, materiales y trabajos efectuados

La manipulación "in situ" se realizó en la estación experimental "Pandero del Mulhacén" (PM) instalada a 3.200 m de altitud, por debajo de la pista que asciende al picacho del Mulhacén desde el Alto del Chorrillo. Se trata de dos parcelas (PM-1 y PM-2) asentadas en un sector dominado por coladas de piedras (pendiente media 10 grados) y pequeñas figuras geométricas flotantes donde el calibre de la fracción superficial es menor (fig. 2). La formación clástica de PM-1 la componen bloques subangulosos de micaesquistos y cuarzos dispuestos en posición subvertical y horizontal y sin matriz, lo que supone profusión de vacíos por donde fluyen las aguas de fusión nival. Las medidas de los ejes oscilan entre los 30x12 cm y los 15x8 cm. Por lo que respecta a PM-2 la fracción detrítica es de menor calibre y más rica en arenas y gravas que en PM-1, tal como se muestra en la tabla 3 y figura 3.

Tanto en PM-1 como en PM-2 la cubierta vegetal es muy testimonial (> 5%), pues a lo sumo aparecen pequeños matos de xerófitos oromediterráneos (*Festuca indigesta*, *Arenaria imbricata*, *Cytisus oromediterraneus*, etc.). En cuanto a la información climática de estos años (1990-1995) se obtuvo a través del observatorio meteorológico del IRAM (Instituto de Radioastronomía Milimétrica, instalado en la loma del Dílar (2.860 m), interesándonos, particularmente, la temperatura del aire, que, con una frecuencia de dos horas se registra automáticamente. Su tratamiento estadístico permitió la obtención de gradientes térmicos y su proyección a diferentes cotas altitudinales (Barrio, 1990) (tabla 4), así como también el ritmo térmico mensual durante el período analizado, sobre todo, para las cotas de 2.700 m y 3.200 m, tal como se indica en la tabla 5 y figura 4.

3.2.1. Protocolos realizados para el funcionamiento de PM-1

- Realización: julio de 1990.
- Selección de un rectángulo (4,45 x 4,50 m) orientado según sus lados mayores conformes a la pendiente (10 grados).
- Trazado paralelo de tres líneas de pintura sobre los clastos. La labor se llevó a término tomando como referencia un cordel tirante superpuesto al manto clástico. La primera y tercera líneas (blanca

Tabla 3. Granulometría de la formación superficial de PM-2, en % (*Grain size of the surface formations of PM-2, in %*).

	50-20	20-10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,2	0,2-0,1	0,1-0,05	<0,05
Nivel superficial (0/-12 cm)	18,8	9,9	12,2	14,5	11,6	4,1	4,6	6,4	6,3	11,6
Nivel medio (-12/-24 cm)	5,4	11,2	9,4	13,1	14,1	6,6	7,4	9,2	8,7	14,9
Nivel profundo (> -24 cm)	0,0	10,5	9,1	11,2	10,8	6,1	11,2	12,5	10,9	17,7

Tabla 4. Proyecciones térmicas a diferentes cotas y distribución media anual. Estación de referencia: IRAM, 2.860 m; Período: 1990-1995 (*Thermic projection at different altitudes and mean annual distribution. Reference station: IRAM, 2.860 m; Period: 1990-1995*).

Cota (m)	Días con hielo-deshielo			Días con temperatura permanente negativa	Días sin helada	
	congelante	fundente	total		tm >6°C	tm <6°C / >0°C
2.600	90	59	149	62	119	35
2.700 Chorrillo	86	55	141	77	113	34
2.800	87	46	133	91	108	33
2.860 IRAM	87	41	128	100	103	34
2.900	87	38	125	106	100	34
3.000	74	34	108	129	94	34
3.100	52	34	86	158	87	34
3.200 PM-1, 2	46	35	81	170	80	34
3.300	40	35	75	183	73	34
3.400	36	35	71	193	67	34
3.481 Mulhacén	36	35	71	198	61	35

Tabla 5. Ritmo térmico anual. Período septiembre 1991 / agosto 1995 (*Annual thermic rhythm, september 1991 / august 1995*).

Período (sept. a agosto)	1991-1992		1992-1993		1993-1994		1994-1995	
	Td	%	Td	%	Td	%	Td	%
Cota 2.700 m (Chorrillo)								
Días sin deshielo	99	27,3	109	29,8	108	29,6	74	20,4
Días con hielo-deshielo	116	31,9	108	29,5	107	29,3	121	33,3
Días sin hielo	148	40,8	149	40,7	150	41,1	168	46,3
Total días con observación	363	100,0	366	100,0	365	100,0	363	100,0
Período (sept. a agosto)	1991-1992		1992-1993		1993-1994		1994-1995	
Cota 3.200 m (Pandro)	Td	%	Td	%	Td	%	Td	%
Días sin deshielo	143	39,4	152	41,5	158	43,3	117	32,2
Días con hielo-deshielo	104	28,6	91	24,9	86	23,6	113	31,1
Días sin hielo	116	32,0	123	33,6	121	33,1	133	36,7
Total días con observación	363	100,0	366	100,0	365	100,0	363	100,0

Td: Total número de días (septiembre / agosto); %: porcentaje

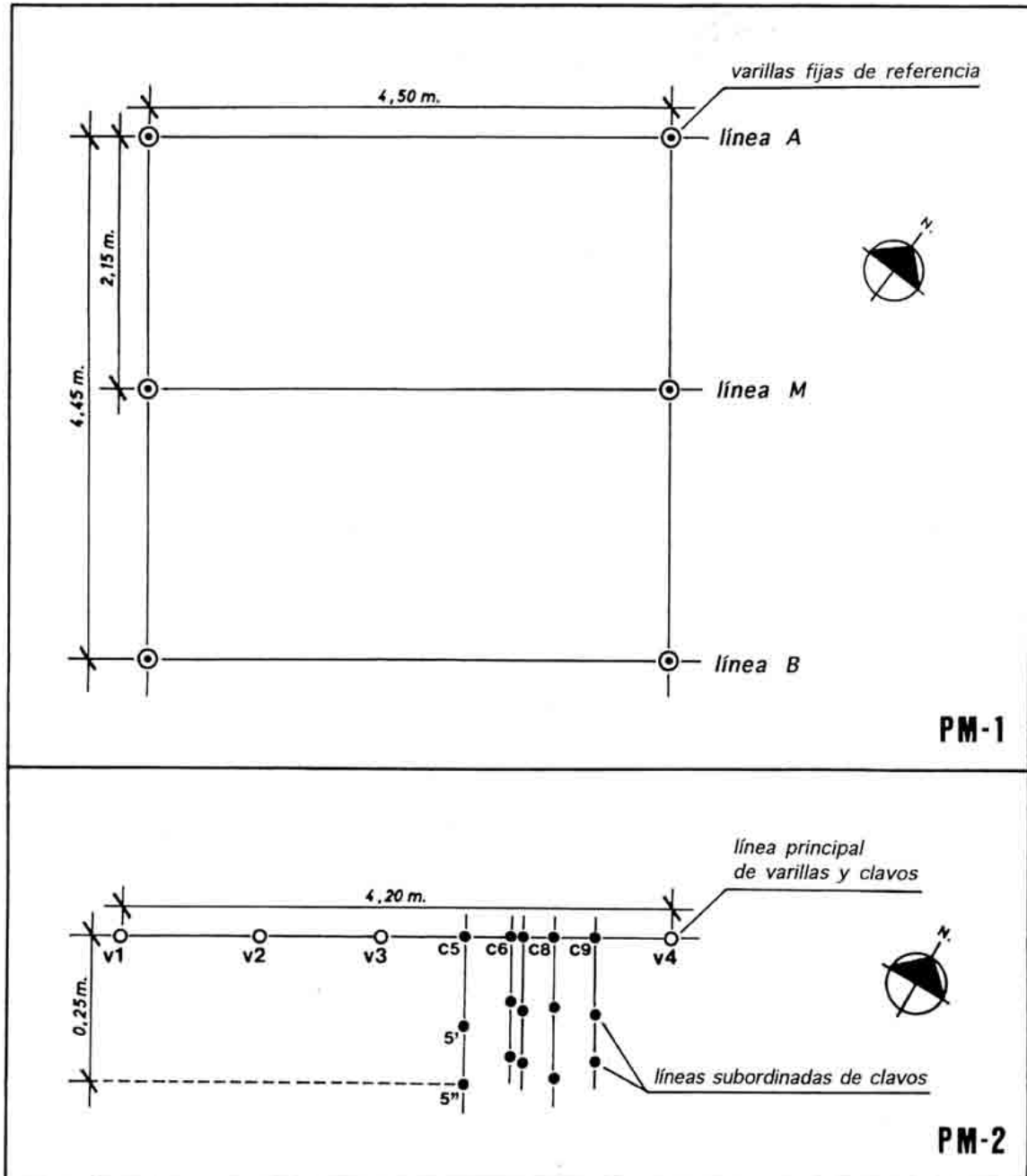


Fig. 2. Dispositivos experimentales en Pandero del Mulhacén, PM-1 y PM-2. La escala en PM-2 es orientativa (Experimental devices of the Pandero del Mulhacén, PM-1 and PM-2. The scale of PM-2 is guiding).

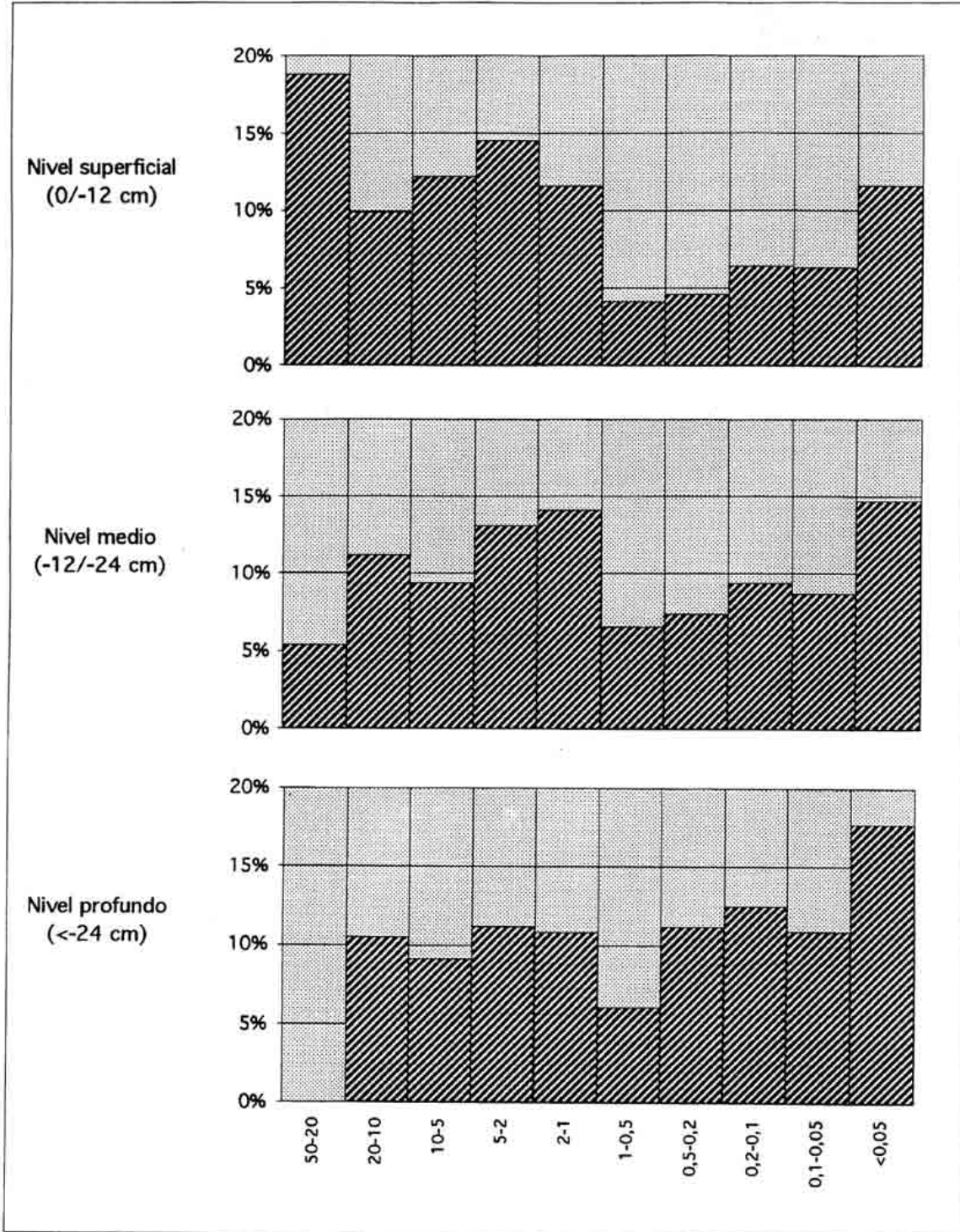


Fig. 3. Histograma granulométrico de la formación superficial de PM-2 (Grain size histogram of the surface formation of PM-2).

- línea A- y amarilla -línea M-, respectivamente) coincidieron con los lados menores del rectángulo. La segunda línea (azul -línea B-), paralela y a igual distancia de las anteriores.
- En los inicios y términos de cada uno de los trazos de pintura se anclaron varillas de hierro de 60 cm de longitud actuando como puntos fijos.
- Barrido fotográfico de cada una de las líneas de pintura (tomas a 1,20 m de altura cubriendo tramos de 1 m).
- Anotaciones de interés.

3.2.2. Protocolos realizados para el funcionamiento de PM-2

- Realización: julio de 1991
- En un reducto de 2,5 m² dominado por figuras geométricas flotantes se introdujeron en el suelo varillas (longitud 60 cm) y clavos metálicos (25 cm de longitud) dispuestos en tres hileras.
- La primera hilera cubrió una distancia de 420 cm y la compusieron 4 varillas y 5 clavos. La segunda hilera sumó 57 cm y la formaron 5 clavos. Y la tercera hilera igual distancia y número de clavos que la anterior. La disposición y características de todos los elementos metálicos se refleja en la tabla 6.
- Fotografiado
- Anotaciones de interés

Tabla 6. Disposición y características de las varillas y clavos de PM-2 (*Position and characteristics of the sticks and nails of PM-2*).

hilera	número varilla / clavo	instalación (año)	distancia respecto a (*)	longitud (cm) varilla / clavo	porción enterrada (cm)	porción aérea (cm)
1a.	1	1991	0,0	60	43,0	17,0
	2	1991	125,0	60	46,0	14,0
	3	1991	228,5	60	48,5	11,5
	5	1991	301,0	25	17,0	8,0
	6	1991	320,0	25	15,0	10,0
	7	1991	328,0	25	17,5	7,5
	8	1991	340,0	25	17,0	8,0
	9	1991	358,0	25	18,5	6,5
	4	1991	420,0	60	48,5	11,5
2a.	5'	1991	17,0 (5)	25	25	0,0
	6'	1991	11,0 (6)	25	25	0,0
	7'	1991	11,0 (7)	25	25	0,0
	8'	1991	11,0 (8)	25	25	0,0
	9'	1991	11,0 (9)	25	25	0,0
3a.	5''	1991	26,0 (5)	25	25	0,0
	6''	1991	19,5 (6)	25	25	0,0
	7''	1991	20,0 (7)	25	25	0,0
	8''	1991	21,5 (8)	25	25	0,0
	9''	1991	19,5 (9)	25	25	0,0

(*) la primera hilera toma como referencia la varilla 1; la segunda y tercera hileras al referido entre paréntesis.

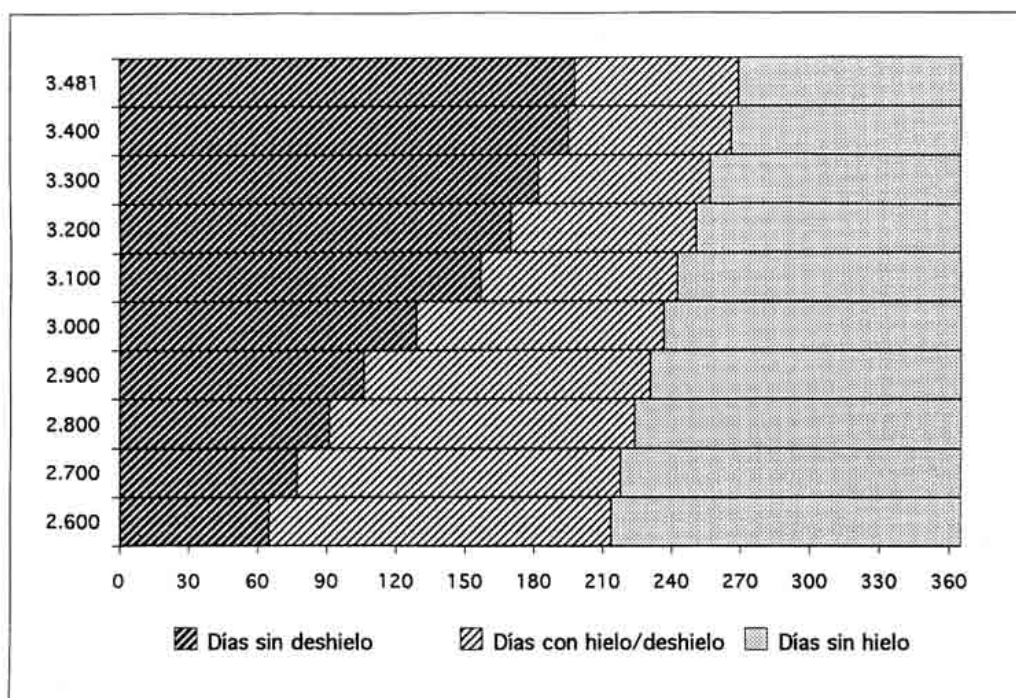


Fig. 4. Proyección térmica en altura. Estación de referencia: IRAM, 2.860 m (*Altitudinal thermic projection. Reference station: IRAM, 2.860 m*).

3.2.3. Controles llevados a término

Todos los controles se efectuaron en los mes de julio/agosto. Para PM-1 fueron 5 (1991, 1992, 1993, 1994 y 1995) y 4 para PM-2 (1992, 1993, 1994 y 1995).

Estación PM-1

- Reconstrucción de la línea de pintura a través de la superposición de un cordel fino tirante a partir de las varillas guía extremas.
- Medición de las deformaciones detectadas en las líneas de pintura de los clastos a partir del cordel guía.
- Secuencia fotográfica de los tramos ya controlados.
- Anotaciones de interés.

Estación PM-2

- Medición de la parte externa de las varillas y clavos (desplazamiento en la vertical) a partir de la altura de referencia (situación inicial).
- Fotografiado de detalle
- Anotaciones de interés.

4. Resultados e interpretación

4.1. Sobre la migración de clastos en coladas de piedras

Lo más sobresaliente es la escasa movilidad de los clastos. Durante los cuatro controles llevados a cabo sólo se han detectado desplazamientos muy puntuales, siempre afectando a los tramos de menor calibre asentados sobre paquetes de arenas, gravas y finos. Estos, en general, son movimientos individualizados de carácter tangencial acompañados de giros, vuelcos o rotaciones.

El escaso desplazamiento detectado en el paquete clástico parece deberse a la sólida trabazón y encajamiento que ofrecen los bloques, pues unos con respecto a otros se encuentran muy bien empaquetados, con suficientes vacíos para que escurran con facilidad las aguas de fusión y finos. Esta estructura de la formación detritica imposibilita que puedan existir migraciones asociadas al hielo intersticial y explica la aparente estabilidad del medio siempre y cuando no se remueva o altere el depósito subyacente que es la que absorbe las aguas de filtración dada su adecuada granulometría. La remoción de este paquete, tal como sucede en aquellos lugares donde se han creado taludes por apertura de pistas o viales (carretera del Veleta, pista a Capileira, etc.), supone la pérdida de cohesión de la masa clástica suprayacente y, consecuentemente, el desarrollo de deslizamientos y/o desprendimientos.

La máxima movilidad detectada ha coincidido en aquellos tramos donde los clastos (siempre menores de 12-15 cm de eje mayor) reposan en disposición planar sobre matriz de finos (foto 1). La razón de tal huida la relacionamos con procesos gelifluídales dada la capacidad plástica de la matriz durante las fases del deshielo. Este mecanismo hídrico explica las discontinuidades con que aparecen los trazos de pintura y los vuelcos, rotaciones, giros y enterramientos de los cantos, afectados, además, por el hielo de exhudación (*pip krake*). Los desplazamientos acumulados durante el período de observación oscilan entre los 3 cm y 9 cm.

4.2. Sobre los movimientos de geliturbación reflejados en varillas y clavos

Los movimientos han sido mensurados en la vertical. Un detalle de ellos se especifica en la tabla 7, así como una panorámica general en la figura 5 y foto 2.

Los movimientos en la vertical, traducidos sobre todo en ascensos, son reflejo del comportamiento físico de las capas internas del suelo (procesos de geliturbación debidos a cambios de volumen por los ciclos de hielo-deshielo). Desconocemos cuál es la profundidad máxima de congelación que se alcanza en este sector del Pandero del Mulhacén durante la estación fría pero por comparación con el Alto del Chorrillo, instalado 510 m por debajo de aquél, debe registrar valores superiores a los 50 cm, aunque en ningún momento con características de pergelisol, pues de existir éste en la Sierra sólo parece posible localizarlo en el seno del Corral del Veleta, a juzgar por los sondeos geoeléctricos llevados a cabo en el verano de 1995 (Gómez Ortiz & Salvador, 1996). La zona sometida a mayores ciclos de hielo-deshielo en el Pandero también la desconocemos pero suponemos que no ha de ser inferior a 25-30 cm, si tenemos en cuenta los valores de movilidad entre varillas y clavos (tablas 7 y 8).

Fundamentalmente, el dinamismo que explica los movimientos verticales se debe a la riqueza local de finos de las capas más internas (-12/-24 cm; < 0,5 mm = 40,0 % y 52,3 % en los niveles medio y profundo, respectivamente), que las dota de una gran capacidad para la absorción de agua. Este comportamiento físico supone que durante los episodios de congelación y fusión se desarrollen en el seno de la masa presiones hidrostáticas diferenciadas como respuesta a los aumentos y disminuciones de volumen en el seno de la masa confinada (Washburn, 1979). El proceso resulta muy efectivo durante las fases de deshielo de las capas superficiales asentadas aún sobre niveles profundos congelados (Pissart, 1982, 1987). En tales casos, que resultan muy repetitivos durante los períodos pre y postnivales debido a los acusados contrastes térmicos entre día y noche, los empujes ascensionales son máximos.

A partir de tales razonamientos puede explicarse la magnitud de los movimientos verticales, que en el cómputo total siempre resultan positivos, es decir ascensionales. En conjunto se observa un mayor dinamismo en los clavos (valores medios acumulados entre 3,0 y 14 cm) que en las varillas (valores medios acumulados entre 2 y 3,5 cm), tal como se indica en la tabla 8. Tales variaciones creemos que están relacionadas con la desigual

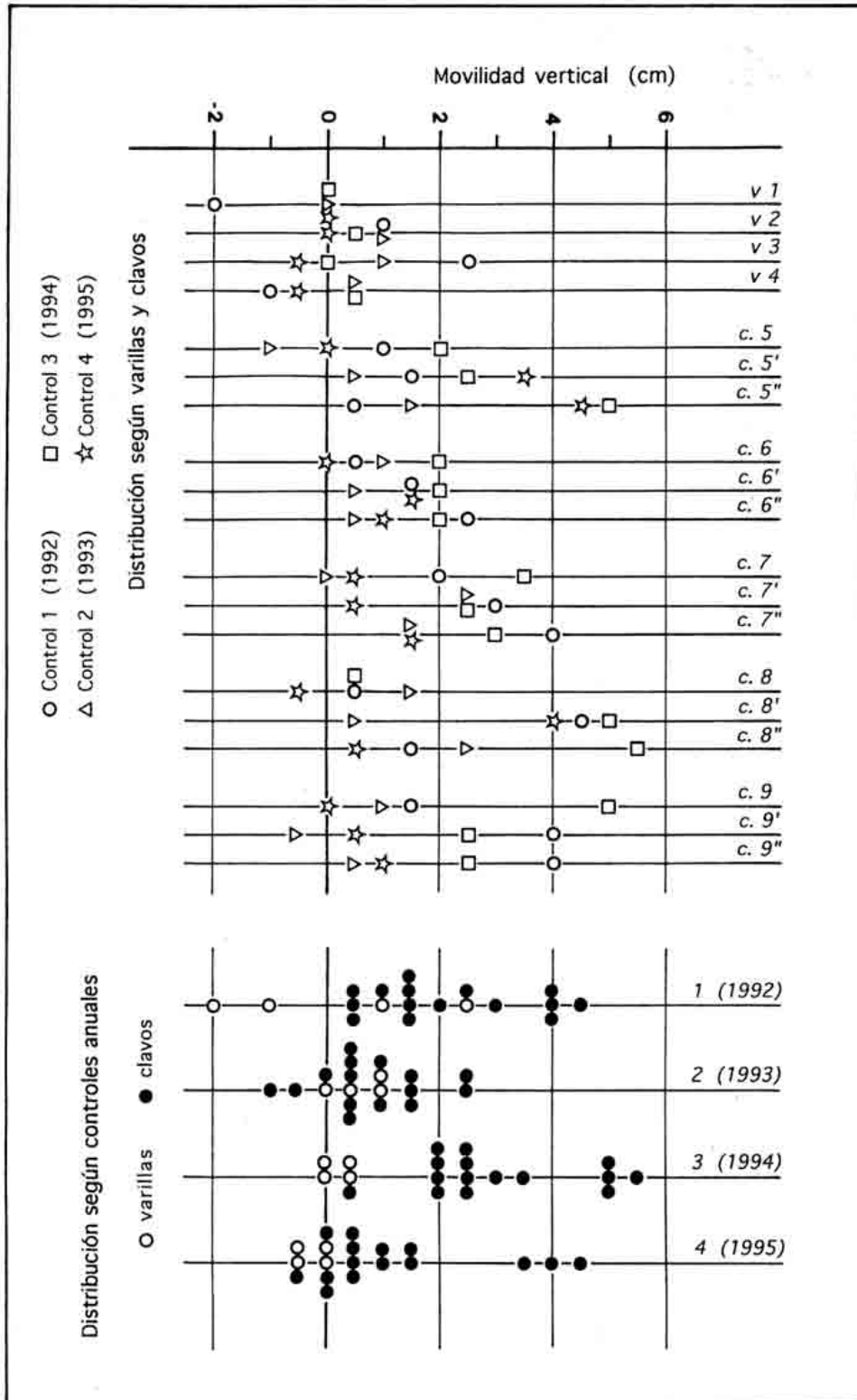


Fig. 5. Esquema orientativo de la movilidad de clavos y varillas en PM-2. (Guiding scheme of the mobility of the sticks and nails of PM-2).

Tabla 7. Movilidad media vertical detectada en varillas y clavos, en cm (*Mean vertical mobility of the sticks and nails, in cm*).

hilera	nº varilla / clavo	control 1 (1992)	control 2 (1993)	control 3 (1994)	control 4 (1995)
1a.	1	- 2,0	0,0	0,0	0,0
	2	+ 1,0	+ 1,0	+ 0,5	0,0
	3	+ 2,5	+ 1,0	0,0	- 0,5
	5	+ 1,0	- 1,0	+ 2,0	0,0
	6	+ 0,5	+ 1,0	+ 2,0	0,0
	7	+ 2,0	0,0	+ 3,5	+ 0,5
	8	+ 0,5	+ 1,5	+ 0,5	- 0,5
	9	+ 1,5	+ 1,0	+ 5,0	0,0
	4	- 1,0	+ 0,5	+ 0,5	- 0,5
2a.	5'	+ 1,5	+ 0,5	+ 2,5	+ 3,5
	6'	+ 1,5	+ 0,5	+ 2,0	+ 1,5
	7'	+ 3,0	+ 2,5	+ 2,5	+ 0,5
	8'	+ 4,5	+ 0,5	+ 5,0	+ 4,0
	9'	+ 4,0	- 0,5	+ 2,5	+ 0,5
3a.	5''	+ 0,5	+ 1,5	+ 5,0	+ 4,5
	6''	+ 2,5	+ 0,5	+ 2,0	+ 1,0
	7''	+ 4,0	+ 1,5	+ 3,0	+ 1,5
	8''	+ 1,5	+ 2,5	+ 5,5	+ 0,5
	9''	+ 4,0	+ 0,5	+ 2,5	+ 1,0

efectividad de las presiones hidrostáticas en los distintos niveles del suelo. Las máximas intensidades deben ejercerse en la franja establecida entre la superficie del suelo y el frente de penetración de los clavos, es decir, en los primeros 25 cm (valores medios acumulados de 6,3 cm, entre extremos de 3,0 cm y 14 cm).

Por debajo de tal profundidad el suelo no parece sufrir procesos de congelación y fusión tan frecuentes ni tan intensos pues las temperaturas internas en estos niveles deben mantener valores periódicos mucho más homogéneos. Esto supone que el deshielo total resulte más tardío que en la capa suprayacente aunque de forma más sostenida, sin apenas episodios de fusión-recongelación (fig. 6). Por tal motivo, al quedar ancladas las varillas en estas franjas más internas, los movimientos ascensionales resultan de menor magnitud (valores medios acumulados de 2,5 cm, entre extremos de 1,5 cm y 3,0 cm), incluso que los detectados en el Alto del Chorrillo, planicie instalada 500 m. por debajo del Pandero (Gómez Ortiz & Salvador, 1994), tal como se evidencia en la tabla 9.

Las causas de estas variaciones, del orden de 6,5 cm como valor medio acumulado durante el periodo 1991-1993, entre Chorrillo y Mulhacén deben radicar en una diferenciada eficacia de la geliturbación (Pandero, ascensiones entre 2 y 3,5 cm; Chorrillo, ascensiones entre 1 y 15 cm). Tal desajuste ha de residir en los mayores ciclos de hielo-deshielo y en el menor número de días de hielo continuado que registran los suelos de Chorrillo en comparación con los del Pandero (224 días frente a 195 y 208 días frente a 293, respectivamente), lo que nos lleva a admitir que Chorrillo se encuentra en la franja altitudinal de la montaña donde la eficacia morfogénica del hielo resulta óptima (tabla 5). Hay otro hecho que también debe ejercer influencia en estos acontecimientos, aunque desconocemos con precisión su cometido. Nos queremos referir a la acción del viento sobre la nieve. Por la topografía local, el Chorrillo es un enclave bien expuesto a los vientos, por lo que está sometido a una desneveación repetitiva, circunstancia muy favorable al desarrollo de

Tabla 8. Movimientos acumulados en varillas y clavos. Período 1992-1995 (*Accumulative mobility of the stichs and nails. Period 1992-1995*).

Hilera 1	Varilla nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Clavo nº									
Movilidad acumulada (cm)		2,0	2,5	3,0	4,0	3,5	6,0	3,0	7,5	1,5
Hilera 2	Clavo nº					5'	6'	7'	8'	9'
Movilidad acumulada (cm)						8,0	5,5	8,5	14,0	7,5
Hilera 3	Clavo nº					5''	6''	7''	8''	9''
Movilidad acumulada (cm)						11,5	6,0	10,0	10,0	8,0

Tabla 9. Comparación de movilidad en varillas entre Chorrillo y Pandero. Período 1991-1992 y 1992-1993 (*Comparison of mobility of sticks between Chorrillo and Pandero. Period 1991-1992 and 1992-1993*).

	Movimientos acumulados (cm)	Granulometría (<0,2 mm) medios (cm)	nivel <12 cm (%)	Días sin deshielo (días)	Días con hielo-deshielo (%)	Días con hielo-deshielo (días)	Días con hielo-deshielo (%)
Chorrillo(2.700 m)	entre 1,0 y 15,0	8,5	24,6	208	28,4	224	30,6
Pandero(3.200 m)	entre 2,0 y 3,5	2,0	36,8	293	40,5	195	26,6

ciclos de hielo-deshielo en los niveles superiores del suelo. El Pandero, por el contrario, instalado por debajo de planicie culminante, goza de sobrealimentación nival, lo que supone que el suelo permanezca más tiempo cubierto de nieve, mitigándose, en él, el número total de oscilaciones en torno a los cero grados.

Respecto a los movimientos verticales de signo negativo (descendentes) no creemos que se deban a hundimiento en sentido estricto, sino a invasiones de material superficial procedente de aguas arriba, pues su llegada acorta la parte aérea de la varilla o clavo, tal como sucedió en el control 1º (varillas 1 y 4), control 2º (clavos 5 y 9') y control 4º (varilla 3 y 4 y clavo 8) en los que se detectaron reducciones que oscilaron entre 0,5 y 2 cm. Los procesos que explican tales enterramientos son varios y, probablemente, actuando de manera conjunta: hielo de exudación (*pip krake*), hielo intersticial, criodéfloción y geliflujión.

5. Conclusiones

El Pandero del Mulhacén se encuentra instalado en una franja altitudinal donde los ciclos de hielo-deshielo en el suelo continúan manteniendo interés particular en los procesos morfogénicos fríos, siendo la geliturbación la principal responsable de la movilidad de la fracción mineral superficial de los suelos.

Las experiencias de terreno llevadas a cabo en figuras geométricas tipo flotante han demostrado que la capa de mayor susceptibilidad a los cambios físicos derivados de las alternancias de congelación-fusión debe corresponder a los primeros 25-30 cm, pues es en ella donde la movilidad de los clavos ha resultado máxima. Por debajo de tal profundidad la duración del hielo permanente es más prolongada, lo que se traduce en un menor dinamismo de la geliturbación.

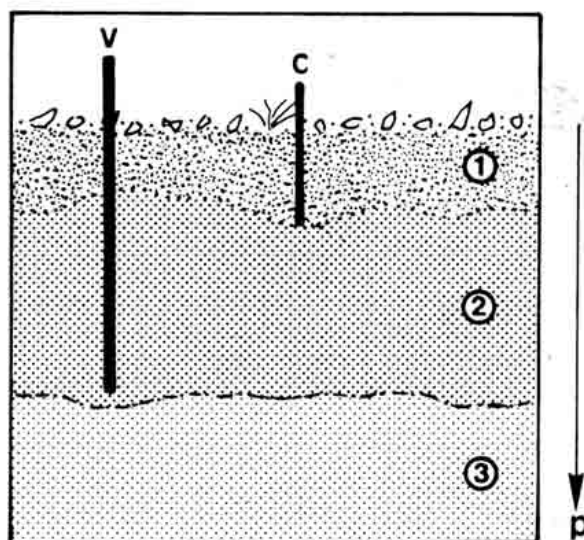


Fig. 6. Comportamiento físico del suelo ante los procesos de congelación-fusión (*Physical soil dynamics with regard to the freezing-melting processes*).

v.: varilla; c.: clavo; p.: frente de congelación; 1: franja con mayores ciclos de hielo-deshielo; 2: franja con penetración más tardía del hielo y con menos ciclos de hielo-deshielo; 3: franja sin hielo-deshielo. Los espesores de cada franja no guardan proporción entre sí (v.: stich; c.: nail; p.: freezing front; 1: band with major cycles of freezing-melting; 2: band of maximum penetration of ice and with less cycles of freezing-melting; 3: band without freezing-melting. The thickness of each band doesn't guard the proportion).

Por lo que respecta a la movilidad en coladas de piedras hay que señalar su alto grado de estabilidad, pues el hielo de exhudación y las aguas de fusión son incapaces de engendrar movimientos. La causa deriva de la eficaz trabazón en que se encuentran los cantos, lo que supone un efectivo protector de los paquetes detríticos profundos. Sólo en aquellos tramos donde el material es menudo (> 5 cm) y está envuelto de gravas y arenas se han detectado vuelcos, flujos y movimientos rotacionales, aunque siempre de magnitudes centimétricas.

La comparación de resultados obtenidos entre el Alto del Chorrillo (2.700 m) y Pandero del Mulhacén (3.200 m) evidencia que en Sierra Nevada la franja altitudinal óptima donde los procesos fríos poseen mayor interés morfológico encuentra su techo en los 2.900 m, pudiendo estar su límite inferior en los 2.600 m.

Las referencias térmicas tomadas en consideración en este trabajo se refieren a la temperatura del aire. Conscientes de las limitaciones que ello supone para nuestros objetivos lo que interesa a partir de ahora es determinar el comportamiento de la temperatura del suelo (en superficie y a diferente profundidad) y determinar con mayor precisión la oscilación del frente de congelación y fusión y su relación con el dinamismo de la fracción mineral.

Agradecimientos

Al IRAM por facilitarnos amablemente las series de registros climáticos de su estación meteorológica de la loma del Dílar. A Miguel Mateo García, por el tratamiento estadístico de la información climática del IRAM. A Francesc Vilar, por su colaboración en la parte gráfica.

El presente trabajo se inscribe en el Proyecto de la DGICYT PS92-0110: *Evolución del paisaje postglaciar en la montaña mediterránea: los niveles culminantes de Sierra Nevada. Significación geográfica.*



Foto 1. Detalle del movimiento de clastos en colada de piedras, en PM-1 (*Detail of the movements of the clasts as block stream, in PM-1*).



Foto 2. Detalle de la distribución de las varillas y clavos metálicos, en PM-2 (*Detail of the distribution of the sticks and metallic nails, in PM-2*).

Referencias bibliográficas

- Barrio, G. del** (1990). El régimen térmico estacional en alta montaña. in: García Ruiz, J.M. (ed.). *Geoecología de las áreas de montaña*. Geoforma Ed., Logroño. pp.115-143.
- Gómez Ortiz, A.; Díaz del Olmo, F. & Simón, M.** (1994). Periglaciario en las cordilleras béticas. in: Gómez Ortiz, Simón, Salvador (eds.). *Periglaciario en la Península Ibérica, Canarias y Baleares*. Serv. Public., Univ. Granada. pp.165-188.
- Gómez Ortiz, A. & Salvador, F.** (1994). Experimentación de campo en figuras geométricas periglaciares en Sierra Nevada (Granada). *Geomorfología en España*. Logroño, pp. 189-208.
- Gómez Ortiz, A. & Salvador, F.** (1996). El glaciario de Sierra Nevada, el más meridional de Europa. In: *Los glaciares de las montañas españolas*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Santiago. Santiago de Compostela (en prensa).
- Molero Mesa, J.; Pérez Raya, F. & Valle Tendero, F.** (dirs.) (1992). *Parque Natural de Sierra Nevada*. Editorial Rueda. Madrid.
- Pissart, A.** (1982). Expériences de terrain et de laboratoire pour expliquer la genèse des sols polygonaux décimétriques striés. *Studia Géomorphologica Carpatho-Balcanica*, XV, pp. 39-47.
- Pissart, A.** (1987). *Géomorphologie périglaciaire*. Laboratoire de Géomorphologie et Géologie du Quaternaire. Université de Liège.
- Serve, L.** (1972). *Recherches comparatives sur quelques groupements végétaux orophiles et leurs relations avec la dynamique périglaciaire dans les Pyrénées Orientales et la Sierra Nevada*. Centre Universitaire de Perpignan.
- Soutadé, G. & Baudière, A.** (1970). Végétation et modelés des hauts versants septentrionaux de la Sierra Nevada. *Annales de Géographie*, 436, pp. 709-736.
- Washburn, A.L.** (1979). *Geocryology. A survey of periglacial processes and environments*. Edward Arnold. London. 406pp.