

DINÁMICA SUPERFICIAL Y ESTADO ACTUAL DEL GLACIAR ROCO SO DE LA MALADETA OCCIDENTAL (PIRINEOS)

M. GONZÁLEZ GARCÍA^{(1)*}, E. SERRANO⁽²⁾,
J. J. SANJOSÉ BLASCO⁽³⁾, J. J. GONZÁLEZ TRUEBA⁽⁴⁾

¹ Dpto. de Geografía,
Universidad de Málaga

² Dpto. de Geografía,
Universidad de Valladolid

³ Dpto. de Expresión Gráfica,
Universidad de Extremadura

⁴ Dpto. de Geografía, Prehistoria y Arqueología,
Universidad del País Vasco

RESUMEN. *El glaciar rocoso de la Maladeta Occidental se localiza en el Macizo de la Maladeta (Pirineos Centrales). Un análisis geomorfológico de detalle, complementado con registros térmicos continuos del suelo, medidas de la temperatura basal del manto nival (BTS) y el control de su dinámica mediante la utilización de técnicas geomáticas, permiten demostrar la actividad actual de esta forma periglaciaria. El control sistemático mediante el uso de GPS diferencial de quince puntos fijos distribuidos por la superficie del glaciar rocoso, muestran las variaciones verticales y horizontales durante las campañas de campo 2008, 2009 y 2010. La dinámica registrada por el momento responde a un modelo de glaciar rocoso de baja actividad en claro desequilibrio térmico, con rápidas variaciones interanuales. Su localización en un ambiente periglaciario marginal en medios de alta montaña templada como son los Pirineos, le convierte en un eficaz geoindicador morfoclimático.*

Surface dynamic and current status of the Madaleta rock glacier (Pyrenees)

ABSTRACT. *The Maladeta Occidental rock glacier is located in the Maladetas massif (Central Pyrenees). A geomorphologic analysis of detail, complemented by continuous ground thermal measurement, bottom temperature of winter snowcover (BTS) and the control of its dynamics by means of geomatics techniques, allow demonstrating the recent activity of this periglacial landform. Systematic monitoring using differential GPS in fifteen fixed points distributed by the rock glacier surface, show the vertical and horizontal variations during the field survey 2008, 2009 and*

2010. Dynamics recorded for the present time responds to a rock glacier model of low activity in clear thermal imbalance, with fast interannual variations. The location in marginal periglacial environments of high temperate mountain like the Pyrenees, make it a useful morphoclimatic geoinicator.

Palabras clave: procesos periglaciares, glaciar rocoso, alta montaña, Maladeta, Pirineos.

Key words: periglacial processes, rock glacier, high mountain, Maladeta, Pyrenees.

Enviado el 13 de septiembre de 2010

Aceptado el 7 de enero de 2011

* Correspondencia: Dpto. de Geografía, Universidad de Málaga. E-mail: mariagon@uma.es

1. Introducción

En los Pirineos se han identificado catorce glaciares rocosos activos de los cuales nueve se localizan en el Pirineo aragonés (Serrano y Agudo, 1998; Serrano *et al.*, 1999). Presentan unas características comunes en cuanto a localización y morfodinámica, concentrados en los macizos de mayor altitud y masividad del Pirineo Axial, entre 0°15'O y 0°50'E (Argualas-Infiernos, 3071 m; Posets, 3200 m; Maladetas, 3404 m), situados al abrigo de circos glaciares y crestas rocosas, bajo cumbres que superan los 3000 m.s.n.m y con orientación preferente N y NO, exceptuando casos como el glaciar rocoso del Posets con orientación ENE. En general, son de pequeñas dimensiones y los más representativos son los de circo, estrechamente relacionados con el proceso de deglaciación de la alta montaña.

La presencia de glaciares rocosos en medios de alta montaña templada -como los pirenaicos- y bajo condiciones periglaciares marginales, muestran una sensibilidad a los cambios ambientales convirtiéndolos en eficaces geoindicadores morfoclimáticos (Serrano y Agudo, 1998; Serrano *et al.*, 1999, 2006; Lugon *et al.*, 2004; Delaloyé, 2004; Sanjosé *et al.*, 2007). La constatación de movimiento actual, junto a la presencia de hielo, son los dos factores fundamentales para clasificar un glaciar rocoso como activo (Barsch, 1978). Los estudios de su dinámica muestran que las tasas de movimiento monitorizadas generalmente son bajas (Serrano *et al.*, 2006, 2010). Las variaciones de la pendiente y la topografía subyacente condicionan que el movimiento no sea igual en toda la superficie de cada aparato, a lo que hay que añadir las variaciones estacionales e interanuales, en respuesta a las variaciones climáticas. En este sentido, la reciente aplicación de técnicas de medición geomáticas (geodesia, GPS y fotogrametría) se han mostrado especialmente útiles para el control de la dinámica de glaciares rocosos.

El presente trabajo analiza el estado actual y la dinámica del glaciar rocoso de la Maladeta, midiendo el desplazamiento horizontal y vertical, para establecer sus características superficiales y demostrar que es un glaciar rocoso activo. Se presentan los datos obtenidos en las campañas de campo 2008, 2009 y 2010.

2. La zona de estudio y el glaciar rocoso de la Maladeta

El glaciar rocoso de la Maladeta Occidental, se localiza en el macizo del mismo nombre, concretamente en el circo de Alba, entre las crestas de la Maladeta Occidental (Punta Delmás, 3158 m) y el pico de Alba (3107 m). El Macizo de la Maladeta ($42^{\circ}38'51''\text{N}-0^{\circ}38'30''\text{E}$) está constituido por una alineación de cumbres con orientación preferente NO-SE vertebrado desde el pico de Alba hasta el pico Russell (3205 m), labrado en los materiales cristalinos del batolito de la Maladeta compuesto por granodiorita, aflorando en las zonas más elevadas material granítico, el cual se muestra más resistente a los procesos erosivos. Este carácter masivo de los materiales cimeros ha permitido la particular morfología del macizo, de fuertes disimetrías morfológicas (Martínez de Pisón, 1986, 1989; García Ruiz *et al.*, 1992). La elevada altitud media y la masividad del conjunto, derivada fundamentalmente de su carácter morfoestructural, permite una mayor conservación de los cuerpos helados, y el desarrollo favorable de procesos y formas periglaciares. El circo de Alba, como el conjunto del macizo, estuvo ocupado por un glaciar durante la Pequeña Edad del Hielo, hoy reducido a un helero de pequeñas dimensiones (González Trueba *et al.*, 2008). El glaciar rocoso de la Maladeta se ubica al exterior de la morrena frontal de dicho período, bajo el collado del Alba y sin conexión directa, orientado al norte y con desarrollo paralelo a la cresta de la Maladeta Occidental (Figs. 1 y 2).

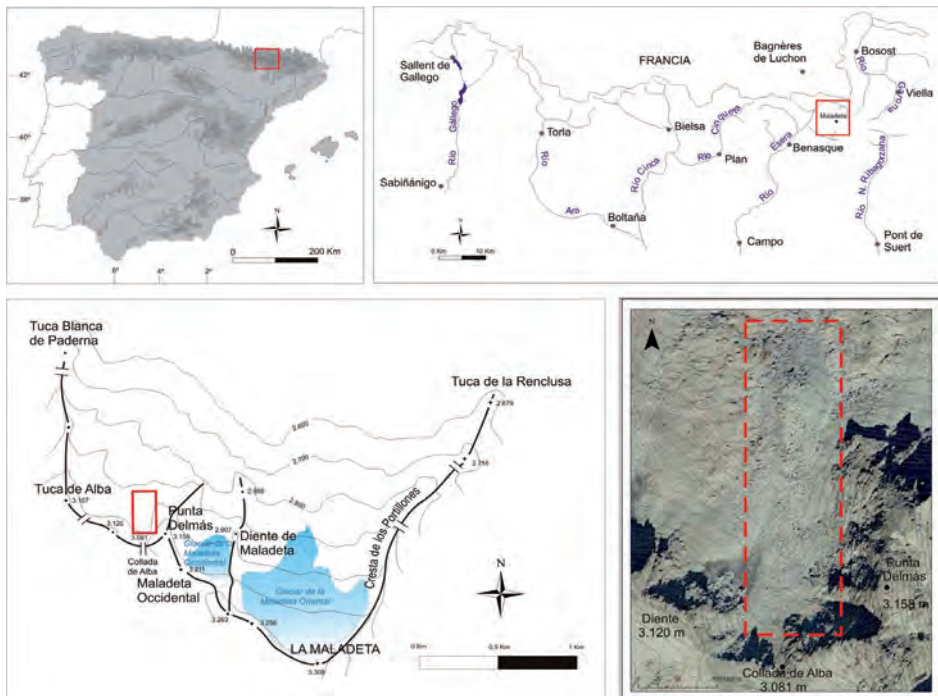


Figura 1. Localización del glaciar rocoso de la Maladeta Occidental.

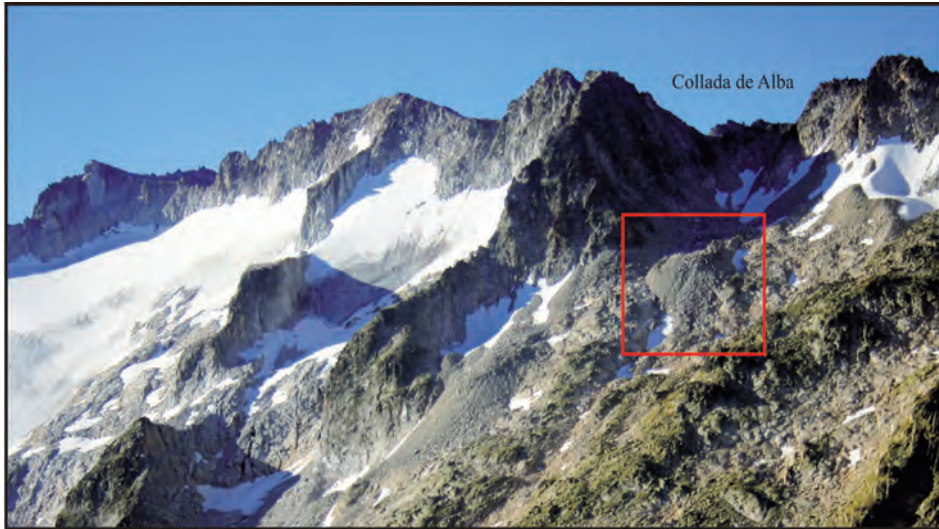


Figura 2. Vista general del glaciar rocoso en el Macizo de la Maladeta.

El estudio del glaciar rocoso de la Maladeta es reciente. Ha sido clasificado como activo a partir de su morfología, y descritos los datos esenciales de sus características superficiales (Serrano y Agudo, 1998; Serrano *et al.*, 1999). En estudios más concretos referentes a la temperatura basal del manto nival (BTS) y la estructura térmica del manto nival sobre el glaciar rocoso de la Maladeta, se registraron unas bajas temperaturas que indican la posible existencia de un cuerpo helado o hielo, y su influencia sobre el régimen térmico del suelo en el glaciar rocoso (Serrano y Agudo, 1998, 2004).

Se trata de un glaciar rocoso de derrubios (“debris-rock glaciers”) alimentado y conectado a las áreas fuentes, principalmente las provenientes de los taludes laterales y a las paredes de la cabecera o Collada de Alba. La fuente de alimentación por el lateral oriental tiene lugar a través de canales de aludes y una sucesión de conos de derrubios en la base del escarpe, que por su morfología, unos se muestran más activos que otros. Por el lateral occidental, es un gran cono de derrubios en la base del Pico Diente el que aporta los materiales al aparato. El glaciar rocoso tiene una lengua de 45 m de ancho por 210 metros de largo, orientado al norte y con una pendiente media de 20°. Se emplaza entre los 2910 m del frente y los 3010 m de la raíz bajo el Collado de Alba, paralelo a la cresta de la Maladeta Occidental por el este y próximo a la morrena de la Pequeña Edad del Hielo por el oeste (Fig. 3). Presenta una morfología bien desarrollada con una textura superficial de bloques, de medio-gran tamaño. Se caracteriza por una forma generalmente simple sin desarrollo de cordones arqueados transversales nítidos, exceptuando los localizados en la zona próxima al frente y los cordones laterales bien desarrollados. En la zona central puede observarse un cierto vaciado de materiales o colapso, y una acumulación y abombamiento en la zona frontal dando lugar a un frente abrupto e inestable, de 15 m de altura.



Figura 3. El glaciar rocoso de la Maladeta Occidental. 1. Frente del glaciar rocoso; 2. Posición morfostratigráfica del glaciar rocoso; 3. Lengua del glaciar rocoso.

3. Metodología

Para el análisis de la actividad y dinámica del glaciar rocoso de la Maladeta se han aplicado técnicas geomorfológicas, geomáticas y de control térmico de suelos:

- Se ha llevado a cabo la elaboración de una cartografía geomorfológica de detalle como herramienta base para el inventario de formas y procesos, y su relación espacial y altitudinal.

- Para el control del flujo superficial del glaciar rocoso, tanto del movimiento horizontal como vertical, se han utilizado técnicas geomáticas cuya eficacia ya ha sido puesta de manifiesto en trabajos anteriores en otras áreas de montaña pirenaica (Sanjosé *et al.*, 1992, 2007; Sanjosé, 2003; Serrano *et al.*, 2006, 2010). La medición del movimiento se ha realizado mediante el control de quince varillas (Fig. 4) instaladas sobre la superficie del glaciar rocoso en el año 2008. En las campañas de 2009 y 2010 se ha medido la posición de las varillas mediante la técnica de GPS diferencial (GPS Leica System 500)

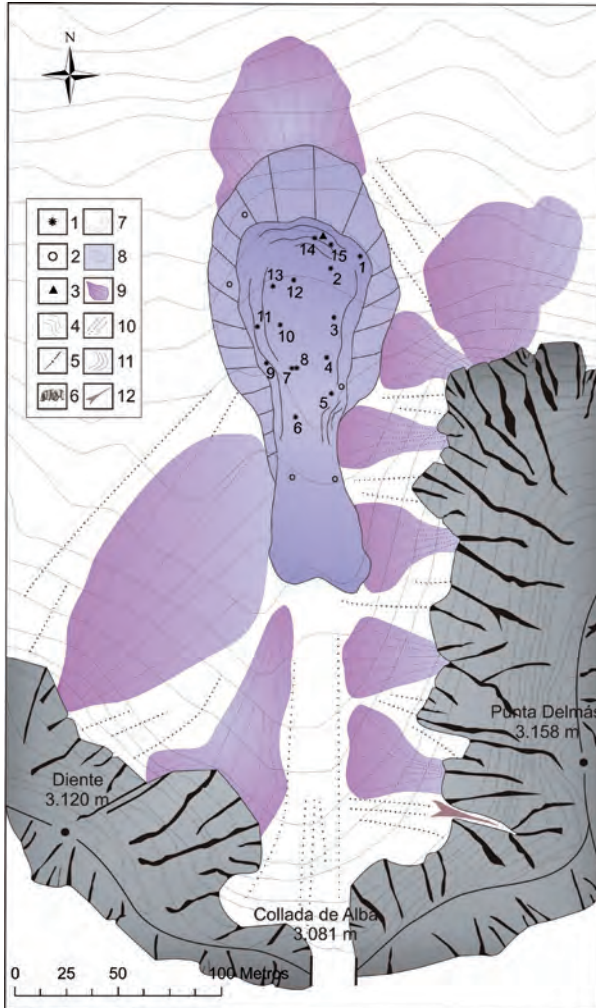


Figura 4. Localización de las varillas. Leyenda: 1. Varilla; 2. Medidas BTS; 3. Termómetro; 4. Curvas de nivel; 5. Cumbres y cordales; 6. Crestas y paredes rocosas; 7. Frente del glaciar rocoso; 8. Glaciar rocoso; 9. Cono de derrubio; 10. Derrubios de ladera (talud); 11. Arcos y surcos; 12. Canal de aludes.

y se han obtenido vectores de movimiento anual de alta precisión, con rangos de error de 2-3 cm, para las distintas partes del glaciar rocoso (Fig. 5).

- Se han realizado mediciones de la temperatura basal del manto nival (BTS), mediante termómetro modelo *HI 95501* y la monitorización del régimen térmico del suelo, mediante la instalación de termoregistradores continuos (*Sensor de temperatura Ibuttons modelos DS1922L y DS1921G*), orientados a confirmar la existencia de un cuerpo helado y completar la información sobre las condiciones térmicas actuales del suelo en el glaciar rocoso. Se han instalado tres termómetros de registro continuo sobre el glaciar y su entorno, y se han llevado a cabo cinco mediciones BTS en el invierno de 2010.



Figura 5. Mediciones sobre el glaciar rocoso y detalle de los puntos fijos.

4. Dinámica del glaciar rocoso

Un primer análisis morfológico superficial muestra una serie de caracteres que denotan la actividad del aparato; a través de la abundante alimentación de clastos en la zona de raíz, el desarrollo de cordones longitudinales, el derrubiamiento, morfología e inestabilidad del frente y sus laterales, la ausencia de líquenes en toda su superficie y en general la frescura de todas sus formas.

Los datos del régimen térmico del suelo arrojan en todos los casos cifras negativas, comprendidas entre -2°C a -6°C o inferiores. Los datos BTS de campañas anteriores y los realizados en las actuales, así como los registros térmicos continuos, permiten deducir la existencia de un cuerpo helado o núcleo de hielo en el interior del aparato (Tabla 1).

4.1. Movimiento superficial horizontal

El resultado de los datos analizados muestra una importante diferencia en la velocidad del desplazamiento horizontal del glaciar rocoso de la Maladeta Occidental de un periodo respecto al otro (Tabla 2 y Fig. 6), presentando un incremento de $4,8\text{ cm a}^{-1}$ en el periodo 2008-2009 a $8,9\text{ cm a}^{-1}$ para el periodo 2009-2010. Todas las varillas, a excepción de la 3 y la 14 se han desplazado, y tres de las cinco (varillas 2, 7, 8, 13 y 15)

Tabla 1. Datos térmicos del glaciar rocoso de la Maladeta. Medidas de la temperatura basal del manto nival

Registro	Altitud	BTS (°C)	T ^a Invierno
BTS 1996-1	2960	-6	--
BTS 1996-2	2950	- 5	--
BTS 1996-3	2940	-5,5	--
BTS 1996-4	2935	-6,2	--
BTS 1996-5	2930	-4,2	--
BTS 2010-1	2968	-3,6	-
BTS 2010-2	2986	-8,4	-
BTS 2010-3	2991	-6,5	-
BTS 2010-4	2998	-6	-
BTS 2010-5	3012	-6,7	-
DL	2948		-6,17

D.L.: medidas de la temperatura del suelo mediante datalogger (media de la temperatura registrada durante el mes de Marzo).

que más han variado de posición entre los periodos medidos, se localizan en el frente del glaciar rocoso. Los datos reflejan un movimiento superficial horizontal diferenciado por zonas, teniendo en cuenta a su vez las variabilidades inducidas por las características microtopográficas. La zona más dinámica es la frontal ($8,07 \text{ cm a}^{-1}$) donde se produce la mayor acumulación de materiales, seguidas del lateral oeste ($7,30 \text{ cm a}^{-1}$) y el eje axial central ($6,50 \text{ cm a}^{-1}$), siendo el eje este el que menor velocidad media de desplazamiento presenta ($4,97 \text{ cm a}^{-1}$). Estos datos permiten reconocer diferencias en la intensidad de la actividad superficial, siendo la zona central y oeste la más dinámica por estar dirigida por los aportes de las paredes del Collado de Alba y del Pico Diente, y menos energética la zona este al estar dominados por procesos gravitacionales (conos de derrubios).

La dirección del flujo del glaciar rocoso en el periodo estudiado responde a un desplazamiento definido por el empuje de los materiales desde los laterales hacia el eje central, confluyendo en la misma dirección hacia el frente con una leve tendencia general hacia el NO. A medida que disminuye la pendiente media y la zona se encuentre más alejada de los sectores de alimentación, el flujo varía, produciéndose principalmente una divergencia hacia los laterales frontales, reflejado en la dirección de desplazamiento de las varillas emplazadas en esta zona (hacia el NO en los puntos 12 y 13; y hacia el NE en los puntos 2 y 15), teniendo en cuenta la inestabilidad gravitacional que tiene lugar en las zonas próximas al frente.

El modelo de desplazamiento horizontal del glaciar rocoso de la Maladeta difiere del movimiento general de algunos glaciares rocosos estudiados en montañas templadas, caracterizados por superiores tasas de movimiento y cuya zona de mayor actividad se

Tabla 2. Desplazamiento superficial horizontal de las varillas del glaciar rocoso de la Maladeta Occidental (2008-2010)

Varilla	Total desplazamiento horizontal (m)	Periodo 2008-2009 Valor (cm a⁻¹) desplazamiento horizontal	Periodo 2009-2010 Valor (cm a⁻¹) desplazamiento horizontal	Valor medio desplazamiento horizontal (cm a⁻¹)
1	0,042	1,88	2,30	2,09
2	0,165	4,64	11,84	8,24
3	0,086	5,96	2,62	4,29
4	0,109	4,01	6,88	5,44
5	0,104	4,06	6,31	5,18
6	0,137	5,32	8,40	6,86
7	0,109	1,17	9,74	5,45
8	0,207	6,32	14,41	10,36
9	0,116	4,78	6,83	5,80
10	0,067	2,45	4,27	3,36
11	0,176	7,58	10,05	8,81
12	0,179	7,08	10,87	8,97
13	0,178	1,41	16,43	8,92
14	0,099	5,80	4,12	4,96
15	0,287	10,55	18,19	14,37

concentra en la zona axial central (Barsch, 1996; Konrad *et al.*, 1999; Kaab *et al.*, 2003; Kauffman y Ladstadter, 2003; Kaab, 2006; Haeberli *et al.*, 2006; Lugon, 2010) a excepción del glaciar rocoso del Posets, de menor movimiento respecto a los glaciares rocosos alpinos (Serrano *et al.* 2010) y por lo tanto más similar al glaciar rocoso que nos ocupa.

4.2. Movimiento superficial vertical

El movimiento vertical de la superficie de un glaciar rocoso es un indicador de la acumulación o pérdida de masa del mismo, y la mayoría de las varillas del glaciar rocoso de la Maladeta Occidental presentan valores negativos (Tabla 3). Los resultados obtenidos abarcan un promedio desde 2,24 a -9,65 cm a⁻¹. Las varillas emplazadas en puntos que presentan un aumento de espesor de la superficie del glaciar rocoso se localizan en zonas donde se esta acumulando material; en la varilla número 5 por los materiales depositados al pie del escarpe que alimentan al glaciar rocoso por el lateral este, y en las varillas 12 y 13 localizadas en la zona frontal, por la acumulación de los derrubios desplazados a través del eje lateral oeste y central. El mayor adelgazamiento de la superficie



Figura 6. Medidas de la velocidad del flujo superficial y dirección del desplazamiento (2008-2010).

del glaciar rocoso se produce en el eje lateral oeste (varillas 6, 7, 8, 9 y 10), que a su vez se presenta como una de las zonas con mayor velocidad de desplazamiento horizontal. Como consecuencia, a medida que disminuye la pendiente se acumula el material en la zona frontal del glaciar rocoso (engrosamiento de los puntos 12 y 13).

Tabla 3. Movimiento superficial vertical de los puntos estudiados sobre el glaciar rocoso de la Maladeta Occidental (2008-2010)

Varilla	Total movimiento vertical (m)	Periodo 2008-2009 Valor (cm a ⁻¹) movimiento vertical	Periodo 2009-2010 Valor (cm a ⁻¹) movimiento vertical	Total valor (cm a ⁻¹) movimiento vertical	Valor total* (cm) del cambio de espesor	Valor anual* (cm a ⁻¹) del cambio de espesor
1	-0,015	-1,39	-0,10	-0,75	-0,06	-0,03
2	-0,056	-5,38	-0,19	-2,78	0,00	0,00
3	-0,045	-2,08	-2,46	-2,27	-1,50	-0,75
4	-0,073	-4,37	-2,95	-3,66	-3,50	-1,75
5	-0,017	-1,70	0,00	-0,85	1,80	0,90
6	-0,240	-13,14	-10,88	-12,01	-19,30	-9,65
7	-0,128	-8,06	-4,70	-6,38	-9,07	-4,54
8	-0,118	-7,51	-4,33	-5,92	-4,72	-2,36
9	-0,117	-7,55	-4,18	-5,87	-7,70	-3,85
10	-0,134	-9,04	-4,37	-6,70	-11,10	-5,55
11	-0,062	-4,44	-1,79	-3,12	-0,18	-0,09
12	-0,028	-0,83	-2,01	-1,42	3,32	1,66
13	-0,016	-0,72	-0,91	-0,82	4,48	2,24
14	-0,035	-3,40	-0,06	-1,73	-0,11	-0,06
15	-0,114	-7,74	-3,62	-5,68	-1,59	-0,80

* El cambio de espesor ha sido calculado en función de la media de la pendiente del glaciar rocoso (20°).

5. Conclusiones

Los estudios llevados a cabo durante el periodo 2008-2010 determinan que el glaciar rocoso de la Maladeta Occidental es activo. Las medidas térmicas realizadas sobre el glaciar rocoso demuestran la existencia de un cuerpo helado y el control geomático ha confirmado el movimiento del glaciar rocoso. Presenta una velocidad media de $6,87 \text{ cm a}^{-1}$ y una dinámica de flujo controlada por las principales áreas fuentes, siendo el sector frontal, central y -especialmente- el lateral oeste, los más activos. La dirección del flujo del glaciar rocoso converge desde los laterales hacia el eje central, y desde el frente diverge hacia el exterior. La extensión y compresión de los flujos, que controlan el movimiento del glaciar rocoso, deforman el cuerpo helado. Las deformaciones verticales medidas también varían espacial y cuantitativamente, presentando zonas donde se produce un adelgazamiento y zonas donde el glaciar rocoso ha engrosado. La dominancia de adelgazamiento del glaciar rocoso, muestra una pérdida relativa de masa en el cuerpo helado y la fusión de los cuerpos de hielo de menor tamaño, manifestado en características superficiales como el colapso de la estructura en la zona central del glaciar rocoso. Por otro lado, los valores positivos localizados en la zona inferior, responderían a la sobreelevación de las áreas frontales consecuencia del desplazamiento horizontal constatado en este periodo.

La dinámica del glaciar rocoso responde a las características de los glaciares de baja actividad en evidente desequilibrio térmico. El glaciar rocoso presenta una alta variabilidad anual en su movimiento que interpretamos como una respuesta rápida a las variaciones térmicas interanuales. Este hecho es característico de los glaciares rocosos localizados en ambientes periglaciares marginales en medios de alta montaña templada, y como se ha registrado en los estudios de los medios del glaciar rocoso de las Argualas (Serrano *et al.*, 2006) y del Posets (Serrano *et al.*, 2010).

El corto periodo estudiado presenta limitaciones para establecer un definitivo diagnóstico del estado y evolución del glaciar rocoso, pues será la continuidad de las observaciones la que permita obtener resultados contrastados y a su vez útiles para el conocimiento en detalle de la dinámica y seguimiento general de la evolución del glaciar rocoso de la Maladeta Occidental como una herramienta eficaz geoindicadora de cambios ambientales.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, proyectos CGL-2007-65295 y CGL-2010-19729. Agradecemos la colaboración y ayuda de Javier de Matías, Ibai Rico, Raúl Martín, Manuel Gómez, Fernando Berenguer, Vicente Gómez.

Referencias bibliográficas

- BARSCH, D., (1978). Active rock glaciers as indicators for discontinuous alpine permafrost. An example from the Swiss Alps. En: *Proceeding Third International Conference on Permafrost*, vol. 1, pp. 349–352, Edmonton.
- DARSCH, D., (1996). *Rock glaciers: Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments*. Springer–Verlag, 331 pp., Heidelberg.
- DELALOYÉ, R., (2004). Contribution à l'étude du pergélisol de montagne en zone marginal. *Departament of Geosciences–Geography*, University of Fribourg, Fribourg.
- GARCÍA–RUIZ, J.M., BORBONAU, J., MARTÍNEZ DE PISÓN, E., VILAPLANA, J.M., (1992). *Benasque (M.T.N. 180). Mapa geomorfológico*. Geoforma Ediciones, Logroño.
- GONZÁLEZ TRUEBA, J.J., MARTÍN MORENO, R., MARTÍNEZ DE PISÓN, E., SERRANO CAÑADAS, E., (2008). “Little Ice Age” glaciation and current glaciers in the Iberian Peninsula. *The Holocene*, 18 (4): 551–568.
- HAEBERLI, W., HALLET, B., ARENSON, L., ELCONIN, R., HUMLUM, O., KÄÄB, A., KAUFMANN, V., LADANYI, B., MATSUOKA, N., SPRINGMAN, S., VONDER MÜHL, D., (2006). Permafrost creep and rock glacier dynamics. *Permafrost and Periglacial Processes*, 17: 189–214.
- KÄÄB, A., KAUFMANN, V., LADSTÄDTER, R., EIKEN, T., (2003). Rock glaciers dynamics: implications from high resolution measurements of surface velocities fields. En: *Permafrost* (Philips, M., Springman, C., Arenson, H., Eds.), Swets and Zeitlinger, pp. 501–506.
- KÄÄB, A., (2006). *Remote Sensing of Mountain Glaciers and Permafrost Creep*. Schriftenreihe Physische Geographie, glaziologie und geomorphodynamic. Geographie Institut of Universität Zurich, Zurich.
- KAUFMANN, V., LADSTÄDTER, R., (2003). Quantitative analysis of rock glacier creep by means of digital photogrammetry using multi-temporal aerial photographs: two case studies in the Austrian Alps. *8th International Conference on Permafrost*, pp. 525–530.
- KONRAD, S.K., HUMPHREY, N.F., STEIG, E.J., CLARK, D.H., POTTER, J.R.N., PFEFFER, W.T., (1999). Rock glacier dynamics and palaeoclimatic implications. *Geology*, 27 (12): 1131–1134.
- LUGON, R., DELALOYÉ, R., SERRANO, E., REYNARD, E., LAMBIEL, C., GONZÁLEZ TRUEBA, J.J., (2004). Permafrost and Little Ice Age relationships, Posets massif, Central Pyrenees, Spain. *Permafrost and Periglacial Processes*, 15: 207–220.
- LUGON, R., STOFFEL, M., (2010). Rock–glacier dynamics and magnitude–frequency relations of debris flows in a high–elevation watershed: Ritigraben, Swiss Alps. *Global and Planetary Change*, 73: 202–210.

- MARTÍNEZ DE PISÓN, E., (1986). El macizo granítico del Aneto. En: *Atlas de Geomorfología* (Martínez de Pisón, E., Tello, B., Coord.), Alianza Editorial, pp. 17–26, Madrid.
- MARTÍNEZ DE PISÓN, E., (1989). Morfología glaciar del valle de Benasque (Pirineos Aragonés). *Ería*, 18: 51–64.
- SAN JOSÉ, J.J., AGUDO, C., SERRANO, E., SILIO, F., (1992). Auscultación topográfica y fotogramétrica del glaciar rocoso de las Argualas (Pirineo aragonés): datos preliminares. *Estudios de geomorfología en España, II Reunión Nacional de Geomorfología*, S.E.G., pp. 423–431, Murcia.
- SANJOSÉ, J.J., (2003). Estimación de la dinámica de los glaciares rocosos mediante modelización ambiental y técnicas fotogramétricas automáticas. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- SANJOSÉ, J.J., ATKINSON, A.D.J., SALVADOR, F., GÓMEZ ORTÍZ, A., (2007). Application of geomatic technique in controlling of the dynamics and cartography of the Veleta rock glacier (Sierra Nevada, Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 51: 79–89.
- SERRANO, E., AGUDO, C., (1998). Glaciares rocosos activos de los Pirineos. Implicaciones ambientales. En: *Procesos biofísicos actuales en medios fríos* (Gómez-Ortiz, A., Salvador-Franch, F., Schulte, L., García-Navarro, A., Eds.), Universidad de Barcelona, pp. 133–154, Barcelona.
- SERRANO, E., AGUDO C., MARTÍNEZ DE PISÓN, E., (1999). Rock glaciers in the Pyrenees. *Permafrost and Periglacial Processes*, 10: 101–106.
- SERRANO, E., AGUDO, C., (2004). Glaciares rocosos y deglaciación en la alta montaña de los Pirineos aragoneses (España). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, 99: 159–172.
- SERRANO, E., SANJOSÉ, J.J., AGUDO, C., (2006). Rock glacier dynamic in a marginal periglacial high mountain environment: flow, movement (1991–2000) and structure of the Argualas rock glacier. *Geomorphology*, 74: 285–296.
- SERRANO, E., SANJOSÉ, J.J., GONZÁLEZ TRUEBA, J.J., (2010). Rock glaciers dynamics in marginal periglacial environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 (11): 1302–1314.